



**anses**

# **Expositions aux technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée**

Avis de l'Anses  
Rapport d'expertise collective

Juin 2021



**CONNAÎTRE, ÉVALUER, PROTÉGER**



Le directeur général

Maisons-Alfort, le 1<sup>er</sup> juin 2021

## **AVIS** **de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de** **l'alimentation, de l'environnement et du travail**

**relatif aux « effets sanitaires liés à une exposition aux technologies de réalité virtuelle et/ou de réalité augmentée »**

---

*L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.*

*L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.*

*Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.*

*Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L. 1313-1 du code de la santé publique).*

*Ses avis sont publiés sur son site internet.*

---

L'Anses s'est autosaisie le 19 avril 2017 pour la réalisation de l'expertise suivante : « effets sanitaires liés à une exposition à la réalité virtuelle et/ou à la réalité augmentée ».

### **1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE**

Le développement rapide des nouvelles technologies audiovisuelles recourant aux techniques de réalité virtuelle (RV) et/ou de réalité augmentée (RA), leur diffusion croissante auprès du grand public et l'augmentation du recours à ces technologies dans le monde du travail s'accompagnent d'interrogations quant à leurs éventuels effets sur la santé. Ces interrogations, déjà soulevées dans les conclusions de l'avis de l'Anses, publié en 2014, sur les effets sanitaires des technologies audiovisuelles en 3D stéréoscopique (3Ds), appelaient à la réalisation d'un travail d'expertise spécifique sur ce sujet.

Dans ce contexte, et après avis de son Conseil scientifique, l'Anses a décidé de s'autosaisir afin d'évaluer les effets sanitaires potentiels liés à une exposition aux technologies de réalité virtuelle et/ou de réalité augmentée.

Les techniques de réalité virtuelle et/ou de réalité augmentée sont utilisées depuis quelques décennies en milieu de travail et ce dans différents secteurs d'activité (par ex. secteur

automobile, santé, etc.). Récemment, la réalité virtuelle a connu un nouvel essor avec l'augmentation de l'offre et la diffusion rapide de visiocasques destinés au grand public. La plupart des fabricants de visiocasques mettent en garde les utilisateurs, dans les notices d'emploi, contre de possibles situations d'inconfort (fatigue visuelle, nausées, étourdissements, etc.) et déconseillent même l'usage de ces dispositifs par les enfants de moins de 12 ou 13 ans. Il n'existe cependant pas d'argumentaire scientifique sous-jacent à ces précautions d'usage ni d'études sur lesquelles s'appuient ces mises en garde.

La réalité virtuelle et/ou la réalité augmentée désignent des formes spécifiques d'interaction humain-machine. Dans le cas de la réalité virtuelle, l'utilisateur est en immersion dans un monde virtuel entièrement généré par un ordinateur au moyen d'interfaces sensori-motrices et avec lequel il interagit. Dans le cas de la réalité augmentée, il s'agit d'une interaction avec des images virtuelles générées par des moyens informatiques permettant d'enrichir l'information provenant des objets et de l'environnement réels.

## 2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

La présente expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». L'Agence a mandaté un groupe de travail d'experts intitulé « Effets sanitaires liés à une exposition à la réalité virtuelle et/ou à la réalité augmentée » pour réaliser cette expertise, sous l'égide du CES.

### 2.1. Groupe de travail

Le groupe de travail a été constitué à la suite d'un appel à candidatures public. Les experts membres de ce groupe ont été retenus pour leurs compétences scientifiques et techniques dans le domaine des technologies de réalité virtuelle et/ou de réalité augmentée, de l'ophtalmologie, des neurosciences, des sciences psycho-sociales et de l'ergonomie. Le groupe de travail a été créé en mars 2018, il s'est réuni 27 fois en séances plénières entre mars 2018 et décembre 2020.

### 2.2. Contributions extérieures

Afin de pallier le manque de données relatives à la caractérisation des expositions aux technologies de réalité virtuelle et augmentée, deux études ont été financées par l'Anses.

#### *Sondage réalisé auprès de la population générale*

Une étude a été commanditée à l'organisme *OpinionWay* afin de procéder à la réalisation d'un sondage auprès de la population générale visant à recueillir des données d'exposition relatives aux technologies de réalité virtuelle et augmentée (population concernée, type d'application utilisée, fréquence d'utilisation et type de contenu).

#### *Mesures physiques effectuées sur des visiocasques et téléphones*

Une convention de recherche et développement a été établie entre l'Anses et le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), dans l'objectif de préciser l'exposition à différents types d'agents physiques émis par les dispositifs de réalité virtuelle. L'étude visait à caractériser, pour plusieurs types de dispositifs de réalité virtuelle (visiocasques et

téléphones), les émissions de champs électromagnétiques ainsi que la composition de la lumière émise par les écrans et sa modulation temporelle.

### 2.3. Expertise collective

Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires discutés avec les membres du CES. Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise ».

Les liens d'intérêts déclarés par les experts ont été analysés par l'Anses avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise. Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet : <http://www.anses.fr>

### 2.4. Questions instruites

De manière à mieux appréhender les risques que peuvent présenter ces technologies pour les populations, l'expertise de l'Anses s'est en premier lieu attachée à les décrire, grâce à :

- une classification des applications et des contextes possibles d'utilisation ;
- une présentation des différents dispositifs et interfaces de réalité virtuelle et/ou augmentée existants (interfaces visuelles, dispositifs auditifs, interfaces haptiques<sup>1</sup>) ;
- une présentation des contenus à visualiser *via* les dispositifs et de leurs caractéristiques (scènes et stimuli, expérience vécue par l'utilisateur, modalités d'interactions avec le dispositif).

Ces éléments sont décrits dans le chapitre 2 du rapport d'expertise.

Afin de mieux comprendre les effets néfastes potentiels de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée sur la santé humaine, les mécanismes physiologiques mis en jeu lors de l'interaction de l'humain avec ces technologies ont été décrits. Ces mécanismes physiologiques concernent particulièrement les systèmes visuels, vestibulaires et leurs interactions, et impliquent des effets non seulement au niveau du système nerveux central mais également du système nerveux autonome (périphérique).

C'est sur la base de ces éléments que les risques pour la santé, liés à l'usage de réalité virtuelle et augmentée, ont été évalués, grâce aux éléments disponibles concernant l'exposition de la population d'une part, et les effets sanitaires délétères d'autre part.

En outre, une réflexion a été menée, à partir de la littérature disponible, sur les questionnements éthiques que soulève l'utilisation de ces technologies.

### 2.5. Méthode d'expertise

#### *Recherche et analyse bibliographique*

L'expertise collective s'est principalement appuyée sur une analyse critique et une synthèse des données publiées dans la littérature scientifique (articles, rapports, etc.). La recherche

---

<sup>1</sup> Une interface haptique est un système à retour d'effort. Il permet à son utilisateur d'interagir avec une application logicielle ou un objet virtuel par l'intermédiaire du sens du toucher.

bibliographique a concerné la période de janvier 2010 à janvier 2020. En effet, les technologies de réalité virtuelle et augmentée ont évolué rapidement ces dernières années, ce qui limite la pertinence des publications scientifiques antérieures à 2010.

Les résultats des études financées par l'Anses ont permis de compléter les connaissances relatives aux expositions des populations aux technologies de réalité virtuelle et augmentée, et ont été pris en compte dans l'expertise.

Le groupe de travail a également auditionné des experts scientifiques et des personnalités extérieures (représentants du syndicat des éditeurs de logiciels de loisirs), afin d'apporter des informations et des données complémentaires à celles disponibles pour l'expertise.

#### *Évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires*

Dans cette expertise, seuls les effets potentiels néfastes ont été investigués, les effets thérapeutiques de dispositifs de réalité virtuelle et/ou augmentée n'ont pas été évalués. Pour chaque effet sanitaire néfaste étudié, les résultats issus des études retenues ont été considérés afin de caractériser les niveaux de preuve apportés au lien entre l'exposition aux technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée et la survenue de cet effet.

Au final, une évaluation globale du niveau de preuve de l'effet sanitaire lié à une exposition à la réalité virtuelle et/ou à la réalité augmentée a été établi dans une des catégories suivantes :

- effet avéré ;
- effet probable ;
- effet possible ;
- les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet ;
- probablement pas d'effet.

#### *Caractérisation des expositions*

L'exposition de la population générale et l'exposition de la population professionnelle ont été caractérisées par la description des utilisateurs (adultes et enfants), la fréquence et le temps d'utilisation, mais aussi par la nature des contenus visionnés. Par ailleurs, l'exposition aux agents physiques (lumière bleue, modulation temporelle de la lumière, bruit et champs électromagnétiques) émis par différents types de dispositifs a également été étudiée.

### **3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES**

#### **3.1. Exposition à la réalité virtuelle et/ou augmentée**

Bien que ces technologies soient de plus en plus utilisées en-dehors du milieu professionnel, dans la sphère privée et par le grand public, peu de données sont disponibles concernant l'exposition des populations à la réalité virtuelle et/ou augmentée. Seules quelques études ont en effet été recensées sur le sujet. L'expertise s'est donc attachée, par la réalisation d'une enquête transversale (sondage), à produire des données pour documenter ce volet. La combinaison des résultats du sondage et des données issues des études disponibles a permis de préciser les caractéristiques des utilisateurs de la réalité virtuelle et/ou augmentée en France, et de donner de premières évaluations de l'exposition, dans les sphères professionnelle, privée ou publique, en matière de temps d'exposition, de contenus visionnés et de dispositifs utilisés.

De manière générale, qu'elle concerne la réalité augmentée ou la réalité virtuelle, la durée moyenne d'une séance d'utilisation dépasse une heure pour la quasi-totalité des usages, la durée médiane se situant à 1 heure aussi bien pour les adultes que pour les enfants.

Chez les adultes, les utilisateurs sont plus souvent des hommes (57 %) avec un âge moyen de 40 ans, de catégories socio-professionnelles supérieures (43 %) et ayant une bonne maîtrise des outils technologiques. Chez les enfants, une légère prédominance des garçons est observée (55 %), et l'âge moyen est de 12,7 ans. Globalement, les classes d'âges les plus représentées sont 9-11 ans et 12-14 ans.

Dans la sphère privée, la réalité virtuelle est davantage utilisée que la réalité augmentée. L'usage est principalement associé aux jeux vidéo, surtout chez les enfants. Le smartphone est le premier support utilisé par les adultes tandis qu'il s'agit des consoles de jeux chez les enfants. Toutefois, les adultes, comme les enfants, utilisent en moyenne 3 types d'interfaces, les plus citées étant le smartphone, les visiocasques dédiés et les consoles de jeux.

Dans le cadre professionnel, on observe un usage assez similaire des deux technologies. L'usage est essentiellement lié à la formation, la santé ou la gestion des stocks, et le smartphone est moins utilisé au profit de l'ordinateur et des visiocasques.

### **3.2. Effets sanitaires néfastes liés à une exposition à la réalité virtuelle et/ou augmentée**

Les travaux d'expertise avaient pour objectif d'évaluer le niveau de preuve associé aux effets sanitaires potentiels néfastes présentés dans la littérature scientifique. Il est à noter que les études s'intéressant aux effets sanitaires néfastes retenues ont été celles réalisées exclusivement chez l'humain, et non chez l'animal. Ces derniers travaux sont rares et n'ont pas été jugés pertinents.

Les études sur les effets sanitaires bénéfiques, évalués dans le cadre d'essais thérapeutiques, n'ont pas été prises en compte en cas d'absence de résultats sur des effets secondaires néfastes. Néanmoins, leur intérêt en vue de mieux comprendre les mécanismes de survenue des effets sanitaires sera questionné à la fin de cette partie.

Les effets sanitaires documentés dans la littérature scientifique recensée sont les suivants :

- les effets liés à l'ergonomie des interfaces de réalité virtuelle et/ou augmentée (troubles musculo- squelettiques, accidentologie<sup>2</sup>, effets liés à l'hygiène des interfaces et au niveau sonore) ;
- la cybercinétose : nausées, vomissements, maux de tête, inconfort général, effets visuels, effets physiologiques (cardiaques, gastriques, respiratoires, cutanés, ...), effets vestibulaires (vertiges) ;
- l'altération de la coordination sensori-motrice consécutive à l'exposition ;
- les effets psychologiques et psychosociaux (risques émotionnels, déréalisation, dépendance à l'égard de l'interface et du contenu, effets liés au contenu (violence, rapport à la sexualité, ...), isolement social) ;
- les effets de modification de la représentation de soi (par le biais d'avatars) ;

---

<sup>2</sup> On entend ici par accident les chutes ou heurts liés par exemple à un déficit d'éclairage ou encore à l'occultation ou l'encombrement de l'espace environnant.

- les effets liés aux agents physiques émis par les dispositifs de réalité virtuelle et/ou de réalité augmentée (lumière bleue et modulation temporelle<sup>3</sup> de la lumière, champs électromagnétiques) ;
- les effets neurologiques (crises d'épilepsie) ;
- les effets sur le développement (émotionnel, cognitif) des systèmes visuel et auditif.

Pour chacun des effets sanitaires listés ci-dessus, et en fonction de la disponibilité en données issues de publications scientifiques de qualité suffisante, le niveau de preuve de l'effet sanitaire lié à l'exposition à la réalité virtuelle et/ou augmentée a été évalué et les mécanismes associés détaillés. Les résultats de cette évaluation sont présentés ci-après.

### 3.2.1. Effets sanitaires suffisamment documentés

Pour ce qui concerne la réalité virtuelle, certains effets sanitaires étaient suffisamment documentés pour permettre au groupe de travail de les mettre en évidence et d'évaluer le niveau de preuve associé :

- la cybercinétose, qui fait l'objet d'une très grande majorité des publications recensées, et qui inclue les effets sur le système nerveux central et périphérique (autonome et somatique), notamment les effets sur la posture et l'équilibre, ainsi que les effets visuels ;
- les effets survenant seulement après l'exposition (modification des capacités sensorimotrices et perceptives) ;
- les effets liés aux agents physiques : lumière bleue, modulation temporelle de la lumière (maux de tête, fatigue visuelle, ...), les champs électromagnétiques émis par les dispositifs.

L'intensité de ces effets dépend des dispositifs d'exposition (interface) et du contenu proposé, mais également de la sensibilité individuelle de chacun.

#### **Cybercinétose**

##### *Symptômes et mesures physiologiques*

La cybercinétose regroupe un ensemble de symptômes qui peuvent être éprouvés lors d'une exposition à la réalité virtuelle : pâleur, sensation de malaise, troubles visuels, désorientation, maux de tête, fatigue, vertiges et instabilité posturale, nausées, vomissements, tachycardie, hypersalivation. La cybercinétose concerne entre 30 et 50 % des utilisateurs, selon les types de populations (*cf.* sondage *OpinionWay* pour l'Anses), et peut apparaître très rapidement après le début de l'expérience (en moins de 5 minutes). La possibilité d'apparition de la cybercinétose est très dépendante du contenu (tour de montagnes russes, ou au contraire paysage calme, ...), du champ visuel sollicité (plus il est large, plus les symptômes peuvent être intenses), ou encore de l'interface visuelle et du mode d'interaction.

Les symptômes visuels, fréquents dans la cybercinétose, peuvent se traduire par de la fatigue oculaire, des troubles oculomoteurs, des migraines et céphalées, une vision trouble pendant et après l'exposition, un inconfort visuel, une sensation de sécheresse oculaire, des brûlures

---

<sup>3</sup> La modulation temporelle de la lumière est une variation au cours du temps du niveau de luminance de l'objet lumineux à une fréquence qui rend ce phénomène visible ou non par l'œil humain. La modulation temporelle peut ne pas être perceptible par l'œil mais pour autant être associée à des effets sanitaires.

oculaires et des larmoiements. Ces symptômes sont en général temporaires et disparaissent dans les minutes ou heures qui suivent l'exposition.

Quelques études mettent en évidence une augmentation de l'instabilité posturale pendant ou après l'exposition à la réalité virtuelle, pouvant aller jusqu'à la perte d'équilibre lorsque le contenu est particulièrement susceptible de provoquer une réaction (*i.e.* montagnes russes). Si le risque de perte d'équilibre diminue très vite au cours même de l'exposition, la persistance de l'instabilité posturale après exposition est encore peu documentée.

Les expériences de réalité virtuelle induisent également des effets sur les systèmes nerveux central et périphérique, selon des mécanismes encore assez méconnus. La combinaison de mesures subjectives (*via* des échelles ou questionnaires) et objectives (mesures physiologiques) permet d'évaluer la sévérité des symptômes de cybercinétose ressentis lors d'une expérience en réalité virtuelle. Il existe une corrélation entre la sévérité subjective des symptômes et leur manifestation sur le plan physiologique (variables cardiaques, neurologiques et sensorielles, cutanées, digestives, respiratoires, ...). En général, les effets augmentent avec le temps d'exposition et/ou les contenus provocants (situation virtuelle, vitesse ou sens de navigation, ...), mais diminuent avec la répétition des séances et donc l'habituation.

#### *Contextes favorisant l'apparition de la cybercinétose*

L'analyse des études recensées a permis de mettre en évidence l'existence de facteurs à la fois technologiques et individuels liés à un risque accru d'apparition de cybercinétose, même si les mécanismes ne sont pas encore compris. L'hétérogénéité des facteurs pris en compte, des temps et modalités d'exposition, de l'utilisation de différents questionnaires (*e.g.* pendant l'exposition, avant et après, après uniquement), limite la possibilité de conclure sur les conditions d'apparition de la cybercinétose.

Parmi les facteurs technologiques, le mode de navigation (marche, conduite, vol, etc.) est souvent incriminé dans les facteurs causaux, mais les éléments de preuve apportés par les études disponibles ne permettent pas de conclure quant à son implication directe. Par contre, un environnement correctement aéré, une musique ou un parfum agréable ont un effet réducteur sur l'intensité de la cybercinétose.

Le mode de diffusion du rendu visuel peut également augmenter la sévérité des symptômes ressentis. L'utilisation d'un visiocasque, par exemple, est liée à une cybercinétose plus prononcée (en matière de sévérité des symptômes), sans toutefois pouvoir distinguer les rôles joués par le rendu stéréoscopique, le mouvement actif de la tête, ou encore le type de contrôle sur l'environnement visuel.

Enfin, peu d'études se sont intéressées aux facteurs technologiques autres que visuels qui sont potentiellement contributifs à l'apparition de cybercinétose. Par exemple, il a été démontré que le rendu auditif d'un mouvement, alors que l'on est statique, peut provoquer l'apparition de cybercinétose.

La susceptibilité individuelle est reliée à une grande diversité d'éléments. De manière générale, une plus grande acuité des systèmes sensoriels expliquerait la sensibilité des personnes âgées de 12 à 50 ans. À ceci s'ajoutent les personnes sujettes à l'instabilité posturale, au mal des transports, à l'anxiété et aux migraines. Une plus forte sensibilité à la cybercinétose a également été rapportée pour les femmes en milieu de cycle menstruel ou enceintes. Réciproquement, l'expérience d'utilisation semble diminuer l'intensité des symptômes de la cybercinétose.

Soumises à des expositions, ces personnes doivent, pour réduire le risque d'apparition de symptômes, éviter la visualisation de mouvements rapides et multidimensionnels (sur plus de deux axes, accélérations, flux en sens avant et arrière), et éviter les visiocasques. Limiter les mouvements du corps en s'asseyant, par exemple, sur un siège avec dossier permet également de limiter les symptômes. La limitation des mouvements de même que l'utilisation de techniques de respiration aident également à réduire la sévérité des symptômes chez les personnes sensibles à la cybercinétose.

Les éléments de preuve disponibles dans les études expérimentales chez l'humain, selon le groupe de travail et le CES, sont suffisants pour conclure à l'existence d'un lien entre l'exposition à la réalité virtuelle et l'apparition de la cybercinétose. La cybercinétose est donc un effet avéré de l'exposition à la réalité virtuelle. Les symptômes semblent réversibles, néanmoins il n'y a pas assez de données dans la littérature pour évaluer la persistance ou non des symptômes.

### **Les effets survenant seulement après l'exposition**

L'expertise a soulevé l'existence d'effets néfastes (modification de capacités sensorimotrices et perceptives) survenant après l'exposition à la réalité virtuelle et/ou augmentée, liés aux incongruences sensorielles<sup>4</sup> lors de l'exposition.

Le groupe de travail et le CES concluent que l'effet de l'exposition sur les capacités sensorimotrices et perceptives est avéré. Ces effets peuvent perdurer plusieurs heures après l'exposition et le retour à des performances existant avant exposition pourrait dépendre du type d'incongruence vécue.

### **Effets liés aux agents physiques**

Une campagne de mesure sur des visiocasques<sup>5</sup> de réalité virtuelle a été entreprise lors de cette expertise. Elle a permis de documenter les émissions de champs électromagnétiques et de caractériser la modulation temporelle de la lumière émise par les visiocasques.

En ce qui concerne les champs électromagnétiques émis par les dispositifs de réalité virtuelle, ces derniers sont générés par leurs émetteurs radiofréquences (pour les communications de type Wi-Fi, *Bluetooth*, 4G, 5G, etc.) et par des perturbations électromagnétiques pouvant provenir des circuits, capteurs et équipements électroniques intégrés dans les casques. Les niveaux de champs électromagnétiques mesurés sur les casques de réalité virtuelle sont faibles et l'exposition résultante bien inférieure aux valeurs limites réglementaires. Les expertises les plus récentes menées par l'Anses n'ont pas mis en évidence de lien de cause à effet entre l'exposition aux champs électromagnétiques à de faibles niveaux et la survenue d'effets sur la santé.

Similairement, les niveaux de luminance de la lumière émise par les écrans de dispositifs de réalité virtuelle testés sont faibles. Cependant, cette lumière peut être riche en bleu. Or, l'effet de la lumière bleue sur la perturbation des rythmes circadiens et le sommeil est avéré (Anses, 2019<sup>6</sup>). Par ailleurs, les conséquences sur la rétine d'une exposition de longue durée et à courte distance des yeux restent à déterminer. Le cristallin des enfants, adolescents et jeunes

---

<sup>4</sup> Mauvaise adaptation des signaux entre eux.

<sup>5</sup> Seuls des visiocasques avec écrans intégrés ont été testés, les visiocasques utilisant des smartphones n'ont pas été testés.

<sup>6</sup> Avis de l'Anses de 2019 relatif aux effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des systèmes utilisant des diodes électroluminescentes.

adultes, en cours de maturation, filtre très mal la lumière bleue, ils sont donc plus sensibles à l'ensemble des dispositifs émettant de la lumière bleue.

Enfin, tous les casques testés présentent une très forte modulation temporelle de la lumière, avec des taux de modulation de l'ordre de 100 % (ce qui n'est jamais le cas avec les écrans usuels (tablettes, smartphone, TV, ordinateurs, ...), dans une gamme de fréquences allant de 70 à 90 Hz. Le groupe de travail rappelle que l'expertise de l'Anses publiée en 2019 portant sur les effets sanitaires des LED avait conclu que : « l'effet de la modulation temporelle de la lumière (dans la bande de fréquences de 1 à 80 Hz) sur le déclenchement de crises chez les personnes souffrant d'épilepsie est avéré » et que « l'effet de la modulation temporelle (dans la bande de fréquence de 50 à 120 Hz) de la lumière sur la fatigue visuelle, le déclenchement de maux de tête, de migraines est possible ».

### **3.2.2. Effets sanitaires néfastes pour lesquels il n'est pas possible de conclure (manque de données)**

Le manque de données dans la littérature scientifique (absence d'études ou trop peu d'études selon les effets) n'a pas permis de conclure à l'existence ou non d'effets sanitaires néfastes de la réalité virtuelle et/ou augmentée pour les effets suivants :

- ceux liés à l'ergonomie, par exemple troubles musculo-squelettiques (TMS), survenue d'accidents (pas d'études en réalité virtuelle, trop peu d'études en réalité augmentée avec une focalisation sur la seule réalité augmentée mobile) ;
- psychologiques et psychosociaux (trop peu d'études) ;
- sur la représentation de soi dans le monde virtuel (trop peu d'études) ;
- neurologiques (pas d'études) ;
- sur le développement (pas d'études longitudinales).

En ce qui concerne les effets liés à l'ergonomie, les études disponibles sont peu nombreuses et comportent des limites méthodologiques. Focalisées sur la réalité augmentée en situation de mobilité, elles mettent en évidence une prévalence faible des atteintes musculo-squelettiques, analogue à celle observée pour d'autres formes d'activité physique légère à modérée se déroulant en extérieur. Les rares synthèses s'intéressant à la réalité virtuelle ou à la réalité augmentée fournissent des données qualitatives sur la variété d'atteintes physiques, sans toutefois renseigner sur leur prévalence. Ces atteintes sont de types blessures, fractures, atteintes au niveau des tendons. Une autre dimension examinée concerne l'impact en matière de charge de travail (surcharge d'informations).

En ce qui concerne les effets de la représentation de soi dans le monde virtuel (avatar), le sujet est investigué depuis peu en raison des progrès technologiques récents en matière de visiocasques, de rendu réaliste et de puissance de calcul. Les études sont très parcellaires et s'intéressent essentiellement à des situations où les caractéristiques de l'avatar sont imposées à l'utilisateur. Néanmoins, elles semblent indiquer que le sentiment d'incarnation dans un humain virtuel (avatar) a une influence. Cette influence, pas simplement liée à des critères de plaisir ou de réalisme, semble être bien réelle et se traduit par des modifications du comportement possiblement pendant et après l'exposition. Si les études montrent principalement des modifications comportementales, considérées comme « positives » (comportement plus social, moins sensible aux stéréotypes de genre ou racistes), les mécanismes menant à ces modifications pourraient tout autant induire des modifications « négatives », même si cela n'a pas été étudié directement, pour des motifs éthiques. Les résultats de ces études suffisent à souligner la nécessité d'une vigilance.

En ce qui concerne les autres effets psychologiques ou psychosociaux, un ensemble très restreint d'études portant sur l'évaluation des effets psychologiques potentiellement nocifs attribués à la réalité virtuelle a été identifié. Les études se sont penchées en particulier sur l'éventualité d'une altération du rapport au réel. Les quelques études évaluant les idéations paranoïaques après exposition en réalité virtuelle ne permettent pas de statuer sur un possible effet néfaste spécifique à la réalité virtuelle. Bien qu'une étude ait montré qu'il est possible d'induire des symptômes assimilables à de la déréalisation avec la réalité virtuelle, ceux-ci ne seraient pas forcément néfastes et pourraient même participer au bien-être de la personne. La question de l'exposition à des contenus violents a également été abordée, mais sans qu'il soit possible de faire la distinction entre les effets des contenus violents et les effets du dispositif de réalité virtuelle.

Il n'existe pas de données concernant d'éventuels effets neurologiques néfastes d'une exposition à la réalité virtuelle ou augmentée.

Pour ce qui concerne les effets délétères sur le développement, il n'existe pas d'étude longitudinale permettant de juger des effets sur le long terme d'une exposition à la réalité virtuelle ou augmentée. Néanmoins, le groupe de travail s'interroge sur les effets sur le développement (dans l'ensemble de ses dimensions : psychologique, visuel, sensori-moteur, ...) d'une exposition à la réalité virtuelle et/ou augmentée pendant l'enfance ou adolescence.

### 3.3. Populations sensibles

Le CES souligne que le groupe de travail a identifié, au travers des études analysées, des groupes de populations particulièrement sensibles et susceptibles de développer des effets néfastes suite à une exposition à la réalité virtuelle et/ou augmentée.

- les populations *a priori* davantage sensibles à la cybercinétose, de par leur état physiologique et aux conditions de déstabilisation liées à la réalité virtuelle et/ou augmentée dues aux difficultés d'intégration multi sensorielle :
  - les femmes enceintes ;
  - les personnes souffrant de troubles vestibulaires (pathologies otolithiques, réflexe vestibulo-oculaire anormal, notamment aux fréquences moyennes et rapides) ;
  - les personnes souffrant du mal des transports ;
  - les personnes présentant des anomalies de la statique posturale et/ou de l'équilibre dynamique avec troubles de la proprioception (troubles cervicaux, troubles ostéo-articulaires importants, personnes souffrant de la maladie de parkinson, personnes âgées, ...) ;
  - les personnes sujettes à des troubles oculomoteurs (strabisme, trouble de la convergence, anisophorie, anisométrie (trouble de la réfraction asymétrique), amblyopie relative (différence de perception visuelle entre les deux yeux), amétropie non corrigée ; les personnes souffrant de pathologies ou d'anomalies oculaires ;
  - les personnes sujettes aux migraines ;
  - les personnes au tempérament anxieux ou sujettes à des crises d'anxiété.
- les populations davantage sensibles aux rayonnements lumineux émis par les dispositifs, de par leur âge ou leur état de santé :

- les enfants, les adolescents, les jeunes adultes (cristallin clair) ; les personnes aphakes (absence de cristallin) et pseudo-phakes (cristallin artificiel) ; les personnes souffrant de pathologies ou d'anomalies oculaires ;
- les personnes souffrant de troubles du sommeil ;
- les personnes souffrant d'épilepsie photosensible.

La réalité virtuelle et la réalité augmentée sont cependant utilisées sur certaines de ces populations dites sensibles dans un contexte de rééducation thérapeutique dans un cadre médical averti des risques. Dans ce cadre, il convient de porter une attention particulière à ces populations.

Par ailleurs, le CES et le groupe de travail attirent l'attention sur la possibilité d'une aggravation de pathologies préexistantes par les effets de la réalité virtuelle ou augmentée sur le système nerveux autonome, chez certains groupes de populations. Il s'agit des personnes souffrant de certaines pathologies cardiaques (angor, insuffisance cardiaque, troubles du rythme, troubles de conduction cardiaque non contrôlée) ou de troubles neuropathiques primaires ou secondaires liés à des pathologies métaboliques, hypertension artérielle non contrôlée, etc.

### **3.4. Aspects éthiques liés à l'exposition à la réalité virtuelle et/ou à la réalité augmentée**

Une revue de la littérature spécifique avait pour objectif d'examiner les études proposant un questionnement d'ordre éthique sur l'exposition des utilisateurs à des dispositifs de réalité virtuelle et de réalité augmentée, ainsi que sur les effets sur autrui et sur le plan sociétal.

Cette littérature est hétérogène sur le plan de sa légitimité scientifique. De nombreuses publications se contentent d'affirmer, sans le prouver, un certain nombre de thèses qui dérivent généralement d'une posture idéologique (par exemple technophobie). En somme, il existe peu d'études fondées soit sur une approche de terrain, soit sur une argumentation rationnelle ou une démonstration.

Plusieurs interrogations fondamentales émergent cependant, sur lesquelles il serait pertinent de conduire une réflexion plus approfondie et concertée en présence des acteurs impliqués (concepteurs, financeurs, distributeurs, prescripteurs, utilisateurs professionnels et particuliers).

Est-il acceptable, sur le plan éthique, que des environnements virtuels ou augmentés puissent échapper aux questionnements éthiques sous prétexte qu'ils n'appartiennent pas à l'environnement réel ? Pour le formuler différemment, les acteurs impliqués (du concepteur à l'utilisateur final) doivent-ils prendre pour cadre de référence de leurs décisions et de leurs actions dans la réalité virtuelle ou augmentée les préceptes éthiques qui guident leur choix et leurs actes dans l'environnement réel ? Cette question trouve évidemment un prolongement dans la possibilité qui doit être laissée à l'utilisateur de faire, dans les mondes virtuels, des choix en accord avec sa philosophie personnelle, et à ne pas le contraindre à choisir uniquement entre deux éventualités également condamnables à ses yeux (par exemple, dans une séquence de fuite dans un jeu, un compagnon me ralentit : j'ai le choix entre l'abandonner ou le tuer, l'aider à marcher n'est pas dans les options proposées par le concepteur...).

Est-il acceptable, sur le plan éthique, que les acteurs impliqués ne prennent pas en compte les effets (avérés et/ou potentiels) de l'exposition à un environnement virtuel ou augmenté pouvant survenir dans les suites de l'exposition ? La responsabilité de ces acteurs s'arrête-t-elle aux « frontières » spatiales et temporelles de l'environnement virtuel ou augmenté ou ne

devrait-elle pas être étendue au-delà (dans l'environnement réel pendant et après l'exposition) ? Le cas échéant, comment borner cette responsabilité dans l'espace et dans le temps et à qui l'attribuer ?

Par ailleurs, l'existence de postures idéologiques (par exemple technophiles vs technophobes) diffusées dans les médias, dans certains ouvrages et présentes dans les discours du public contribuent à la cacophonie relative au rapport bénéfices/risques liés à la réalité virtuelle et/ou augmentée. L'idée que l'exposition à des dispositifs de réalité virtuelle provoquerait des phénomènes de dépendance et d'addiction n'est associée à aucune preuve scientifique à ce jour. Une éthique d'une information scientifiquement fondée doit trouver sa place afin de garantir que les décisions des acteurs puissent être encadrées par des préceptes éthiques. Notamment celles du concepteur qui crée un environnement prescrivant des actions éthiquement contestables, celles d'un professionnel utilisant un dispositif auprès du public sans l'informer des effets néfastes possibles, et celles d'un utilisateur dont le comportement est éthiquement questionnable.

### **3.5. Conclusions du CES et du groupe de travail**

En conclusion, le CES attire l'attention sur les effets sanitaires suffisamment documentés et détaillés ci-dessus, et notamment la cybercïnétose et les effets survenant après l'exposition sur les modifications des capacités sensorimotrices et perceptives, qui semblent être réversibles, même si la durée de leur persistance n'est pas connue. Par ailleurs, cette expertise souligne que certains dispositifs utilisés par la réalité virtuelle et la réalité augmentée peuvent être concernés par les effets sanitaires associés à la lumière émise, que ce soit ceux liés à sa composante bleue ou encore à sa forte modulation temporelle.

Au-delà de ces effets bien documentés, il existe encore de nombreuses incertitudes sur les conséquences possiblement délétères que peut induire l'utilisation de réalité virtuelle et/ou augmentée. Le CES fait ainsi le constat d'un manque de données concernant les effets néfastes possibles liés à la réalité virtuelle et/ou augmentée, dont certains ne sont pas encore étudiés par la communauté scientifique.

Les technologies de réalité virtuelle et augmentée sont par ailleurs aujourd'hui largement utilisées à des fins thérapeutiques, avec une efficacité revendiquée. Même si cette efficacité n'est pas analysée dans la présente expertise, cela suggère que ces technologies peuvent agir durablement sur l'être humain, sa psychologie, sa mémoire, sa physiologie, etc. La compréhension des mécanismes en jeu lors de l'usage des technologies de réalité virtuelle et augmentée dans ce cadre thérapeutique pourrait aider à identifier des effets néfastes en miroir non encore documentés ou non encore envisagés.

### **3.6. Recommandations du CES et du groupe de travail**

Le CES reprend les recommandations du groupe de travail visant à informer sur les effets sanitaires de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée, à encadrer les usages en vue de protéger les utilisateurs et à améliorer les connaissances dans le domaine des effets sanitaires potentiellement néfastes liés à une exposition à ces technologies.

*Recommandations visant à informer les utilisateurs sur les effets sanitaires avérés*

Dans la mesure où le groupe de travail a identifié des effets sanitaires avérés, il convient d'informer les utilisateurs (professionnels et particuliers), par des moyens adaptés, que l'usage de réalité virtuelle et/ou augmentée peut :

- conduire à l'apparition de cybercinétose et de ses symptômes liés, certains pouvant persister après l'exposition ;
- avoir des conséquences au niveau sensorimoteur (par exemple : altération de l'habileté manuelle ou de la capacité à orienter son corps) après une exposition ;
- conduire, lors d'une exposition à la lumière émise par les dispositifs, à une perturbation des rythmes circadiens (difficultés d'endormissement, temps de sommeil, etc.) ;
- induire, chez des personnes dont le terrain est favorable, des crises d'épilepsie.

*Recommandations visant à informer les utilisateurs sur les effets sanitaires pour lesquels il n'est pas possible de conclure*

Par ailleurs, le CES et le groupe de travail attirent l'attention sur les effets sanitaires insuffisamment documentés et pour lesquels il conviendrait également d'informer les utilisateurs :

- dans le cas de l'usage d'un avatar, des répercussions comportementales pendant et après l'exposition ;
- des effets liés à l'ergonomie, par exemple troubles musculo-squelettiques (TMS), survenue d'accidents (pas d'études en réalité virtuelle, trop peu d'études en réalité augmentée avec une focalisation sur la seule réalité augmentée mobile) ;
- des effets psychologiques et psychosociaux (trop peu d'études) ;
- des effets neurologiques (pas d'études) ;
- des effets sur le développement (pas d'études longitudinales).

Dans ce contexte, il convient d'informer les utilisateurs sur les précautions à adopter :

- prendre un temps de repos après l'exposition, notamment avant l'usage d'un véhicule ou l'utilisation d'outils ou de machines ;
- arrêter immédiatement son exposition en cas d'apparition de symptômes, sauf en cas d'utilisation dans un cadre thérapeutique ou professionnel accompagné ;

Enfin, il convient de conseiller aux personnes, et en particulier celles identifiées comme sensibles, de limiter leur exposition.

*Recommandations réglementaires ou d'encadrement des usages visant à protéger les personnes, en limitant la survenue des effets :*

- protéger les populations les plus sensibles (cf. ci-dessus) en rendant obligatoire leur information et en limitant les temps d'exposition, voire en limitant l'accès à ces technologies dans la sphère publique ;
- encadrer, en dehors de l'usage privé, l'utilisation des technologies par :
  - le recours à des lieux adaptés présentant notamment une salle permettant un temps de repos après l'exposition pour limiter le risque d'accidents liés à une désadaptation temporaire à l'environnement réel ;

- la surveillance, par des personnes averties, des risques de telle sorte que l'utilisateur ne constitue pas un danger pour soi ou pour d'autres personnes (salle de réalité virtuelle, espace suffisant, ...)
- dans la mesure où l'expérience de réalité virtuelle et/ou augmentée peut affecter le bien-être de la personne, la possibilité pour l'utilisateur d'arrêter son exposition à tout moment ;
- une information sur les tranches d'âges préconisées pour les contenus utilisés (par exemple en utilisant le système d'évaluation européen PEGI<sup>7</sup>).

Et plus spécifiquement pour les usages dans le cadre professionnel :

- imposer des alternatives à la réalité virtuelle pour les personnes sensibles ;
- encourager la création de formations pour les utilisateurs de dispositifs de réalité virtuelle et/ou augmentée.

### *Recommandations d'étude et de recherche*

De façon générale, de manière à pouvoir mieux exploiter les résultats issus de travaux de recherche dans l'évaluation des risques sanitaires liés à l'exposition à la réalité virtuelle et/ou augmentée, il convient d'améliorer la reproductibilité des études et la description des dispositifs technologiques et des procédures dans les publications scientifiques (caractérisation de l'exposition, des dispositifs utilisés, temps d'exposition, etc.).

Le CES recommande d'encourager la production de connaissance et la documentation des mécanismes en jeu dans le cadre des effets thérapeutiques.

Une meilleure documentation des effets sanitaires pour lesquels il n'a pas été possible de conclure est nécessaire, ainsi qu'une meilleure compréhension des mécanismes d'apparition associés :

- investiguer les risques psychologiques et psychosociaux liés à l'usage de réalité virtuelle et/ou augmentée ; les effets d'une exposition sur le développement des enfants ; les effets neurologiques potentiels, les usages problématiques voire l'addiction ;
- mieux comprendre les effets de l'incarnation dans un avatar ;
- mieux documenter les effets consécutifs à l'exposition ou survenant après l'exposition ;
- identifier plus précisément les facteurs techniques (interfaces, durée d'exposition, contexte et type d'usage...) et les facteurs individuels impliqués dans la survenue des différents effets délétères sur la santé ;
- préciser les effets liés à l'ergonomie (risque de chute, accident, ...)
- analyser les contenus grands publics des technologies de réalité virtuelle pour juger des incongruences subies et des possibles effets après l'exposition.

Plus spécifiquement, concernant la cybercinétose, il convient de mener des études complémentaires qui permettraient de :

- mieux documenter les facteurs individuels pouvant favoriser l'apparition de la cybercinétose ;

---

<sup>7</sup> PEGI : *Pan European Gaming Information*. Le classement se compose de 2 séries de logo, la 1<sup>ère</sup> indique à l'aide d'un chiffre l'âge minimal du joueur, la 2<sup>e</sup> indique à l'aide d'une image et d'un mot le type de contenu (par exemple, contenu violent ou choquant).

- investiguer les mécanismes d'apparition de la cybercinétose et de sa persistance après exposition, ainsi que leur lien avec les différents paramètres technologiques ;
- étudier la possibilité de mettre en œuvre des tests afin de mesurer avant l'exposition l'organisation posturale et les oscillations spontanées du corps, dans le but de prédire si une personne sera sujette ou non à la cybercinétose.

Les effets sanitaires d'une co-exposition à la réalité virtuelle et/ou augmentée et à d'autres facteurs de risques tels que le tabac, les substances psychotropes, l'alcool, etc. mériteraient d'être étudiés.

Enfin, les conséquences à long terme liées à la répétition des expositions devraient être investiguées, notamment l'aggravation potentielle de pathologies préexistantes, ainsi que l'ensemble des effets néfastes avérés et suspectés.

En matière d'exposition, un effort devra être conduit pour obtenir une meilleure caractérisation des populations exposées et des usages :

- mieux connaître les usages pour évaluer de façon plus pertinente les risques associés ;
- mieux connaître la population et les durées d'exposition ;
- mieux documenter l'exposition de la population aux différents agents physiques : lumière bleue, modulation temporelle, son et champs électromagnétiques radiofréquences lors d'une utilisation d'un téléphone mobile comme dispositif de réalité virtuelle et/ou augmentée.

Une prise en compte des aspects éthiques :

- conduire une réflexion approfondie et concertée avec les acteurs impliqués à propos des problématiques éthiques impliquées dans l'exposition à la réalité virtuelle et à la réalité augmentée ;
- engager une réflexion concernant les dispositions légales qui pourraient encadrer l'utilisation de dispositifs de réalité virtuelle et augmentée.

#### 4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

Les domaines d'application des technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée, en dépassant le seul domaine professionnel, se sont largement développés ces dernières années dans des usages variés (pédagogiques, thérapeutiques, ludiques, informationnels, etc.), touchant désormais un public plus large, plus diversifié et notamment plus jeune.

Ce développement s'est accompagné de l'apparition, dans la littérature scientifique, de la description de divers symptômes (nausées et vertiges, fatigue visuelle et/ou générale, etc.) par des utilisateurs de visiocasques, associés à de possibles incohérences sensori-motrices (par exemple, délai entre le moment où l'utilisateur bouge la tête et celui où l'image dans le casque est mise à jour).

Ces éléments ont donc conduit l'Anses à s'autosaisir, afin d'analyser en détail les possibles effets sanitaires liés à l'utilisation de réalité virtuelle et de réalité augmentée.

La réalité virtuelle et la réalité augmentée sont des technologies également utilisées dans le cadre thérapeutique pour des effets considérés comme positifs pour l'être humain, dans le traitement de certains troubles (par exemples phobie, addiction, etc.). Ces aspects bénéfiques n'ont cependant pas été examinés dans le cadre de la présente expertise.

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions et recommandations de son comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ».

S'agissant des potentiels effets délétères, l'analyse de la littérature scientifique disponible a permis de démontrer que l'exposition à la réalité virtuelle :

- perturbe le système sensoriel et peut conduire à des symptômes (de type nausées, vertiges, sueurs, pâleur, ...) regroupés sous la dénomination de « cybercinétose ». Ces symptômes peuvent apparaître très rapidement lors de l'exposition chez les personnes qui y sont sensibles. Ces symptômes semblent réversibles, mais leur persistance éventuelle est insuffisamment documentée ;
- peut aussi, après l'exposition, induire la modification des capacités sensorimotrices et perceptives.

Par ailleurs, les visiocasques et téléphones mobiles (que l'on peut intégrer dans un visiocasque) utilisent des écrans à LED riches en lumière bleue et cet usage se fait à une courte distance des yeux (quelques centimètres). Or, l'Anses a montré dans son expertise publiée en 2019<sup>8</sup> qu'une exposition à la lumière bleue en soirée ou la nuit peut induire une perturbation des rythmes circadiens. Par ailleurs, l'exposition à la lumière bleue pourrait induire des effets toxiques pour la rétine sur le long terme. Enfin, l'exposition à la modulation temporelle de la lumière émise par ces écrans à LED peut déclencher des crises d'épilepsie chez des personnes ayant un terrain favorable.

Ainsi, pour éviter leur survenue, il convient d'adapter les usages et expositions, et l'agence recommande notamment :

- d'arrêter l'exposition dès l'apparition de symptômes lors de la survenue de cybercinétose, afin de limiter le risque d'accident (lié à une possible perturbation du système vestibulaire) ;
- d'observer un temps de repos après toute exposition ;
- d'éviter toute exposition 2 h avant le coucher (notamment pour les populations les plus sensibles comme les enfants et les adolescents) pour ne pas s'exposer à la lumière bleue issue des écrans des technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée ;
- de déconseiller l'usage des technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée pour les épileptiques.

L'agence recommande qu'une information claire sur ces effets soit mise à disposition des différents utilisateurs :

- du monde professionnel, par l'intermédiaire de formations ou de supports et guides dédiés ;
- du grand public (cercle privé et lieux publics), par l'intermédiaire d'un étiquetage, d'affichage, ...

L'agence recommande de renforcer la sensibilisation des acteurs de la santé au travail et la prise en compte notamment des effets avérés dans l'objectif de protéger la santé des travailleurs (renseignement des risques liés à la RV/RA dans le document unique d'évaluation des risques professionnels, nécessité de proposition d'alternatives aux technologies de RV et/ou RA, surveillance des expositions dans un cadre professionnel, prise en compte des sensibilités individuelles en lien avec la médecine du travail, ...).

---

<sup>8</sup> Rapport d'expertise collective de l'Anses, publié en 2019, « Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des systèmes utilisant des diodes électroluminescentes (LED) »

En matière d'exposition, l'agence rappelle que très peu de données concernant les populations professionnelle et générale sont aujourd'hui disponibles. L'étude qu'elle a menée auprès d'un échantillon représentatif de la population générale a montré des temps moyens d'utilisation relativement importants, avec des séances de 1 heure en moyenne. Compte tenu de la variété des cadres d'utilisation de la RV/RA, il conviendrait de documenter l'évolution de l'usage et de l'exposition en intégrant, dans les grandes études sur les conditions de vie (par exemple *via* l'enquête « *Conditions de vie et les aspirations des Français* » du Crédoc, ou les enquêtes annuelles de la Dares « *Sumer*<sup>9</sup> » et « *Conditions de travail* »), l'exposition à la réalité virtuelle.

L'analyse des données disponibles montre que beaucoup d'aspects ne sont pas encore suffisamment investigués et documentés, notamment la compréhension des effets sur le long terme, liés à la répétition des expositions. L'Anses tient en effet à souligner que :

- la cybercinétose est l'effet sanitaire le mieux décrit dans la littérature scientifique – mis à part la question de sa persistance -, mais qu'il existe un manque de données patent pour d'autres effets sanitaires néfastes suspectés (effets sur le comportement et sur le développement) ;
- il est nécessaire de s'interroger sur les effets à long terme des expositions aux technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée, notamment ceux liés à la cybercinétose (effet sur le système visuel) et sur les effets liés à la répétition des expositions ;
- les études disponibles sont des études d'usage dont l'objet premier n'est pas l'évaluation des effets sur la santé ; il est donc important d'encourager les recherches qui auraient pour vocation première d'évaluer les effets néfastes possibles de la réalité virtuelle et/ou augmentée. Par ailleurs, il serait intéressant de mieux exploiter les études portant sur les effets sanitaires bénéfiques afin d'aboutir à une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents pour aider à la compréhension des effets sanitaires néfastes.

Par ailleurs, l'expertise a conduit à identifier des questionnements éthiques relatifs à l'usage des technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée. Trois familles d'effets posant des questions d'éthiques ont été identifiées :

- les effets sur l'utilisateur : atteinte à sa liberté et/ou à sa sécurité, protection de la vie privée, addiction, troubles identitaires, perturbation des inhibitions, désocialisation et divergences entre le jugement moral et les actes ;
- les effets sur autrui (par exemple : atteinte à la liberté d'autrui, atteinte à sa sécurité ou à son intégrité physique due à des comportements violents) ;
- les effets sur le plan sociétal : des pressions exercées sur les valeurs sociales, l'exacerbation d'une représentation paranoïde des interactions sociales, la « gamification » de la culture, l'existence d'inégalités sociales en matière de formation et d'outils à destination des professionnels de la santé et de soins aux patients et une instrumentalisation possible par des praticiens de santé des dispositifs de réalité virtuelle et/ou augmentée à des fins commerciales.

L'Anses estime donc nécessaire qu'une réflexion approfondie soit conduite par et avec les acteurs impliqués à propos des questions éthiques soulevées par l'exposition à la réalité virtuelle et/ou augmentée. Compte tenu de la diversité des usages (usages professionnels,

---

<sup>9</sup> Sumer : Surveillance médicale des expositions des salariés aux risques professionnels

dans le monde de la santé, du loisir, ...), d'une part, et des types d'acteurs concernés (éditeurs de logiciels, développeurs de matériels, concepteurs d'applications, ...), l'agence recommande la mise en place pour chaque catégorie professionnelle d'un cadre éthique explicite.

Au-delà des effets associés à l'usage des dispositifs de réalité virtuelle et/ou augmentée, les effets des outils numériques au sens large sur la santé apparaissent dépendants d'un grand nombre de facteurs et notamment des supports (téléphones, tablettes, etc.), des contenus, des moments, lieux et contextes d'usages (soir ou journée, en famille, accompagné ou seul, etc.), de la finalité de l'usage ou encore des vulnérabilités individuelles (sociales ou biologiques). Dans ce contexte, l'Anses a lancé un travail d'expertise sur les effets des outils numériques sur la santé des enfants et adolescents qui, par l'analyse de la littérature scientifique sur le sujet, apportera des éléments de réponse et des pistes pour mieux comprendre les effets néfastes éventuels, identifier les moyens de les prévenir et proposer des éléments d'encadrement de leurs usages.

Dr Roger Genet

---

**Effets sanitaires liés à une exposition aux technologies de  
réalité virtuelle et/ou augmentée**

---

Saisine n°2017-SA-0076

**RAPPORT  
d'expertise collective**

**CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements »  
Groupe de travail « Effets sanitaires de la réalité virtuelle et/ou augmentée »**

**Décembre 2020**

## Mots clés

---

Réalité virtuelle, réalité augmentée, casque de réalité virtuelle, cybercinétose, immersion, effets sanitaires

*Virtual reality, augmented reality, head mounted display, cybersickness, immersion, health effects*

## Présentation des intervenants

**PRÉAMBULE** : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

---

### GROUPE DE TRAVAIL

---

#### Président

Jean-Marie BURKHARDT, Directeur de Recherche au Laboratoire psychologie des comportements et des mobilités (LPC), Université Gustave Eiffel, spécialisé en ergonomie cognitive et en psychologie.

#### Membres

Francine BEHAR-COHEN, Directrice de recherche à l'Inserm UMR 1138, physiopathologie des maladies oculaires, Professeur en ophtalmologie, Université Paris-Descartes, Praticienne attachée à l'hôpital Hôtel Dieu.

Ouriel GRYNSPAN, Professeur à l'université Paris Sud, Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur, spécialisé en sciences cognitives et dans le domaine de l'autisme.

Evelyne KLINGER, Chercheuse associée à l'équipe Handicap, activité, cognition & santé (Inserm - Université de Bordeaux), spécialisée dans les domaines du handicap, de la rééducation et des innovations technologiques en réalité virtuelle.

Régis LOBJOIS, Chercheur au laboratoire perception, interaction, comportement et simulation (PICS-L), à l'Université Gustave Eiffel – spécialisé en psychologie cognitive et expérimentale.

Guillaume MOREAU, Professeur à l'École centrale de Nantes - Département informatique et mathématiques, spécialisé en environnements virtuels.

Olivier NANNIPIERI, Chercheur en sciences de l'information et de la communication à l'Université de Toulon - Laboratoire I3M information milieux médias médiations, spécialisé en épistémologie et en sciences humaines et sociales.

Alexis PALJIC, Chercheur à l'École Mines ParisTech, spécialisé en immersion et interaction en réalité virtuelle et en interfaçage visuel.

Pascale PIOLINO, Professeure à l'université Paris Descartes, spécialisée en neuropsychologie.

Hung THAI-VAN, Professeur des Universités - Praticien Hospitalier en Physiologie au Centre hospitalier universitaire de Lyon (UFR Lyon I – Lyon Sud).

Serge TISSERON, Médecin psychiatre.

Isabelle VIAUD-DELMON, Professeure en neurosciences de l'université Pierre et Marie Curie, Directrice de recherche, CNRS UMR 9912, équipe espaces acoustiques et cognitifs.

---

**RAPPORTEURS**

---

Mme Myriam DAVIDOVICI, maître de conférences en sciences économiques à Mines ParisTech.

---

**COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ**

---

Les travaux d'expertise, objets du présent rapport, ont été suivis et adoptés par le CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ».

**■ Mandat 2018-2021****Présidente**

Anne PEREIRA DE VASCONCELOS – Chargée de recherche, Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), Laboratoire de neurosciences cognitives et adaptatives - UMR 7364, CNRS – Université de Strasbourg.

**Membres**

Thomas CLAUDEPIERRE – Enseignant chercheur à l'université de Lorraine

Brigitte DEBUIRE – Professeur des universités émérite.

Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Thierry DOUKI – Chef de laboratoire / Ingénieur docteur en chimie, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Jack FALCÓN – Chercheur émérite du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), spécialisé en chronobiologie animale, Biologie des Organismes et Ecosystèmes Aquatiques (BOREA), CNRS 7208, Muséum National d'Histoire Naturelle

Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

François GAUDAIRE – Ingénieur au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) –

Irina GUSEVA-CANU - Professeur d'épidémiologie à l'université de Lausanne, Responsable du secteur académique, Département santé-travail-environnement, Unisanté, Suisse

Martine HOURS – Médecin épidémiologiste, Directeur de recherche à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar)

Chaker LARABI – Enseignant chercheur à l'université de Poitiers

Joël LELONG – Directeur adjoint de laboratoire / Docteur en physique à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Frédérique MOATI – Maître de conférences en biophysique et médecine nucléaire à l'Université Paris Sud XI / Praticien hospitalier / Radiopharmacienne / Biologiste, AP-HP Hôpital Bicêtre.

Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'ouest (UCO)

Fabien NDAGIJIMANA – Professeur des universités, Université Joseph Fourier, Grenoble

Anne-Lise PARADIS – Chargée de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Marie-Pierre ROLS – Directrice de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Valérie SIMONNEAUX – Chercheuse en neurobiologie des rythmes au Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de santé au travail Nord Picardie

Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.

Alicia TORRIGLIA – Médecin, Directeur de recherche en ophtalmologie, Centre de Recherches des Cordeliers, Institut National de la Santé et de la recherche médicale (Inserm).

Françoise VIÉNOT – Professeur émérite - Centre de Recherche sur la Conservation (CRC), Muséum national d'Histoire naturelle, CNRS, Ministère de la Culture, 36 rue Geoffroy Saint Hilaire, 75005 Paris, France

Catherine YARDIN – Professeur, chef de service, médecin biologiste à l'Hôpital Dupuytren, CHU de Limoges

---

## **PARTICIPATION ANSES**

---

### **Coordination scientifique**

Dina ATTIA – Chef de projets scientifiques, Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques – Anses.

Thomas BAYEUX – Chargé de projet, Mission « Sciences sociales, expertise et société » – Anses

### **Contribution scientifique**

Dina ATTIA – Chef de projets scientifiques, Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques – Anses.

Thomas BAYEUX – Chargé de projet, Mission « Sciences sociales, expertise et société » – Anses

Olivier MERCKEL – Chef de l'Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques – Anses.

Lucile MIGAULT – Chargée de projet scientifique, Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques – Anses.

Aurélie NIAUDET – Adjointe au chef de l'Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques – Anses.

### **Secrétariat administratif**

Mme Sophia SADDOKI

---

**AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES**

---

**Personnalités****Dr. Anne-Emmanuelle PRIOT et Dr. Pascaline NEVEU, le 16 octobre 2018**

Chercheuses dans le domaine des effets visuels et perceptifs des technologies de RV et/ou RA, Institut de recherche biomédicale des armées (IRBA).

**Pr. Benoît BARDY, le 08 janvier 2019**

Professeur en santé et sciences du mouvement, EuroMov, Université de Montpellier.

**Dr. Sylvette WIENER-VACHER, le 29 mai 2019**

Oto-rhino-laryngologiste, spécialisée dans le développement du système vestibulaire, Hôpital Robert-Debré à Paris 19<sup>ème</sup>.

**Pr. Philippe FUCHS, le 09 novembre 2019**

Chercheur dans le domaine de la robotique et de la réalité virtuelle, Professeur-retraité de réalité virtuelle à Mines ParisTech.

**Organismes****Syndicat des éditeurs de logiciels de loisirs (SELL), le 18 juin 2019**

Emmanuel MARTIN : Président.

Julien MOREL : conseiller en affaires publiques.

Camille ADAM : chargée de mission.

# SOMMAIRE

<b>Présentation des intervenants.....</b>	<b>3</b>
<b>Sigles et abréviations .....</b>	<b>11</b>
<b>Terminologie .....</b>	<b>13</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>13</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>14</b>
<b>1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise.....</b>	<b>18</b>
1.1 Contexte de l'autosaisine .....	18
1.2 Objet de l'autosaisine .....	18
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation.....	19
1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts .....	19
<b>2 Panorama de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée .....</b>	<b>20</b>
2.1 Introduction et terminologie.....	20
2.1.1 Réalité virtuelle, réalité augmentée, réalité mixte.....	20
2.1.2 Présence – Immersion – Exposition .....	21
2.2 Classification des applications et caractéristiques des contextes d'utilisation.....	23
2.2.1 Principaux domaines d'application, caractéristiques fonctionnelles et populations concernées.....	23
2.2.2 Configurations mono ou multi-utilisateur, en colocalisé ou à distance .....	27
2.2.3 Configurations des espaces physiques et virtuels d'interaction .....	27
2.2.4 Existence d'une organisation, de mesures de prévention et de personnel formé pour encadrer l'utilisation.....	28
2.3 Dispositifs et interfaces .....	28
2.3.1 Interfaces visuelles .....	28
2.3.2 Dispositifs auditifs .....	30
2.3.3 Interfaces haptiques.....	33
2.4 Contenu des environnements de réalité virtuelle et augmentée .....	39
2.4.1 Le contenu en tant que stimuli objectivement perceptibles : composants de la scène, schéma narratif et représentation de l'utilisateur.....	39
2.4.2 Le contenu sous l'angle des règles d'utilisation et d'interaction proposées à l'utilisateur. ....	40
2.4.3 Le contenu sous l'angle de l'expérience vécue par l'utilisateur.....	41
<b>3 Législation applicable à la réalité virtuelle et/ou augmentée.....</b>	<b>42</b>
3.1 Protection de la propriété intellectuelle.....	42
3.2 Sécurité des produits, protection des utilisateurs et responsabilité.....	42

<b>3.3</b>	<b>La réglementation sur la protection de la vie privée et la sécurité des données personnelles.....</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>Immersion et interaction dans le monde virtuel et la réalité augmentée .</b>	<b>44</b>
<b>4.1</b>	<b>Le système neurovégétatif : dualité et complémentarité de deux sous-systèmes.....</b>	<b>44</b>
4.1.1	Organisation anatomique.....	44
4.1.2	Neuromédiateurs et récepteurs .....	45
4.1.3	L'hypothalamus et le cortex limbique.....	46
4.1.4	Effets physiologiques .....	47
4.1.5	Dysfonctionnements .....	50
<b>4.2</b>	<b>Perception visuelle.....</b>	<b>51</b>
4.2.1	Rappels sur l'anatomie de l'œil humain.....	51
4.2.2	La vision binoculaire .....	52
4.2.3	Développement visuomoteur chez l'enfant : développement visuel et perception spatiale .....	54
<b>4.3</b>	<b>Perception auditive .....</b>	<b>57</b>
4.3.1	Description générale de l'audition.....	57
4.3.2	Description de la notion de seuil perceptif et de la perception de l'intensité sonore .....	59
<b>4.4</b>	<b>Perception tactile, haptique et kinesthésie .....</b>	<b>60</b>
<b>4.5</b>	<b>Perception vestibulaire.....</b>	<b>63</b>
4.5.1	Embryologie .....	63
4.5.2	Fonctions du système vestibulaire.....	64
4.5.3	Rôle du système vestibulaire dans le développement .....	66
<b>4.6</b>	<b>Perception olfactive .....</b>	<b>67</b>
<b>4.7</b>	<b>Description des conflits « intra-sensoriels » en conditions d'immersion.....</b>	<b>67</b>
4.7.1	Conflits spécifiques au système visuel .....	67
<b>4.8</b>	<b>Description des incohérences visuo-vestibulaires en immersion.....</b>	<b>71</b>
4.8.1	Définition du conflit visuo-vestibulaire.....	71
4.8.2	Effet de la stimulation optocinétique sur la posture .....	71
4.8.3	Mise en jeu du réflexe vestibulo-oculaire en immersion.....	72
4.8.4	Susceptibilité individuelle à la cybercinétose.....	74
<b>5</b>	<b>Effets sanitaires de la réalité virtuelle et/ou de la réalité augmentée .....</b>	<b>75</b>
<b>5.1</b>	<b>Méthode d'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires des technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée.....</b>	<b>75</b>
5.1.1	Revue de la littérature scientifique.....	75
5.1.2	Une analyse collective .....	76
5.1.3	Critères de qualité retenus pour l'analyse des études.....	77
5.1.4	Présentation des résultats issus de la revue de la littérature .....	77
5.1.5	Évaluation du niveau de preuve d'un effet sanitaire ou biologique donné .....	77
<b>5.2</b>	<b>Effets liés à l'ergonomie des dispositifs physiques et à l'environnement dans lequel prend place leur utilisation.....</b>	<b>81</b>
5.2.1	Blessures, traumatismes et pathologies physiques résultant de l'usage de RA et RV .....	81
5.2.2	Risques liés à l'ergonomie des dispositifs d'affichage.....	82
5.2.3	Évaluation du niveau de preuve .....	84
<b>5.3</b>	<b>Cybercinétose .....</b>	<b>85</b>

5.3.1	Qu'est ce que la cybercinétose ? .....	85
5.3.2	La cybercinétose évaluée par des questionnaires .....	88
5.3.3	Revue des études utilisant des questionnaires d'auto et hétéro-évaluation de la cybercinétose .....	93
5.3.4	Évaluation de la cybercinétose avec des mesures physiologiques.....	126
5.3.5	Effets sur la stabilité posturale.....	144
5.3.6	Effets visuels.....	161
5.3.7	Évaluation du niveau de preuve .....	165
<b>5.4</b>	<b>Post-effets : effets persistants ou consécutifs à l'exposition.....</b>	<b>166</b>
5.4.1	Introduction .....	166
5.4.2	Perturbation de l'habileté manuelle.....	166
5.4.3	Perturbation de l'orientation du corps .....	169
5.4.4	Effets sur la posture, la marche, le contrôle moteur .....	170
5.4.5	Temps de réaction .....	171
5.4.6	Persistance de troubles visuels ou posturaux chez l'enfant .....	172
5.4.7	Persistance de la cybercinétose et phénomène d'habituation .....	172
5.4.8	Évaluation du niveau de preuve .....	172
<b>5.5</b>	<b>Effets psychologiques et psychosociaux.....</b>	<b>174</b>
5.5.1	Idéation paranoïaque .....	174
5.5.2	Troubles dissociatifs .....	175
5.5.3	Contenus violents .....	176
5.5.4	Evaluation du niveau de preuve .....	176
<b>5.6</b>	<b>Avatars, rétroactions et représentations de l'utilisateur .....</b>	<b>177</b>
5.6.1	Introduction .....	177
5.6.2	Les avatars : représentation de soi pour soi versus pour les autres, selon des formes variées.....	177
5.6.3	Revue des études sur les avatars .....	179
5.6.4	Revue sur les effets négatifs potentiels des caractéristiques formelles des avatars .....	181
5.6.5	Conclusion .....	185
<b>5.7</b>	<b>Effets liés aux agents physiques émis par les dispositifs de réalité virtuelle (casques et téléphones).....</b>	<b>187</b>
5.7.1	Champs électromagnétiques .....	187
5.7.2	Lumière bleue .....	187
5.7.3	Modulation temporelle de la lumière.....	188
5.7.4	Bruit.....	188
<b>5.8</b>	<b>Autres effets .....</b>	<b>189</b>
5.8.1	Effets sur le développement .....	189
5.8.2	Effets neurologiques néfastes .....	189
<b>6</b>	<b>Caractérisation de l'exposition de la population générale et des travailleurs à la réalité virtuelle .....</b>	<b>190</b>
<b>6.1</b>	<b>Caractérisation des usages et de l'exposition aux technologies de réalité virtuelle, augmentée ou mixte.....</b>	<b>190</b>
6.1.1	Contexte et objectifs .....	190
6.1.2	Méthode .....	190
6.1.3	Résultats des études adoptant une approche qualitative : illustrer et rendre visible la variété et l'étendue des types et situations concrètes d'usages et d'exposition .....	191
6.1.4	Résultats des enquêtes par échantillonnage.....	197
6.1.5	Conclusions .....	211

<b>6.2</b>	<b>Caractérisation des rayonnements émis par les casques de réalité virtuelle.....</b>	<b>212</b>
6.2.1	Introduction .....	212
6.2.2	Sélection des casques et <i>smartphones</i> , réalisation des mesures.....	212
6.2.3	Contenus utilisés au cours des essais.....	212
6.2.4	Résultats .....	213
<b>7</b>	<b>Aspects éthiques liés à l'usage de la réalité virtuelle et/ou augmentée .</b>	<b>216</b>
<b>7.1</b>	<b>Objectifs, méthode et cadre de travail.....</b>	<b>216</b>
7.1.1	Rappel des objectifs.....	216
7.1.2	Méthode de travail .....	216
7.1.3	Cadre : éthique, droit et morale .....	219
<b>7.2</b>	<b>Valeurs mises en jeu.....</b>	<b>222</b>
7.2.1	Les effets problématiques potentiels sur l'utilisateur .....	223
7.2.2	Les effets néfastes potentiels sur autrui .....	227
7.2.3	Les effets problématiques potentiels sur la société .....	229
<b>7.3</b>	<b>Prospective.....</b>	<b>231</b>
7.3.1	Atteinte à la vie privée et à la propriété intellectuelle et industrielle .....	232
7.3.2	Nécessité d'une approche écologique des dispositifs de réalité virtuelle et augmentée .....	232
7.3.3	Effets problématiques potentiels sur les comportements prosociaux : exercer une vigilance raisonnable .....	234
7.3.4	Le cas de dispositifs éthiquement sensibles par nature : le secteur de la santé.....	234
7.3.5	De la nécessité d'un cadre éthique pour les professionnels .....	235
<b>7.4</b>	<b>Conclusions.....</b>	<b>236</b>
<b>8</b>	<b>Conclusions du groupe de travail.....</b>	<b>237</b>
<b>9</b>	<b>Bibliographie.....</b>	<b>247</b>
<b>Annexe 1</b>	<b>: Lettre de saisine.....</b>	<b>267</b>
<b>Annexe 2</b>	<b>: Techniques et variables récoltées lors des mesures physiologiques liées à la cybercinétose .....</b>	<b>269</b>
<b>Annexe 3</b>	<b>: Synthèse des résultats des mesures physiologiques liées à la cybercinétose .....</b>	<b>280</b>
<b>Annexe 4</b>	<b>: Conditions d'exposition dans les études portant sur la stabilité posturale.....</b>	<b>289</b>
<b>Annexe 5</b>	<b>: Résultats des mesures sur les rayonnements émis par des visiocasques .....</b>	<b>292</b>

## Sigles et abréviations

### Questionnaires utilisés :

- **MSSQ** (*Motion Sickness Susceptibility Questionnaire*) [Golding, 1998] : évaluation du *Motion Sickness* basée sur expérience antérieure (MSSQA : enfance et MSSQB : 10 dernières années).
- **SSQ** (*Simulation Sickness Questionnaire*) [Kennedy *et al.*, 1993].
- **MSAQ** (*Motion Sickness Assessment Questionnaire*) [Gianaros *et al.*, 2001] : de 1 (pas du tout) à 9 (sévère). Catégorisation des troubles :
  - gastro-intestinal (sensibilité de l'estomac, nausée, vomissement) ;
  - central (évanouissement, légère griserie, désorientation, vertiges et tournoiement) ;
  - périphérique (sudation, inconfort lié à la température) ;
  - sopite (ennui, somnolence, fatigue, inquiétude).
- **LMS** (*Level on Motion Sickness*) : de 0 (pas d'effet) à 10 (effet sévère)
- **CSV** (CS Verbal) sur échelle : 1 (pas de symptômes), 2 (symptômes moyens mais pas de nausée), 3 (nausée légère) et 4 (nausée modérée)
- **VRN** (*Verbal rating of nausea*) : de 0 (pas d'effet) à 9 (sur le point de vomir)
- **SES** (*Self Efficacy Score*) : évaluation de la capacité à reconnaître le mal de mer sur une échelle de Likert à 6 niveaux.
- **SRS** (*Self Reporting Sickness*) : de 1 à 4
- **ITQ** : *Immersive Tendency Questionnaire* [Witmer & Singer, 1996]
- **Anxiety scale** : échelle de 0 à 6
- **Malaise scale** [Regan & Ramsey, 1996] : échelle d'évaluation des malaises de 0 (pas de symptôme) à 3 (nausée modérée)

### Variables physiologiques :

- **FC** (Fréquence Cardiaque)
- **PC** (Période cardiaque ou intervalle RR)
- **VFC** ou **HRV** (Variabilité de la Fréquence Cardiaque – *Heart Rate Variability*)
- **ECG** (Électrocardiogramme)
- **SDRR** (Déviation standard des intervalles RR)
- **RMSSD** (Racine carrée de la moyenne des carrés de la différence des intervalles successifs RR)
- **FR** (Fréquence respiratoire)
- **SCL** (Conductance de la peau – *Skin Conductance Level*)
- Température de la peau
- **EGG** (Électrogastrogramme)
- **TAG** (Tachyrythmie Gastrique), **TG** (Tachygastrie), **BG** (Bradygastrie)
- **EOG** (Électrooculogramme)
- **EEG** (Électroencéphalogramme)
- Spectre de la puissance EEG
- **PPG** (Photopléthysmogramme)
- Pneumogramme respiratoire
- Fréquence du clignement des yeux
- **VEMP** (*Vestibular Evoked Myogenic Potential*) ou PEOM (potentiels évoqués otolithiques myogénique)

### Autres tests :

- **TNO** (Test de la vision stéréoscopique) [Walvaren, 1973].
- **DLRT** (*Deary-Liewald Reaction Test*) [Deary & Liewald, 2010].

**Paramètres physiologiques mesurés :**

Tachygastrie	Activité gastrique accélérée
Bradygastrie	Activité gastrique trop lente
Fréquence cardiaque	Nombre de battements du cœur par minute
Fréquence respiratoire	Nombre de cycles respiratoires (inspiration et expiration) par unité de temps
HRV	<i>Heart Rate Variability</i> Ou degré de fluctuation de la durée des contractions du cœur, ou de l'intervalle entre deux contractions.
R	Pic de pulsation cardiaque
Intervalle RR	Temps entre 2 battements successifs du cœur => période cardiaque
SDRR	Déviations standard des intervalles RR
RMSSD	Racine carrée de la moyenne des carrés de la différence des intervalles successifs RR
Photopléthysmographie	Technique d'exploration fonctionnelle vasculaire non invasive qui permet la mesure de la fréquence cardiaque : elle consiste à mettre le doigt dans une pince qui contient au-dessus deux LED (deux diodes électroluminescentes Rouge et Infrarouge) qui émettent la lumière vers le doigt sur lequel on applique une vasodilatation, ainsi qu'un photodétecteur placé au-dessous du doigt pour recevoir la lumière traversée.  Le photopléthysmogramme (PPG) est un signal optique acquis à partir de l'oxymètre de pouls, dont l'usage principal consiste à mesurer la saturation en oxygène ; cela permet donc de suivre en temps réel l'évolution du taux en oxygène dans le sang.
Pneumogramme respiratoire	Tracé des mouvements respiratoires
VEMP	<i>Vestibular Evoked Myogenic Potential</i> Le VEMP reflète l'activité d'une portion du système vestibulaire qui est élicité par des sons de haute intensité et détecté comme un changement de potentiel dans le muscle
PIVC	cortex vestibulaire pariéto-insulaire
Ratio d'asymétrie	
EEG	Les rythmes cérébraux observés en EEG contribuent aux différentes fonctions cognitives en fonction de leur localisation, leurs caractéristiques d'amplitude, de fréquence, de phase et de cohérence.  Le rythme bêta (13-30 Hz) est observé chez 22 % des sujets sains. De topographie frontale et rolandique, il est modulé par les mouvements, et est modifié au cours des tâches cognitives requérant une interaction sensori-motrice. Il s'agit d'un rythme d'éveil associé à l'activité intellectuelle, l'attention, la concentration sur l'environnement, et intervient dans l'encodage et la consolidation d'informations sensorielles.  Puissance relative : Lorsque la puissance d'une bande de fréquence donnée est rapportée à la somme des puissances mesurées sur l'ensemble du spectre fréquentiel, on parle de puissance relative.

## Terminologie

**Contenu** : ensemble des stimuli et des actions permises par le dispositif de réalité virtuelle ou réalité augmentée pouvant être traités par l'utilisateur sur les plans cognitif, affectif et conatif. Le contenu subsume l'environnement, les interactions possibles *via* les interfaces comportementales, la tâche à réaliser et les pratiques des usagers qu'elles soient conformes ou non aux règles d'utilisation du dispositif.

**Interfaces comportementales** : combinaison des règles d'utilisation du dispositif et des systèmes techniques et informatiques permettant de générer l'ensemble des stimuli. Par leur biais, l'utilisateur peut réaliser les tâches visant la finalité du dispositif.

**Environnement** : ensemble des éléments perçus aux niveaux extéroceptif, proprioceptif et intéroceptifs par l'utilisateur.

**Interactions humaines** : action réciproque qu'exercent entre eux des êtres, des personnes et des groupes.

**Interaction Humain-Environnement Virtuel/Augmenté** : ensemble des influences (actions, mouvements...) réciproques entre l'utilisateur et l'environnement permises par le dispositif *via* les interfaces comportementales.

**Pratiques des usagers** : manière dont les usagers s'approprient le contenu généré par le dispositif, soit en se conformant à ses règles et à sa finalité, soit en en détournant l'usage.

**Présence – Immersion - Exposition** : voir chapitre 2.1.2.

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification fonctionnelle et caractérisation des applications de réalité virtuelle ou augmentée.	25
Tableau 2 : Effets des stimulations de l'acétylcholine sur les récepteurs muscariniques des principaux organes cibles.	48
Tableau 3 : Effets de la stimulation des récepteurs catécholaminergiques.	48
Tableau 4 : Signes cliniques liés au dysfonctionnement du système neurovégétatif.	50
Tableau 5 : Maturation des globes oculaires.	55
Tableau 6 : Emmétropisation à la fin de la deuxième année.	55
Tableau 7 : Développement de l'accommodation, de la binocularité et de la stéréoaocuité.	55
Tableau 8 : Maturation des voies visuelles.	56
Tableau 9 : Seuils relatifs de perception, en moyenne sur différents membres, du mouvement, de la position et de la force.	63
Tableau 10 : Mesures effectuées (n=60). <i>Self Report Sickness Ratings</i> (SS). <i>Diaphragmatic Breathing</i> (DB).	142
Tableau 11 : Synthèse de la littérature sur les post-effets.	173
Tableau 12 : Interfaces visuelles mobilisées dans l'ensemble des cas d'usage éducatifs recensés.	193
Tableau 13 : Répartition par âges des adultes ayant déjà eu l'expérience de la réalité virtuelle ou augmentée.	199

Tableau 14 : Répartition par âges des enfants ayant déjà eu l'expérience de la réalité virtuelle ou augmentée.	200
Tableau 15 : Répartition des usagers adultes par type d'usage et type de technologie impliquée (effectif et %).	201
Tableau 16 : Fréquence d'utilisation des applications de RA ou RV par les adultes utilisateurs (N = 693).	201
Tableau 17 : Fréquence d'utilisation des applications de RA ou RV par les enfants utilisateurs (N=122).	202
Tableau 18 : Fréquence d'utilisation des applications de RA ou RV dans le domaine professionnel.	203
Tableau 19 : Durées d'utilisation selon le type d'usage et la population (réponses à la question « Pour chacune de ces formes de RV/RA, quelle est en moyenne votre durée d'utilisation/de pratique ? »)	204
Tableau 20 : Répartition en quartiles des durées d'utilisation en minutes (durée la plus haute déclarée) selon le type d'usage et la population (Réponses à la question « Pour chacune de ces formes de RV/RA, quelle est en moyenne votre durée d'utilisation/de pratique ? »).	204
Tableau 21 : Types de supports de RA ou de RV utilisés par les adultes (usages professionnels ou personnels) et les enfants.	206
Tableau 22 : Proportion d'enfants ayant expérimenté au moins une fois les applications de RA ou RV par tranches d'âges (N = 122).	207
Tableau 23 : Nombre de symptômes rapportés par les adultes et les enfants sur la base de la présentation d'une liste détaillée.	208
Tableau 24 : Types de symptômes ressentis par les utilisateurs selon le type d'usage (personnel vs professionnel) et la population (adultes vs enfants).	209
Tableau 25 : Interfaces citées comme associées à des symptômes chez les adultes et enfants ayant déclaré en avoir ressenti.	210
Tableau 26 : Requête bibliographique Scopus et Cairn - éthique et réalité virtuelle / réalité augmentée (09/01/2019).	217
Tableau 27 : Grille d'analyse des publications d'intérêt concernant les enjeux éthiques de la réalité virtuelle et réalité augmentée	218
Tableau 28 : Mesures physiologiques : techniques et variables récoltées ou extraites dans les publications.	269
Tableau 29 : Synthèse des résultats des mesures physiologiques liées à la cybercinétose.	280
Tableau 30 : Détail des conditions d'exposition à la réalité virtuelle des différentes études retenues.	289

## Liste des figures

Figure 1 : Schéma du continuum réel – virtuel inspiré et adapté de Milgram <i>et al.</i> , <i>op.cit.</i> )	20
Figure 2 : Classes d'applications selon la configuration d'utilisateurs et le partage ou non d'un même espace.	27
Figure 3 : Gants à retour d'efforts en forces internes.	34
Figure 4 : Combinaison tactile.	35
Figure 5 : Exemple de dispositif d'affichage tactile par des picots.	36
Figure 6 : <i>LapSim® Haptic System</i> .	38
Figure 7 : <i>Armeo®Spring</i> .	38

Figure 8 : Système sympathique et parasympathique _____	45
Figure 9 : Rôle de l'hypothalamus. _____	47
Figure 10 : Fonctions du système nerveux autonome ou SNA. _____	47
Figure 11 : Anatomie de l'œil humain. _____	51
Figure 12 : Objet observé et points rétinien correspondants. _____	52
Figure 13 : Diplopie et confusion _____	53
Figure 14 : Âges moyens des périodes de maturation visuelle. _____	57
Figure 15 : Compartiments de l'appareil auditif périphérique. _____	57
Figure 16 : Différence physique entre son grave et son aigu pour une même amplitude de vibration. _____	58
Figure 17 : Représentation des voies auditives afférentes. _____	59
Figure 18 : Champ auditif humain. _____	60
Figure 19 : Représentation d'un audiogramme en pratique clinique. _____	60
Figure 20 : Les différents types de récepteurs cutanés responsables des sensations tactiles. _____	62
Figure 21 : L'équilibre est le résultat d'une intégration d'informations multi sensorielles de mouvements et de position : visuelles, vestibulaires et somesthésiques (sensibilité superficielle et profonde). _____	64
Figure 22 : Schéma du système vestibulaire et de ses composantes. _____	65
Figure 23 : Rôle des informations vestibulaires. _____	66
Figure 24 : Distances d'accommodation et de vergence en situation naturelle (à gauche) et en situation d'interfaçage 3Ds (à droite). _____	68
Figure 25 : Disparité verticale. _____	69
Figure 26 : Représentation schématique de l'efficacité des neuf indices principaux de perception de la profondeur en fonction de la distance par rapport à l'observateur. _____	70
Figure 27 : Prototype de rééducation vestibulaire en immersion. _____	71
Figure 28 : Stimulation optocinétique circulaire. _____	72
Figure 29 : Réflexe vestibulo-oculaire selon Mikael Häggström. _____	73
Figure 30 : Vitesse d'oscillation (mm/sec) du centre de pression sur plate-forme dynamique de force en réponse à une stimulation optocinétique rotatoire en fonction de l'âge (n=156 enfants, <i>sex ratio</i> =1). _____	74
Figure 31 : Logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études. _____	78
Figure 32 : Matrice de croisement des éléments de preuve chez l'humain et sur des modèles. _____	79
Figure 33 : Évolution du score FMS (min : 0, max : 20) au court d'une exposition de 19 minutes à un stimulus visuel en mouvement présenté sur grand écran. _____	90
Figure 34 : A : les 4 modes de navigation testés - B : différences dans les scores au SSQ avant et après exposition, selon le mode de navigation et le sexe (à gauche : femmes, n=10 ; à droite : hommes, n=10). _____	94
Figure 35 : Différents champs de profondeur dans l'environnement réel de l'utilisateur (couleur orange) et d'autres champs de profondeur grâce à des méthode de locomotion virtuelle. _____	95
Figure 36 : Score de <i>Motion Sickness</i> (MS) pour les jeunes (gauche) et les adultes (droite). _____	97
Figure 37 : Le synoptère utilisé dans l'étude de Keshavarz <i>et al.</i> , 2011. _____	99
Figure 38 : Illustration des scores au SSQ sur 53 participants, dans chacune des 3 conditions de visualisation. _____	100

Figure 39 : Score SSQ total selon les différentes sessions de test pour les 3 modes de navigation testés.	102
Figure 40 : Scores au SSQ (total) dans les deux conditions de visualisation de l'expérience.	103
Figure 41 : Scores FMS selon le sexe, toutes conditions confondu.	115
Figure 42 : Scores au SSQ avant et après exposition chez les femmes (N = 73) et chez les hommes (N = 97).	116
Figure 43 : Symptômes de cybercinétose avant et après exposition à la RV.	120
Figure 44 : Scores au FMS (à gauche) et au SSQ (à droite) selon l'expérience de pratique de jeu vidéo et la condition expérimentale (sans ou avec fixation sur le siège).	124
Figure 45 : Scores par cluster au SSQ (version pédiatrique) avant et après exposition à la réalité virtuelle.	125
Figure 46 : Moyenne des scores aux 3 clusters du SSQ dans un groupe d'enfants de 10-12 ans (N=30) pendant et à l'issue de 5 jours d'exposition à la RV avec un visiocasque.	126
Figure 47 : Exemple de déroulé de la procédure ou d'une séquence de la procédure.	128
Figure 48 : Exemples de captures d'écran des simulations <i>Parrot</i> (A) et <i>Helix</i> (B).	130
Figure 49 : Symptômes subjectifs de cybercinétose.	132
Figure 50 : Taux de nausées, score MSSQ et durée de session.	133
Figure 51 : Changements des paramètres physiologiques enregistrés au cours de la session de réalité virtuelle le premier jour (n=14).	134
Figure 52 : Inverser la direction du trajet virtuel prolonge le temps de tolérance et réduit les scores temps réel des nausées.	135
Figure 53 : Modifications des paramètres physiologiques pendant les trajets virtuels en avant et en arrière.	136
Figure 54 : temps de tolérance et indice de nausée	137
Figure 55 : Conductance cutanée tonique (SCL) dans la situation de référence ( <i>baseline</i> ) et au point de nausée maximale.	137
Figure 56 : Système expérimental et résultats.	138
Figure 57 : Moyenne des <i>Self Efficacy Scores</i> (de 1 à 4) en fonction des 2 conditions.	142
Figure 58 : Moyenne de la fréquence respiratoire pendant l'expérience RV selon les conditions.	142
Figure 59 : Illustration d'un écran semi-cylindrique offrant 180° de champ visuel horizontal placé face à un tapis roulant.	145
Figure 60 : Scores au SSQ pour les adultes (à gauche) et les enfants de 11 ans (à droite).	147
Figure 61 : Score moyen aux trois sous-échelles (nausée, oculomoteur, désorientation) et score total au SSQ.	148
Figure 62 : Variabilité des mouvements de la tête (à gauche) et du torse (à droite) dans l'axe antéropostérieur (AP).	148
Figure 63 : Variabilité des mouvements de la tête dans l'axe antéropostérieur de participants adultes et enfants.	149
Figure 64 : Aire de mouvement (à gauche) et variabilité des mouvements (à droite) dans l'axe antéropostérieur de participants adultes.	153
Figure 65 : Pourcentage de temps pendant lequel les sujets ne bougent pas la tête en réalité virtuelle, en fonction de l'intensité de la cybercinétose et de l'essai.	154

Figure 66 : Mouvements du centre de gravité (à gauche) et de la tête (à droite) avant et après exposition en fonction de la modalité d'interaction. _____	155
Figure 67 : Réponse posturale dans l'axe antéropostérieur (à gauche) et latéral (à droite) pour une femme (en haut) et un homme (en bas). _____	156
Figure 68 : Nombre moyen de « presque » chute par participant au cours de chacune des expositions, pour les hommes et les femmes. _____	157
Figure 69 : Ajustements posturaux. _____	158
Figure 70 : Amplitude des mouvements du centre des pressions au repos. _____	159
Figure 71 : Tâche de pointage sans modification de la taille du bras (haut) et avec modification, allongement du bras de 30 cm vers l'avant) impliquant une nouvelle congruence visuo-proprioceptive (bas). ____	167
Figure 72 : Illustration de l'étude sur la recalibration visuo-vestibulaire. _____	169
Figure 73 : Congruence visuo proprioceptive. _____	170
Figure 74 : Environnement d'exposition provocateur de cybercinétose : les montagnes russes. _____	171
Figure 75 : Exemples d'avatar. _____	178
Figure 76 : pictogramme et avertissement à apposer sur l'appareil, l'emballage ou la notice des appareils. _____	189
Figure 77 : une montagne russe en dynamique. _____	213
Figure 78 : modélisation de la gare RER Saint-Michel en 3D. _____	213
Figure 79 : Sélection des publications d'intérêt concernant l'éthique. _____	217

# 1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

## 1.1 Contexte de l'autosaisine

Le développement rapide des nouvelles technologies, la diffusion de l'offre grand public d'articles de consommation recourant aux techniques de réalité virtuelle et de réalité augmentée, et le recours en augmentation à ces technologies dans le monde du travail s'accompagnent d'interrogations quant à leurs éventuels effets sur la santé. Ces interrogations étaient déjà soulevées dans les conclusions de l'avis de l'Anses publié en 2014 sur les effets sanitaires des technologies audiovisuelles en 3D stéréoscopique (3Ds), appelant à la réalisation d'un travail d'expertise spécifique sur ces questions. L'Anses s'est saisie afin d'évaluer les effets sanitaires éventuels (incluant la santé mentale et les conséquences sociales et familiales) liés à une exposition aux technologies de réalité augmentée et de réalité virtuelle, en milieu de travail et en population générale.

Les technologies de réalité virtuelle et de réalité augmentée sont utilisées depuis quelques décennies en milieu de travail, et ce dans différents secteurs d'activité (secteur automobile, santé, etc.). La mise sur le marché de nouvelles technologies dans le domaine de la réalité virtuelle a connu dans la période récente un nouvel essor avec l'augmentation de l'offre et la diffusion rapide de visiocasques destinés au grand public. La plupart des fabricants de visiocasques mettent en garde les utilisateurs, dans les notices d'emploi, contre de possibles situations d'inconfort (fatigue visuelle, nausées, étourdissements, etc.) et déconseillent même l'usage de ces dispositifs par les enfants de moins de 12 ou 13 ans, sans pour autant accompagner ces mises en garde d'un argumentaire scientifique. La question des effets potentiels de ces nouvelles technologies sur la santé des usagers et de l'existence possible de populations sensibles est ainsi soulevée, notamment en raison des fortes disparités interindividuelles en matière de capacités sensori-motrices (en particulier pour ce qui concerne la qualité de la vision stéréoscopique).

L'Anses, dans son rapport d'expertise sur les effets sanitaires des technologies audiovisuelles en 3D stéréoscopique (3Ds), posait la question des effets liés aux incohérences sensori-motrices liées à l'utilisation des visiocasques. En effet, certaines études scientifiques rapportent de possibles symptômes lors de l'usage de visiocasques, comme des nausées et vertiges, liés à l'incohérence entre les informations sensorielles émanant d'une part du système visuel et d'autre part de la proprioception, mais aussi des maux de tête, un inconfort visuel ou de la fatigue visuelle et/ou générale, etc. Ces symptômes pourraient apparaître au cours de l'utilisation des visiocasques, mais aussi plusieurs heures, voire quelques jours après l'exposition. D'autres interrogations méritent d'être explorées, comme d'éventuelles atteintes neurocognitives, des effets psychosociaux et comportementaux, la sécurité photobiologique relative à une exposition rapprochée à la lumière bleue émise par les écrans des visiocasques, ou encore la sécurité physique des utilisateurs.

## 1.2 Objet de l'autosaisine

Les travaux de l'agence ont visé à identifier et caractériser l'existence d'éventuels effets sanitaires liés à une exposition à la réalité virtuelle et à la réalité augmentée, et à en évaluer le niveau de preuve associé. Parallèlement à l'étude des effets sanitaires, et constatant le peu de données disponibles sur l'exposition à cette technologie, l'expertise s'est également focalisée sur la documentation des expositions de la population professionnelle et générale à la réalité virtuelle et augmentée.

Les travaux d'expertise ont porté en particulier sur :

- le recensement et la description des technologies et supports de réalité virtuelle et de réalité augmentée mis sur le marché utilisés en milieu de travail ou accessibles au grand public ;
- la caractérisation des modalités d'utilisation et d'expositions à ces technologies ;

- l'identification et la description des effets sanitaires potentiels liés à une exposition à la réalité virtuelle et à la réalité augmentée.

En fonction de la disponibilité des données, l'Agence a tenté d'évaluer le niveau de preuve associé aux effets identifiés, en décrivant si possible les mécanismes biologiques sous-jacents. La faisabilité d'une évaluation des risques sanitaires que ces nouvelles technologies pourraient induire au regard des expositions documentées a également été étudiée.

### 1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au groupe de travail (GT) intitulé « effets sanitaires des technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée », rattaché au comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » l'instruction de cette saisine. La première réunion du groupe de travail s'est tenue en mars 2017, puis 27 réunions se sont tenues, jusqu'à la dernière, organisée le 7 décembre 2020.

Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Cette expertise s'est principalement appuyée sur la synthèse et l'analyse critique des données publiées dans la littérature scientifique et grise (articles scientifiques, rapports, etc.).

Le groupe de travail a également auditionné des experts et personnalités extérieures susceptibles d'apporter des informations et des données complémentaires utiles pour l'expertise (contexte, effets sanitaires, usages etc.).

Une convention de recherche et de développement (CRD) a été établie entre l'Anses et le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) afin de caractériser l'exposition de la population aux champs électromagnétiques produits par les visiocasques et à la modulation temporelle de la lumière émise par leurs écrans.

Un sondage réalisé par OpinionWay a été commandé afin d'obtenir des données d'exposition de la population générale à la réalité virtuelle et à la réalité augmentée.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été adoptés par le CES le 11 décembre 2020.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence et traçabilité.

### 1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet de l'agence ([www.anses.fr](http://www.anses.fr)).

## 2 Panorama de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée

### 2.1 Introduction et terminologie

#### 2.1.1 Réalité virtuelle, réalité augmentée, réalité mixte

Les termes « réalité virtuelle » (RV) se réfèrent aux recherches et aux applications nées au début des années 1970, dont l'une des principales préoccupations est l'obtention d'une immersion et d'une interaction avec des contenus numériques, par l'intermédiaire de périphériques et d'interfaces multimodales de perception, de navigation et d'interaction en trois dimensions (souris, joysticks, manettes, casques ou écrans 2D/3D, gants de manipulation, systèmes avec retours d'effort, etc.) et/ou de communications à distance médiées comme dans le cas des applications multi-utilisateurs (e.g. MUD- *Multi-User Dungeons/Domains*, MOO- *MUD Object-Oriented*, MMORPG- *Massively multiplayer online role-playing games*, etc.). Dans ce contexte, la notion d'« avatar » désigne la représentation de soi à l'intérieur du monde numérique créé, cette représentation étant le plus souvent anthropomorphe.

Les termes « réalité augmentée » (RA) ont été introduits plus récemment, au début des années 1990, afin de désigner une forme spécifique d'interaction humain-machine (IHM) fondée sur l'association sémantique et spatiale d'objets réels et d'objets générés par un ordinateur. L'idée d'augmentation renvoie ainsi à l'enrichissement de l'information véhiculée par les objets et l'environnement réels, au moyen du virtuel. Les technologies de RA, à la différence de celles de réalité virtuelle, visent l'intégration d'éléments simulés dans le monde physique réel et non pas la substitution de ce monde physique réel par une simulation virtuelle. On trouve parfois aussi les termes « réalité diminuée » pour désigner des applications pouvant supprimer certains éléments visuels d'une scène réelle.

La dénomination « réalité mixte » (RM) regroupe aujourd'hui cet ensemble de technologies, et inclut tout type de fusion entre le réel et le virtuel. Ces différents concepts sont illustrés par le diagramme suivant inspiré et adapté du schéma de Milgram & Kishino (1994) décrivant les environnements pour la télé-opération. Ce continuum est adapté en ce qu'il suppose l'implication de l'ensemble des modalités sensorielles dans la perception, plutôt que la seule vision considérée dans le schéma d'origine (cf. Figure 1).

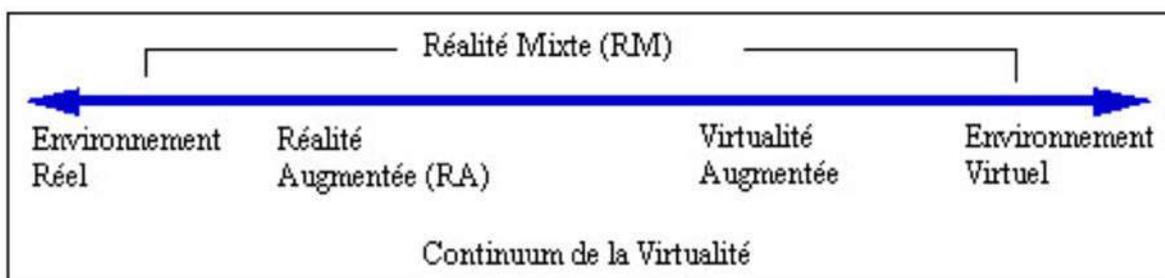


Figure 1 : Schéma du continuum réel – virtuel inspiré et adapté de Milgram *et al.*, *op.cit.*)

À l'une des deux extrémités de ce schéma est placé l'environnement « réel » tel qu'il est perçu par un utilisateur au travers de ses différents sens, sans ajout d'informations virtuelles, tandis qu'à l'autre extrémité se situe la réalité virtuelle caractérisée par un environnement essentiellement artificiel, c'est-à-dire simulé, généré et présenté par un ordinateur. Outre la réalité augmentée (le cas où l'environnement réel est enrichi par des éléments virtuels), la réalité mixte comprend également la « virtualité augmentée » (cas particulier où l'interaction avec un monde numérique est enrichie par des objets réels).

Qu'il s'agisse de réalité virtuelle ou augmentée, une tendance actuelle est à la mobilisation croissante de technologies à faible coût (e.g. capture de mouvement par caméra), et au développement d'applications utilisées en situation de mobilité et/ou de collaboration à distance au travers d'un réseau.

Ces différents types de réalité mixte induisent de nouvelles formes d'interaction humain-machine, avec des spécificités en matière d'habiletés et de compétences sollicitées chez les utilisateurs, et partant de là, de difficultés possibles.

Plusieurs auteurs (e.g. Burkhardt, 2003 ; Bach, 2004 ; Bowman, Gabbard & Hix, 2002) soulignent ainsi l'importance accrue du corps, de la dimension physique et gestuelle dans l'activité associée à l'usage du dispositif, à l'introduction de la profondeur dans l'espace d'interaction et une utilisation en (situation de) mobilité. Une autre spécificité importante réside dans la flexibilité et la diversité potentiellement offertes pour interagir et représenter l'information selon de multiples formats et points de vue. Dans la RA, ces nouveaux environnements se caractérisent aussi par une imbrication, plus ou moins transparente pour les utilisateurs, d'informations présentes dans l'environnement physique réel et d'informations artificielles générées par le système informatique, voire la concurrence ou l'interférence entre ces sources et ces informations.

### 2.1.2 Présence – Immersion – Exposition

Un des effets recherchés des dispositifs de réalité virtuelle et de réalité augmentée, est qu'ils peuvent induire chez l'utilisateur une expérience de « présence » dans un lieu – par exemple un environnement virtuel représentant un appartement - et/ou avec des objets et informations virtuelles insérées, alors que ceux-ci sont engendrés par un ordinateur et que l'utilisateur est, en pratique, dans l'environnement physique dans lequel se déroule l'exposition, équipé d'un casque par exemple.

Concernant cette expérience de « présence » vécue par les utilisateurs, les recherches conduites ne sont pas unanimes ni sur le plan de la définition de cette « présence », ni sur le plan de la nature des indicateurs permettant de la mesurer. Il existe toutefois un consensus a minima<sup>1</sup> pour définir la présence comme *un état ou un processus lors duquel un sujet fait l'expérience de percevoir l'environnement auquel il est exposé comme réel (présence environnementale), d'une part, et, qu'il se trouve effectivement à l'intérieur de cet environnement (présence personnelle), d'autre part.*

L'expérience, par un utilisateur, de la présence et le degré de présence qu'il ressent sont fonction de deux types de facteurs : des facteurs propres au dispositif ou objectifs (e.g. vision stéréoscopique, richesse sensorielle, niveau d'interactivité, temps de latence, type de contenu) et des facteurs propres à l'utilisateur ou subjectifs (e.g. l'interactivité perçue, l'implication à l'égard de la tâche, le crédit que l'utilisateur accorde à l'environnement).

Le premier type de facteur correspond à la notion d'immersion. L'« immersion » est donc une façon de caractériser les applications de réalité virtuelle et augmentée réside dans la quantité (nombre de sens potentiellement interfacés avec le dispositif) et la qualité de l'interaction de l'utilisateur avec l'application au travers des interfaces. Il s'agit d'une caractérisation « objective » du dispositif de RV/RA. L'immersion se mesure donc en matière de degré et de qualité avec lesquels l'interface du système contrôle les entrées sensorielles pour chaque modalité de perception et d'action, *i.e* dans les termes des dispositifs logiciels et matériels spécifiques utilisés (Biocca,1997). Il existe plusieurs dimensions mesurables, telles que :

- le sous-ensemble des modalités mises en œuvre dans l'interaction (Burkhardt, *et al.*2003). Des auteurs (e.g. Biocca,1997) distinguent les modalités sensorielles liées à la perception (*sensory channel*) de celles liées à l'action (*motor channels*) ;

---

<sup>1</sup> A minima, car si la plupart des recherches admettent l'existence de ces deux dimensions, de nombreux travaux ajoutent des dimensions supplémentaires différentes en fonction des dispositifs étudiés et des protocoles de recherche (e.g. présence sociale, présence d'action).

- les propriétés (degré de complétude, qualité, paramètres du signal, etc.) des dispositifs d'interaction pour chacune des modalités visées, correspondant soit au degré de fidélité perceptive (Burkhardt *et al.*, 2003), soit aux paramètres typiques des dispositifs considérés, e.g. pour un dispositif visuel, il s'agit par exemple de la résolution et de la fidélité des couleurs ;
- les propriétés de l'environnement physique dans lequel se déroule l'expérience ;
- la répartition et la contribution relative des informations délivrées par les dispositifs d'interaction et de l'information issue de l'environnement physique ; cet aspect englobe les notions distinguées par Biocca (1997) de niveau de saturation sensorielle (*i.e.* pourcentage d'un canal sensoriel occupé par les stimuli virtuels, par opposition à l'environnement physique) et de suppression sensorielle de l'environnement immédiat (*i.e.* propriétés de l'environnement immédiat qui peuvent éliminer ou minimiser l'impact des canaux sensoriels non pris en charge (ou non « saturés ») par les interfaces.) ;
- la cohérence interne et la latence globale de l'information et des réactions délivrées en temps réel par le système.

Or, les facteurs propres à l'utilisateur font que le niveau d'immersion objectif proposé par le dispositif ne permet pas de prédire mécaniquement le niveau de présence ressenti. Ainsi, un utilisateur peut être exposé à un environnement produit par un dispositif objectivement et potentiellement très immersif sans, pour autant, que son niveau de présence soit à son paroxysme. Parallèlement, un utilisateur peut éprouver un fort sentiment de présence à la lecture d'un roman – dispositif objectivement peu immersif. Ainsi, l'immersion définie comme l'*ensemble des caractéristiques propres à un dispositif technique* est souvent associée à l'*objectif de provoquer, chez le sujet exposé, une expérience de présence*.

L'exposition peut être définie comme la *situation lors de laquelle un sujet perçoit un ensemble de stimuli générés par un dispositif immersif*.

Si les caractéristiques d'un dispositif peuvent être identifiées et estimées (e.g. mesurées) – puisqu'elles ont été pensées au préalable par les concepteurs et réalisées techniquement, la sensation de présence constitue une expérience propre à un utilisateur. En conséquence, l'identification des indicateurs de la présence et la mesure de la présence sont plus complexes.

Concrètement, il est possible d'identifier trois grands types de mesure de la présence :

- les mesures subjectives (pendant ou post-exposition, quantitatives ou qualitatives) telles que, par exemple, un questionnaire administré à l'issue de la phase d'exposition ;
- les mesures physiologiques (e.g. rythme cardiaque, conductance cutanée) ;
- les mesures comportementales (e.g. estimer la performance de l'utilisateur, estimer l'importation de schèmes ou réflexes sensori-moteurs).

Parmi ces types de mesures, les plus utilisées sont les mesures subjectives, en l'occurrence les questionnaires administrés post-exposition. Il existe plus d'une cinquantaine de questionnaires mesurant la présence, parmi lesquels certains sont plus utilisés que d'autres. À titre d'exemple, deux questionnaires sont fréquemment utilisés.

Le premier est celui élaboré par Witmer et Singer (1998). Il comporte plusieurs dimensions mesurant la présence. Par exemple, la question « Dans quelle mesure pouviez-vous déplacer ou manipuler des objets dans l'environnement virtuel ? » contribue à mesurer les facteurs de contrôle ; la question « Dans quelle mesure la qualité de l'interface visuelle a interféré ou vous a distrait en termes de performance assignée aux tâches ou aux activités que vous deviez accomplir ? » contribue à mesurer les facteurs de distraction.

Le second est l'*Igroup Presence Questionnaire* (IPQ) qui comporte également plusieurs dimensions (Schubert *et al.*, 2001). Par exemple, l'item « D'une certaine façon, j'ai eu l'impression que le monde

virtuel m'entourait » mesure la présence spatiale ; l'item « Le monde virtuel semblait plus réaliste que le monde réel » mesure la réalité de l'expérience.

## 2.2 Classification des applications et caractéristiques des contextes d'utilisation

Décrire les types d'application et les différents contextes d'utilisation de façon globale est ardu pour plusieurs raisons. D'une part, les contextes, les fonctionnalités et les types d'activités rencontrés sont extrêmement diverses selon les applications. Ainsi les applications historiques de la réalité virtuelle visent essentiellement à immerger des utilisateurs dans des environnements artificiels générés par ordinateur avec différents objectifs et fonctionnalités proposées (par exemple recherche, formation, thérapie, etc.) et différents niveaux de ressemblance avec le monde réel ; alors que les applications de réalité augmentée maintiennent l'utilisateur en présence d'environnements physiques réels en y superposant une information variée, visant à l'assister ou à l'informer dans des activités pour partie différentes aux précédentes (conception, diagnostic et maintenance, guidage et aide à la réalisation de procédure, etc.). D'autre part, l'évolution continue des technologies et la multiplication des nouveaux dispositifs (voir chapitre 2.3), leur insertion croissante dans de nombreux contextes professionnels ou dans la vie quotidienne s'accompagnent *de facto* de la diversification des fonctions et des « formes » d'applications, avec en parallèle, l'exposition croissante de la population incluant des publics variés et notamment des adolescents et des enfants. Enfin, le grand nombre de publications disponibles aujourd'hui rend difficile une vision claire et détaillée de l'existant, d'autant que ces publications portent essentiellement sur des prototypes de laboratoire plutôt que sur l'utilisation effective et l'exposition aux applications de la réalité virtuelle et augmentée, sur le terrain professionnel, comme dans la vie quotidienne et les loisirs.

### 2.2.1 Principaux domaines d'application, caractéristiques fonctionnelles et populations concernées

Les façons possibles de catégoriser les applications de RV/RA sont multiples, du fait de la multitude de points de vue possibles. Les premières classifications sont essentiellement fondées sur les caractéristiques techniques des interfaces mises en œuvre plus qu'en fonction des domaines et des activités ciblées. Par exemple, la classification selon le degré d'immersion visuelle (écran, grand écran, CAVE<sup>2</sup>, casque) est ainsi souvent utilisée. Ultérieurement (Fuchs, Moreau & Arnaldi, 2006), une classification des applications a été proposée en croisant cinq objectifs applicatifs principaux (comprendre, concevoir, apprendre, contrôler, distraire) avec des domaines d'application tels que les sciences, la culture, les psychothérapies, la médecine, l'aide à la décision en environnement ou encore les industries manufacturières. Développée dans le contexte de la réalité virtuelle, cette dernière classification nécessite toutefois une adaptation dans le contexte de la réalité augmentée et de la réalité mixte.

Dans la perspective d'évaluation des risques liés à l'utilisation de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée dans différents domaines d'application, nous proposons une classification plus étendue (cf. Tableau 1) afin d'y intégrer les deux pôles réalité virtuelle et réalité augmentée, et en définissant de grandes « fonctions » auxquelles s'associent des caractéristiques fonctionnelles ainsi que d'autres caractéristiques telles que le contexte d'utilisation, la présence ou non d'autres personnes, les caractéristiques de la population concernée, etc.

Ces fonctions représentent des formes typiques d'application assez différenciées. Par exemple, dans le cas de la fonction de recherche, il s'agit pour le chercheur en sécurité routière d'utiliser un environnement de conduite virtuel pour étudier le comportement d'un échantillon de conducteurs

---

<sup>2</sup> CAVE : *Cave Automatic Virtual Environment* ou Cube immersif 3D ou voûte immersive, est une pièce constituée de 2, 3, 4 ou 5 murs sur lesquels sont projetés des vidéos en 3D.

placés dans divers conditions et scénarios. Dans les cas de la fonction de formation, d'éducation, d'apprentissage, il peut s'agir d'utiliser une application de réalité augmentée sur un smartphone, afin de permettre à des élèves en classe d'étudier certains phénomènes physiques. Les fonctions ne sont toutefois pas exclusives les unes des autres. Ainsi, la fonction recherche peut concerner la rééducation ou la psychothérapie : il peut s'agir d'expérimenter l'efficacité de différents types d'exercices et d'environnements pour la rééducation. De même, dans le cas d'applications pour la formation, l'éducation ou la rééducation, il peut être intéressant et efficace d'associer des fonctions ludiques afin d'accroître la motivation et la persistance à les utiliser de la part des patients.

Pour chacune de ces grandes fonctions, le tableau suivant indique la technologie majoritairement associée aujourd'hui (réalité virtuelle, augmentée ou les deux). Le cas échéant, différentes formes d'usage peuvent être distinguées, comme par exemple dans les applications dédiées à la formation, l'éducation et l'apprentissage où des configurations différentes coexistent selon qu'il s'agit d'un environnement pour l'auto-formation, d'un environnement collaboratif pour le travail en groupe ou d'un outil de tutorat voire un dispositif utilisé par l'enseignant ou le formateur comme support de cours au tableau.

Tableau 1 : Classification fonctionnelle et caractérisation des applications de réalité virtuelle ou augmentée.

Fonction	RV	RA	Objectif et objet de l'environnement simulé	Activités / objectifs poursuivis	Population(s) d'utilisateurs impliquée(s)
Recherche	++	--	Étude	Comprendre Visualiser Contrôler Expérimenter Recueillir des données	Sujets expérimentaux Chercheurs
Conception de produits, de <i>process</i> ou de postes de travail	++	+	Représentation et test d'environnements ou d'objets à différentes étapes de la conception	Visualiser Manipuler des dimensions ou des variables Anticiper l'activité future/probable Évaluer Recueillir des données	Travailleurs : futurs utilisateurs des produits ou des postes de travail Concepteurs, stylistes, décideurs Autres parties prenantes
Planification d'intervention, analyse d'accidents	++	+	Préparation et planification d'intervention, comparaison d'hypothèses ou d'alternatives, aide à la prise de décision	Anticiper Planifier Évaluer Comparer Répéter Décider	Travailleurs concernés
Contrôle de processus, pilotage			Représentation d'un processus et/ou d'objets et d'entités artificielles associés en vue de faciliter le suivi, le diagnostic et la prise de décision en contrôle de processus	Visualiser Comprendre Diagnostiquer Contrôler Décider	Travailleurs concernés

Fonction	RV	RA	Objectif et objet de l'environnement simulé	Activités / objectifs poursuivis	Population(s) d'utilisateurs impliquée(s)
<b>Médecine, rééducation, psychothérapie, applications de santé</b>	++		Fourniture de moyens d'interaction et d'un environnement pour mesurer ou soutenir l'exercice d'activités de la vie quotidienne ou d'activités prescrites dans un cadre thérapeutique, en vue de faciliter le diagnostic, l'évaluation, le traitement, la rééducation, le suivi, l'entraînement  Mise en place de feedbacks (voire de neuro et biofeedback) pour faciliter l'acquisition	Diagnostiquer, évaluer  Réduquer, réapprendre, récupérer des capacités  S'entraîner  Accompagner (coacher)  Planifier  Contrôler  Suivre la progression	Population générale :  - patients  - personnes en situation de handicap  - aidants  - familles  Travailleurs : personnel médical et paramédical
<b>Formation, éducation, apprentissage</b>	++	++	Représentation ou simulation d'environnements adaptés et/ou d'objets et d'entités artificielles pour l'apprentissage et la modification du comportement	Apprendre  Évaluer  Entraîner  Enseigner / former  Expérimenter  Débattre  Modéliser	Population générale, enfants et adultes  Travailleurs et apprenants  Enseignants/formateurs
<b>Information, sensibilisation, communication persuasive</b>	+	+	Simulation d'environnements adaptés et/ou d'objets et d'entités artificielles dans un but de présentation et de communication	Informier  Convaincre, influencer  Motiver  Sensibiliser	Grand public  Populations ciblées
<b>Jeux et dérivés</b>	++	++	Simulation d'environnements imaginaires et/ou d'objets et d'entités artificielles pour interagir dans un scénario ludique	Jouer	Grand public
<b>Installation artistique</b>	+	++		Interagir, vivre une expérience esthétique	Grand public

En complément, les applications se caractérisent aussi par d'autres dimensions présentées dans les sous sections suivantes.

## 2.2.2 Configurations mono ou multi-utilisateur, en colocalisé ou à distance

Les applications peuvent aussi se distinguer selon la configuration d'utilisateurs, ceux-ci pouvant interagir seuls avec les éléments de l'application ou bien à plusieurs (une classe, un binôme d'apprenants, une équipe...) dans un même espace physique partagé localement ou bien à distance. Enfin, des applications peuvent héberger un très grand nombre d'utilisateurs comme dans certains jeux en ligne (cf. Figure 2).

	1 seul utilisateur	Equipe, petit groupe	Grand nombre d'utilisateurs
Espaces distants	Télé-opération	Télé-collaboration	Système massivement multi-utilisateurs
Même espace physique partagé	Système mono-utilisateur	Outils collaboratifs co-localisés	Système co-localisé massivement multi-utilisateurs

Figure 2 : Classes d'applications selon la configuration d'utilisateurs et le partage ou non d'un même espace.

## 2.2.3 Configurations des espaces physiques et virtuels d'interaction

### 2.2.3.1 Occultation et congruence de l'espace physique avec l'environnement et/ou les objets et entités artificielles créés par l'application

Les applications de réalité virtuelle impliquent souvent l'occultation visuelle et/ou sonore partielle ou complète de l'espace physique dans lequel se trouve l'utilisateur, en lui substituant la représentation de l'environnement engendré par l'ordinateur. À l'inverse, les applications de la réalité augmentée se fondent sur l'espace physique qu'elles enrichissent au moyen d'une information ou d'objets superposés. Par ailleurs, le défaut de congruence, c'est-à-dire le fait de ne pas coïncider ou l'ajustement imparfait entre l'espace physique et l'espace de synthèse engendré par les applications, peut être à l'origine de difficultés pour l'utilisateur dans son interaction avec l'application (voir chapitre 4).

### 2.2.3.2 Dimensions de l'espace physique d'interaction : degrés de liberté et mobilité de l'utilisateur

Les degrés de liberté dans l'espace physique d'interaction varient suivant l'objectif de l'application. Seule une partie du corps du participant peut être concernée, ou à l'opposé l'ensemble du corps est mobile et implique un déplacement dans l'espace physique, ce qui engendre une enveloppe d'actions et de positions possibles différentes. De plus, les applications de réalité augmentée donnent aussi lieu à des utilisations en milieu ouvert, à l'intérieur de bâtiments ou à l'extérieur. Il en découle plusieurs classes d'applications relativement à ce dimensionnement des actions et des déplacements.

### 2.2.3.3 Degrés de liberté des interactions de l'utilisateur dans l'espace virtuel

Les degrés de liberté proposés à l'utilisateur pour naviguer et agir dans l'espace virtuel peuvent être très variables suivant les besoins et les applications. Il peut y avoir un guidage et une restriction plus ou moins importante des actions et des interactions possibles. À l'inverse, certaines applications peuvent offrir une très grande liberté d'actions et de mouvement.

Si l'on considère par exemple une application visant l'apprentissage des déplacements dans un quartier virtuel, ces possibilités de manipulation des degrés de liberté peuvent être utilisées pour graduer la difficulté des expériences proposées. Dans une première étape, la réalité virtuelle pourra permettre le guidage sur un chemin dans le but d'observer les lieux et des points de repère, tandis que dans une étape ultérieure de l'apprentissage, une plus grande autonomie sera donnée à la personne pour ses déplacements, de façon à ce qu'elle puisse mettre en œuvre tous ses acquis antérieurs et ses stratégies spatiales.

### 2.2.4 **Existence d'une organisation, de mesures de prévention et de personnel formé pour encadrer l'utilisation**

Selon l'application, l'utilisation peut être ou non encadrée par des personnels, tandis qu'une organisation et des mesures de prévention en lien avec des risques anticipés sont mises en place. Ainsi, dans le cadre d'une utilisation pour la recherche, et suivant le protocole choisi, il y aura souvent soumission préalable du protocole à un comité d'éthique, demande d'autorisation et présence de personnes et d'éventuels dispositifs de prévention des risques (e.g. harnais de rappel, coup-de-poing d'arrêt d'urgence, etc.). Une formation et un suivi pour les utilisateurs professionnels peuvent exister. À l'autre extrême, l'usage des dispositifs grands-publics peut s'effectuer en l'absence de tout encadrement, chez soi, seul, et sans précaution particulière quant aux risques éventuellement encourus.

## 2.3 **Dispositifs et interfaces**

Longtemps, les aspects visuels ont été prédominants dans les applications de réalité virtuelle, et la vision du grand public a été réduite au stéréotype d'une personne seule portant un casque (que nous appellerons visiocasque par la suite). Aujourd'hui, plusieurs utilisateurs peuvent partager le même espace et la même interface visuelle, comme dans le cas d'une salle immersive collaborative. De plus, le visiocasque n'est qu'un des dispositifs d'immersion visuelle parmi d'autres, et des interfaces associées à d'autres modalités sensorielles peuvent être utilisées (son, toucher, mouvement). Pour autant, l'immense majorité des applications proposent *a minima* une immersion visuelle, même si d'autres types d'interfaces existent.

### 2.3.1 **Interfaces visuelles**

Un premier axe de classification des interfaces visuelles réside dans la distinction entre les interfaces « portées » par le sujet, qui sont par nature unipersonnelles, et les interfaces « fixes » dont la position est indépendante des sujets. Les tablettes utilisées pour certaines applications de réalité augmentée constituent un type intermédiaire. Le cas des interfaces de réalité augmentée spatialisées (*Spatially Augmented Reality* ou SAR), c'est à dire exploitant les objets du monde réel comme surface pour projeter une information d'augmentation, se situent aussi dans les deux catégories mais seront examinées arbitrairement dans la seconde.

#### 2.3.1.1 Interfaces portées : les visiocasques

Les interfaces visuelles portées incluent principalement les visiocasques, dont l'origine remonte à la fin des années 1960.

Les visiocasques comportent un ou deux écrans proches des yeux et un système optique qui permet de créer des images virtuelles plus éloignées afin de permettre l'accommodation par le sujet. Un capteur de position et d'orientation permet d'adapter en temps réel les images produites au déplacement du sujet. La technologie d'affichage se résume aujourd'hui aux écrans à cristaux liquides de faible taille par rapport à leur résolution (issus du marché des téléphones « intelligents »), même si les casques à écrans cathodiques étaient les plus répandus au début des années 2000.

Trois catégories de visiocasques peuvent être distinguées selon la nature du lien avec l'espace réel environnant :

- les casques occultant l'espace environnant. La plupart des casques utilisés en réalité virtuelle occultent la vue sur l'environnement extérieur. Cela facilite l'immersion dans l'univers virtuel, au détriment parfois de l'acceptabilité (dispositif considéré comme intrusif) et de la perception de son propre corps ;
- les casques « *Video See Through* ». Ces casques restituent une vue de l'environnement réel *via* des caméras positionnées à peu près au niveau des yeux et constituent ce que l'on appelle la réalité augmentée VST (*Video See Through*). La plupart des casques utilisés en réalité virtuelle sont capables d'accueillir cette fonction, d'autres sont spécifiquement conçus pour cet usage. Si l'augmentation des images restituées par les caméras est facile techniquement, le rendu du monde réel est souvent déformé ;
- les casques « *Optical See Through* ». Ces dispositifs sont semi-transparents et laissent à l'utilisateur une perception directe de l'environnement réel. On parle alors de réalité augmentée OST (*Optical See Through*). Les techniques de projection sont alors des facteurs limitants (puissance lumineuse, champ de vision...) comme le montrent des dispositifs privilégiés pour la réalité augmentée comme certaines lunettes. La superposition des images réelles et des images virtuelles n'a été réussie complètement que très récemment grâce au grand nombre de capteurs déployés dans l'Hololens (casque de réalité mixte autonome). Dans certains cas, l'image de l'environnement réel et les enrichissements virtuels ne sont pas cohérents spatialement - par exemple en l'absence d'information de profondeur - on parlera alors de réalité « informée » plutôt qu'augmentée.

Plus récemment, la présence d'une caméra intégrée dans les tablettes et autres *smartphones* apporte une alternative aux casques « *Video See Through* » pour la réalité augmentée. Au travers de la métaphore de la fenêtre magique (« *magic window* »), ce type d'interface offre à l'utilisateur la possibilité de contrôler manuellement une vue superposant la scène filmée et des « augmentations » au travers de la position de la tablette et non sur la base des mouvements de la tête comme cela est le cas avec un visiocasque.

Les trois principaux défis pour les fabricants de visiocasques sont : le compromis entre la miniaturisation des composants (notamment pour diminuer le poids du dispositif sur la tête) et la fourniture d'un champ de vision plus étendu (lequel implique un système optique de grande taille), l'autonomie électrique et de réception des images (transmission sans fil) et enfin la qualité de l'optique.

### 2.3.1.2 Interfaces fixes : écrans et projection sur des surfaces

Les interfaces visuelles dites fixes sont généralement de type écran. Elles peuvent être caractérisées selon plusieurs dimensions :

- un seul écran ou plusieurs écrans. Dans le cas où il y a plusieurs écrans, ceux-ci peuvent être placés dans le même plan ou dans des plans différents. L'espace de travail des applications est alors directement lié à la taille des écrans, tandis qu'un

compromis sur la distance observateur-écran doit être trouvé : un observateur proche augmente le champ de vision tandis qu'un observateur éloigné diminue la taille relative des pixels et rapproche celui-ci de son acuité visuelle nominale ;

- écran plat, incurvé ou semi-sphérique ;
- écran actif qui génère ses propres images ou écran passif qui suppose l'existence d'un ou plusieurs systèmes de projection. Dans le cas de plusieurs systèmes de projection, se grefferont deux dimensions supplémentaires :
  - la projection peut être effectuée par devant l'écran, avec des risques d'occlusion, ou bien par derrière, ce qui nécessite environ le double d'espace (multiplié par le nombre de faces lors d'un système multi-écrans type CAVE) ;
  - afin de faire apparaître visuellement une seule image, il est nécessaire de traiter la jonction entre les images issues des différents projecteurs. Cela peut se faire de façon logicielle (et donc être relativement lent) ou matérielle (souvent extrêmement onéreux) ;
- les systèmes SAR (*Spatially Augmented Reality*) mentionnés en introduction se passent d'écran : un projecteur diffuse directement les augmentations sur des objets du monde réel.

### 2.3.1.3 Restitution stéréoscopique

Quel que soit le type d'interface choisi, la question de la restitution stéréoscopique se pose. Afin de permettre la vision stéréoscopique, chaque œil doit percevoir une image légèrement différente.

Les images peuvent être séparées au niveau de l'écran comme dans les visiocasques, nécessiter une gymnastique oculaire comme dans les stéréogrammes, ou bien, le plus souvent, être extraites de l'image projetée sur l'écran au moyen de lunettes ayant pour rôle de filtrer l'image destinée à chaque œil. Dans ce dernier cas, on distingue 3 catégories de lunettes sur le plan de la technologie utilisée :

- les lunettes « anaglyphes », qui utilisent des filtres de couleur et permettent la génération d'images stéréoscopiques à faible coût mais au détriment de la restitution des couleurs ;
- les lunettes « polarisantes », qui, couplées à des filtres de polarisation et à 2 vidéoprojecteurs par écran, permettent une restitution stéréoscopique encore sujette aujourd'hui à des défauts de qualité d'image (chevauchement), et plus onéreuse ;
- les lunettes « actives » qui, synchronisées avec un projecteur très rapide, obturent successivement chaque œil. Le coût du projecteur est élevé, les lunettes sont également plus coûteuses et consommatrices d'énergie (batteries).

### 2.3.2 Dispositifs auditifs

La délivrance de stimulations auditives est fréquente en réalité virtuelle. Elle est inversement encore assez rare dans les applications de la réalité augmentée.

Très souvent, la stimulation auditive est restituée de façon stéréophonique et délivre de ce fait une information spatiale limitée. L'ajout d'une composante sonore spatialisée en 3D est important pour permettre à l'utilisateur de distinguer et localiser simultanément plusieurs sources, et accroître ainsi le réalisme et la sensation de présence de l'utilisateur dans l'environnement virtuel.

Pour délivrer une information auditive spatiale, il est nécessaire de faire appel à une interface d'écoute, et à des techniques de restitution sonore spatiale. Ces dernières visent à reproduire ou synthétiser aux oreilles de l'auditeur les indices de localisation pour chaque source composant la scène sonore virtuelle. Ces points sont présentés ci-dessous.

### 2.3.2.1 Techniques de restitution sonore

Les systèmes de restitution sonore spatiale sont catégorisables en trois familles.

La première exploite les propriétés de la perception, et repose sur un modèle simple de différence de niveau sonore ou de temps d'arrivée introduit entre deux haut-parleurs voisins qui suffit à créer l'illusion d'une source « fantôme » localisable entre les positions physiques des haut-parleurs. Ce principe, à la base de la restitution stéréophonique classique, peut être étendu à des ensembles de haut-parleurs plus complexes répartis en couronne (restitution 2D) ou en volume (restitution 3D) autour de l'auditeur.

La deuxième famille, composée par les techniques *binaurales*, est réservée à la reproduction sur casque. Elle vise à reconstruire directement l'ensemble des indices de localisation à partir de mesures de directivité relevées sur une tête humaine.

La dernière famille vise à reconstruire de manière précise les propriétés physiques du champ acoustique dans un voisinage plus ou moins large autour de l'auditeur.

#### 2.3.2.1.1 **La stéréophonie**

Le modèle de restitution spatiale du son le plus utilisé encore aujourd'hui reste la stéréophonie, utilisant un couple de haut-parleurs situés devant l'auditeur, ou un casque audio. En réglant le retard ou le niveau relatif des signaux envoyés à chaque haut-parleur, on contrôle de manière simplifiée les indices de localisation interauraux ITD (*Interaural Level Difference*) et ILD (*Interaural Time Difference*), ce qui donne naissance à une source sonore fictive dont la direction de provenance est limitée à la zone encadrée par les deux haut-parleurs.

Par extension des techniques stéréophoniques classiques, il est possible de reproduire un son spatialisé sur des ensembles de haut-parleurs, plans ou tridimensionnels, disposés autour de l'auditeur. L'exemple le plus courant est la configuration « 5.1 » des formats de restitution sonore cinématographiques, également utilisée pour les jeux vidéo. Les applications ou installations sonores plus ambitieuses visant une reproduction sonore tridimensionnelle nécessitent la mise en place de dômes constitués de quelques dizaines de haut-parleurs.

Toutefois, tous ces systèmes partagent les mêmes contraintes et limites en matière de liberté de placement de l'auditeur. L'illusion des images fantômes n'est valide qu'en un point particulier de l'espace (centre du dispositif) et l'auditeur ne doit pas s'écarter de cette position pour percevoir la scène spatiale voulue.

#### 2.3.2.1.2 **Techniques binaurales**

Cette technique de diffusion pour casque est basée sur une procédure d'analyse et synthèse des fonctions de directivité spatiale de la tête. Les indices de localisation sonore spatiale sont caractérisés par des paires de filtres appelés *Head Related Transfer Functions* (HRTF), qui peuvent être mesurés directement aux oreilles d'un auditeur et pour une source située dans une direction donnée de l'espace. En répétant ces mesures pour différentes directions d'incidence, on constitue une base de données de HRTF. La spatialisation d'un son monophonique s'effectue en filtrant le signal par la paire de filtres correspondant à la direction d'incidence souhaitée. Les HRTF sont par nature dépendantes de la morphologie de l'auditeur qui influence en particulier les indices spectraux nécessaires à la localisation de la source en élévation sur l'horizontale. La conséquence directe de cette dépendance interindividuelle est que, s'il est possible d'utiliser des HRTF « génériques », par exemple mesurées sur une tête artificielle, celles-ci entraînent généralement des erreurs de localisation significatives, en

particulier des confusions avant/arrière ou l'impression de colorations spectrales inhabituelles pour l'auditeur.

Dans le cadre d'applications en réalité virtuelle, l'ajout d'un système de suivi de mouvement de la tête améliore la localisation et aide également à réduire les confusions avant-arrière. La technologie binaurale reste à ce jour le mode de restitution spatiale le plus rigoureux et se justifie non seulement en contexte expérimental pour la conduite d'études sur la perception et la cognition en réalité virtuelle, mais également pour les jeux vidéo.

### **2.3.2.1.3 Reproduction de champ sonore**

Ces dispositifs de reproduction sonore visent à modéliser et restituer le champ sonore physique. Parmi ces approches, on distingue les approches holophoniques comme la *wave-field synthesis (WFS)* et les approches de type « décomposition en harmoniques », comme les techniques *Ambisonics*.

#### **2.3.2.1.3.1 Holophonie – Wave Field Synthesis**

Développée dans les années 1980 à l'université de Delft, la *Wave Field Synthesis (WFS)* suscite un large intérêt aujourd'hui car le nombre de canaux nécessités par cette technique de synthèse spatiale ne représente plus un obstacle technologique. Cette technique est basée sur la gestion des retards et gains associés à chacun des haut-parleurs placés en réseau, permettant de créer un front d'onde cohérent spatialement et qui semble provenir d'une position identique pour tous les auditeurs.

Alors que la stéréophonie adopte un point de restitution centré sur l'auditeur, la WFS adopte un point de restitution dans lequel le champ sonore est reproduit indépendamment du placement des auditeurs. Cette propriété est intéressante pour les situations multi-utilisateurs et celles où les auditeurs peuvent être en mouvement sans pour autant être équipés de capteurs de position.

#### **2.3.2.1.3.2 Décomposition en harmoniques sphériques – format ambisonique**

La technologie de restitution sonore ambisonique est basée sur la décomposition du champ acoustique en harmoniques sphériques centrées sur le point de vue de l'auditeur. Le principal avantage de cette technologie réside dans l'encodage du champ sonore qui est réalisé indépendamment du dispositif de restitution. L'étape de décodage consiste à adapter la scène sonore encodée au format ambisonique à un dispositif particulier de haut-parleurs (nombre et disposition des haut-parleurs). L'espace sonore peut être restitué sur divers dispositifs panoramiques (2D) ou sphériques (3D), avec un nombre de haut-parleurs dépendant de l'ordre de la décomposition. En augmentant l'ordre de décomposition, la résolution spatiale de la restitution augmente et la zone d'écoute s'étend.

L'indépendance entre le format d'encodage et le dispositif de restitution constitue un avantage majeur de cette approche. De plus, au moment de la diffusion, la scène sonore peut être manipulée en modifiant les combinaisons entre les différents canaux de sorte à déformer, dans certaines limites et de manière contrôlée, l'organisation spatiale de la scène. La réalité virtuelle fournit un cadre applicatif intéressant pour ce type de format. On peut en effet enregistrer une scène sonore complexe comportant de nombreuses sources (ambiance urbaine, conversations dans un lieu public, etc.) en encodant son organisation spatiale tridimensionnelle. Cette scène peut ensuite être importée dans le monde virtuel comme le seraient des textures graphiques appliquées sur un maillage. Les propriétés de manipulation permettent par exemple de réorienter la scène en 3D pour compenser le mouvement de la tête de l'auditeur.

### 2.3.2.2 Systèmes d'écoute

Les systèmes d'écoute sont multiples et dépendent en partie, nous l'avons vu, de la technologie de restitution sonore. Il peut être important de noter si dans une étude utilisant une restitution de type stéréophonique les périphériques sont de type haut-parleur ou casque. S'il s'agit d'un casque, il peut être de type intra-auriculaire, supra-aural ou circum-aural, et il peut également être fermé ou ouvert. Enfin, s'il s'agit de haut-parleurs, il sera important d'en noter le nombre.

## 2.3.3 Interfaces haptiques

### 2.3.3.1 Terminologie et classification proposée

Les interfaces haptiques sont des « *Interfaces permettant de renvoyer à un opérateur des informations relatives au sens du toucher* » (Hayward et MacLean, 2007). Celles-ci intègrent des composants matériels et logiciels dont l'objet est de rendre possible la perception de stimuli de force ou tactiles, contrôlés par ordinateur.

L'interaction avec des objets tangibles dans notre vie courante s'appuie beaucoup sur le sens du toucher. Interagir avec des objets tangibles en RV et RA en n'utilisant que des dispositifs d'immersion visuelle et auditive aurait un défaut majeur : nous ne pourrions les toucher, notre main les traverserait sans qu'ils aient de matérialité. Pour pallier ce manque, la recherche et l'industrie développent des dispositifs dits *haptiques*<sup>3</sup>.

Le sens du toucher passe par des capteurs de natures différentes, disséminés dans le corps humain : peau, muscles, tendons, articulations. Pour cette raison, les dispositifs haptiques sont complexes à mettre en œuvre. Leur conception doit répondre d'une part au défi d'échelle, c'est à dire l'étendue spatiale du retour d'effort souhaitée : sur un doigt, la main, les deux mains, ou sur une plus grande partie du corps. D'autre part, leur conception fait face aux défis de résolution spatiale et temporelle. La résolution spatiale est la taille des détails que l'on souhaite simuler, comme dans le cas de la simulation d'une texture finement grainée sur une surface. Plus ce grain est fin, plus le système haptique doit être mécaniquement précis. La résolution temporelle est la fréquence à laquelle le dispositif fonctionne, celle-ci doit être élevée (de l'ordre de 1 000 Hz) sans quoi les stimuli haptiques peuvent être perçus comme non réalistes. Dans les domaines industriels, pour lesquels la précision des informations haptiques est primordiale, pour les simulations de montage mécanique par exemple, les exigences sur les résolutions sont souvent élevées. Cependant, comme pour tout dispositif de réalité virtuelle, la complexité des dispositifs haptiques peut être limitée en l'adaptant au cas d'usage. On verra que dans de nombreux cas il est possible d'en limiter la complexité, en exploitant la tolérance humaine aux conflits intra ou multi sensoriels (cf. chapitre 4. Un exemple simple de ce type de conflit est le fait de renvoyer des vibrations au niveau des mains d'un joueur, *via* les manettes de jeu, pour lui figurer des événements qui n'ont pas lieu au niveau de ses mains : par exemple, le fait qu'il a été touché par un projectile ou qu'un objet est tombé quelque part autour de lui. Cet exemple illustre un conflit lié à une incongruence spatiale entre visuel et haptique, puisque l'évènement est visuellement représenté dans le décor environnant, alors que les vibrations, elles, ont toujours lieu au niveau des mains. Malgré ce conflit visuel-haptique, l'expérience montre que l'information haptique présentée dans ce type de cas est utile pour le joueur.

La démarche du concepteur d'un système de réalité virtuelle, qui peut s'appliquer aussi pour la mise en place du retour haptique, est donc d'adapter les dispositifs à la nature des événements simulés, en tentant de répondre aux besoins de l'application, tout en limitant sa complexité. Ceci peut se faire en déployant une gamme large de techniques. Cette section les

---

<sup>3</sup> Le terme haptique provient du grec *haptikos* « capable de toucher ».

présente selon deux axes principaux : le caractère actif ou passif des dispositifs, et la nature tactile (mobilisant les capteurs tactiles au niveau de la peau et de la pulpe des doigts) ou d'effort (mobilisant les capteurs situés au niveau des muscles, des tendons ou des articulations) des informations.

### 2.3.3.2 Systèmes actifs

Les systèmes actifs sont dotés d'actionneurs qui peuvent ajouter de l'énergie mécanique au système, il s'agit typiquement de systèmes robotisés qui peuvent transmettre de l'énergie à l'opérateur, tels les bras à retour d'effort.

#### *Interfaces de retour d'effort fixe*

##### - Systèmes fixes

L'idée du retour d'effort sur des systèmes fixes en réalité virtuelle consiste à remplacer un objet réel que l'utilisateur manipule par un système de senseurs et d'actionneurs connectés à un ordinateur. Un exemple classique est celui du bras à retour d'effort qui permet de manipuler un objet. Le système étant fixé au sol, celui-ci dispose d'un référentiel fixe pour calculer les déplacements ou les forces appliquées aux senseurs. Le système en déduira les forces de réaction à produire avec les actionneurs pour simuler la présence haptique de l'objet virtuel.

Le pantographe est un système classique de dispositif à retour d'effort. Il consiste en une combinaison de barres liées entre elles par des moteurs rotatifs. Il peut fonctionner selon deux ou trois degrés de liberté.

D'autres systèmes à retour de force fonctionnent sur la base d'un ensemble de câbles et de poulies permettant d'exercer des forces de traction (Sato, 2002).

##### - Systèmes portés

Dans le cas où le système est fixé au corps de l'utilisateur, les contraintes ressenties par celui-ci seront donc relatives au point de fixation. Par exemple, les exosquelettes placés sur les mains (cf. Figure 3) permettent de ressentir au niveau des doigts les propriétés d'un objet porté par l'opérateur<sup>4</sup> (une balle et ses propriétés mécaniques internes). La situation spécifique d'une force externe (pousser sur un mur virtuel par exemple) ne pourra en revanche être simulée, sauf si ce système est combiné à un système à base fixe.



Figure 3 : Gants à retour d'efforts en forces internes.

#### *Systèmes à retour tactile*

Les dispositifs vibrotactiles les plus familiers correspondent aux systèmes de vibreurs présents dans les téléphones mobiles. On peut également en trouver dans des manettes de jeu vidéo

---

<sup>4</sup> Source : <https://www.dextarobotics.com>.

grand public. Ces systèmes sont généralement utilisés pour signaler des alertes sans déranger les personnes aux alentours. On en trouve dans des combinaisons tactiles portées (cf. Figure 4).



**Figure 4 : Combinaison tactile<sup>5</sup>.**

Il existe un autre type de systèmes à retour tactile que l'on appelle « affichage tactile ». Il consiste à offrir à l'utilisateur une sensation distribuée spatialement par contact direct avec la peau. L'exploration tactile utilise souvent une partie très sensible aux stimulations tactiles : l'extrémité pulpeuse des doigts (cf. Figure 5). Dans certains cas, l'objectif est de reproduire les sensations du toucher d'objets réels tel que l'écriture braille.

Notons que les systèmes à retour tactile peuvent être portés ou fixes.

---

<sup>5</sup> source : [https://en.wikipedia.org/wiki/Haptic\\_suit#/media/File:NullSpace\\_VR\\_Mk\\_2.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Haptic_suit#/media/File:NullSpace_VR_Mk_2.jpg).



Figure 5 : Exemple de dispositif d'affichage tactile par des picots<sup>6</sup>.

### 2.3.3.3 Systèmes passifs

Les systèmes passifs n'ajoutent pas d'énergie cinétique à l'opérateur, mais peuvent seulement en retirer, la stocker ou la rediriger (Swanson, 2003). Certains ont le grand avantage de ne pas comporter d'actionneurs électromécaniques (les accessoires), d'autres comportent des actionneurs (*cobots*, systèmes à rencontre), ou simplement des capteurs d'effort (pseudo haptique).

#### - Accessoires

On les retrouve dans la littérature scientifique et les installations grand public sous différents termes : accessoires, *props*, objets tangibles. Ils relèvent tous de la même idée : utiliser un objet réel pour figurer haptiquement un objet virtuel. Un des premiers exemples a consisté à utiliser une tête de poupée et une plaque de plastique pour l'exploration de données d'imagerie médicale (Hinckley *et al.*, 1994). Les deux objets sont équipés de capture de mouvement, et permettent de spécifier un plan de coupe dans des données d'imagerie visualisés sur un écran. Dans ce cas précis, les objets sont maintenus, et la sensation tactile s'arrête à partir du moment où l'utilisateur pose les objets. La même idée se retrouve pour la simulation haptique d'objets fixes, comme des murs ou des éléments de décor : on ajoute des éléments tangibles dans l'espace parcouru par l'utilisateur portant un visiocasque : ceux-ci sont spatialement superposés à certains objets visibles dans le casque. La perception visuelle d'être en contact avec un objet tangible s'accompagne donc de la sensation tactile correspondante (Hinckley *et al.*, 1994; Insko *et al.*, 2001; Li-Wei Chan *et al.*, 2010).

#### - Systèmes à rencontre

Les systèmes à rencontre (ou « *encountered-type haptic displays* ») étendent l'idée des accessoires en la rendant compatible avec la simulation tactile ou haptique d'objets de grand taille, ou mobiles. Le principe en est toujours qu'un objet sert d'accessoire tactile, mais que celui-ci est monté sur une plateforme mobile permettant d'aller à la rencontre de la main ou d'une autre partie du corps de l'utilisateur lors de ses mouvements, et ainsi de pouvoir simuler des retours haptiques dans un espace de travail plus grand. La plateforme mobile peut être montée sur une structure robotisée (Huang *et al.*, 2020), voire un drone (Yamaguchi *et al.*, 2016).

#### - Pseudo Haptique

---

<sup>6</sup> Source : [https://lmts.epfl.ch/cms/site/lmts/lang/en/haptics\\_EM](https://lmts.epfl.ch/cms/site/lmts/lang/en/haptics_EM).

Le retour pseudo haptique (Lecuyer, 2009) permet de simuler des forces variables (ressorts, couples, poids) en jouant sur une illusion créée par une interaction multisensorielle, le plus souvent entre le retour visuel rendu en virtuel et l'action motrice de l'utilisateur sur un accessoire tangible. Le principe est que l'utilisateur maintient ou est en contact avec l'objet tangible, ce dernier est équipé d'un ou plusieurs capteurs d'effort, et les informations de pressions issues de ces capteurs sont utilisées pour contrôler un retour visuel à l'utilisateur. Ce retour visuel présente des mouvements virtuels sur les objets manipulés figurant les actions motrices de l'utilisateur. L'usage de gains de déplacement visuels plus ou moins élevés provoque, par une interaction visuelle-haptique, des actions motrices plus ou moins appuyées par l'opérateur. Ainsi, par le contrôle de ces gains, les forces ressenties par l'utilisateur peuvent être contrôlées informatiquement.

#### 2.3.3.4 Applications

Les applications combinant la réalité virtuelle et la réalité augmentée au retour d'effort sont très variées et vont des applications professionnelles aux applications grand public.

Dans le domaine de la santé, on peut citer :

- Les simulateurs dédiés à la formation, qui vont permettre à l'utilisateur d'acquérir des savoir-faire, des compétences, en reproduisant aussi fidèlement que possible des situations choisies et les perceptions correspondantes. C'est ainsi que le *LapSim® Haptic System* (cf. Figure 6) permet de s'entraîner à la chirurgie laparoscopique, pratique chirurgicale dans laquelle le chirurgien intervient à distance sur les organes (Hagelsteen *et al.*, 2019; Overtoom *et al.*, 2019). L'opérateur perçoit un retour haptique différencié *via* les différents instruments mis à sa disposition (e.g., joystick, pince) pendant qu'il s'exerce aux différentes étapes d'une intervention.
- Les applications dédiées à la rééducation sensorimotrice accordent une grande importance aux afférences (proprioceptives, visuelles, haptiques, auditives, ...) et les robots de rééducation qui produisent des retours visuels, auditifs et haptiques occupent une place de plus en plus grande sur les plateaux de rééducation. Par exemple, dans la rééducation du membre supérieur, on trouve le bras *Armeo®Spring* (cf. Figure 7). Embarqué sur un chariot de positionnement, il s'agit d'un exosquelette instrumenté de soutien et de mobilisation du membre supérieur qui peut s'adapter, en matière de retour d'effort et de complexité des activités *via* la réalité virtuelle, à la progression du patient.



Figure 6 : LapSim® Haptic System<sup>7</sup>.



Figure 7 : Armeo®Spring<sup>8</sup>.

Pour aller au-delà du monde de la santé, ces applications couplant réalité virtuelle et retour d'effort présentent un intérêt dans de nombreux autres domaines. En voici quelques exemples : dans l'art pour réaliser ou sentir des sculptures virtuelles ; dans les applications scientifiques pour « sentir » les interactions entre molécules ; dans la simulation de véhicules (avions, voiture, trains) qui vont être placés sur des plateformes à vérins pour restituer les mouvements ; dans la conception d'objets en vue de leur maintenance (par exemple un moteur de lève-vitre électrique) pour comprendre s'il sera possible de le changer aisément en cas de besoin.

---

<sup>7</sup> <https://surgicalscience.com/systems/lapsim/haptic-system/>.

<sup>8</sup> <https://www.hocoma.com/solutions/armeo-spring/>.

## 2.4 Contenu des environnements de réalité virtuelle et augmentée

Le contenu mis en scène dans les environnements de réalité virtuelle et augmentée revêt une importance particulière. Il peut être abordé selon trois angles : le contenu objectif des scènes avec lesquelles est amené à interagir le ou les utilisateurs dans le cadre de leur tâche ou de l'objectif poursuivi ; l'expérience subjective vécue par l'utilisateur au cours de et suite à l'utilisation de l'environnement virtuel ou de réalité augmentée. À un niveau plus fin, le contenu relève aussi des interfaces et de leurs règles d'utilisation telles qu'elles sont programmées par les concepteurs.

### 2.4.1 Le contenu en tant que stimuli objectivement perceptibles : composants de la scène, schéma narratif et représentation de l'utilisateur

Qu'il s'agisse de réalité virtuelle ou augmentée, les applications génèrent de façon dynamique une succession de stimuli objectivement perceptibles pour l'utilisateur au fur et à mesure de ses interactions et de sa progression dans la tâche. Ces stimuli peuvent figurer une représentation plus ou moins complète d'un environnement réel, une représentation symbolique ou modélisée d'un phénomène ou encore un environnement imaginaire. Les stimuli vont aussi différer sur le plan de la prépondérance de l'environnement physique ou des éléments engendrés par l'ordinateur, ainsi que sur la façon dont les deux s'imbriquent du point de vue de l'utilisateur. Il peut y avoir occultation partielle ou complète de l'environnement physique et cela sur l'une ou l'autre des modalités impliquées. Enfin, l'environnement a la possibilité d'être ou non partagé avec d'autres usagers *via*, par exemple, des avatars qui peuvent, le cas échéant, interagir entre eux.

Les stimuli utilisés sont par conséquent variés et dépendent notamment de l'objectif fonctionnel de l'application. Ils peuvent être décomposés en plusieurs éléments tels que la scène et le décor dans lesquels évolue l'utilisateur, les entités en présence, le scénario ou « l'intrigue » orchestrant le comportement de ces entités dans l'application concernée, la tâche et l'objectif proposés à l'utilisateur, etc. Par exemple, il peut s'agir d'une ville où rechercher un objet, d'un terrain de football avec des joueurs co-équipiers et des adversaires pour rejouer la dernière coupe du monde, d'un terrain d'entraînement pour l'intervention médicale en terrain d'opération, d'un corps humain dans lequel il s'agit de reconnaître les principales voies nerveuses pour apprendre l'anatomie, etc.

Il n'existe pas à notre connaissance de classification générale et admise des contenus. Néanmoins, certains domaines, tels que celui du jeu vidéo, proposent une classification du contenu en fonction de l'âge des utilisateurs<sup>9</sup>.

Ces composants peuvent eux-mêmes être décrits selon le forme de représentation, le niveau de détail, la fidélité sur le plan de la restitution sensorielle ou la vraisemblance sur le plan historique, le comportement adapté, etc.

Un composant central pour faciliter l'interaction avec l'application concerne la représentation des utilisateurs (souvent désignée sous le terme d'avatar lorsqu'il s'agit d'une représentation anthropomorphe), c'est-à-dire la (ou les) modalité(s) concrète(s) d'information fournie(s) en retour sur son action, sa position ou encore sur ses possibilités d'action dans l'application. Il existe de multiples façons de représenter les utilisateurs dans les environnements virtuels ou de réalité augmentée :

---

<sup>9</sup> Tous les jeux vidéo doivent comporter un logo indiquant la catégorie d'âge auxquels ils sont destinés. Le classement PEGI (*Pan European Game Information*) évalue le contenu violent ou choquant du jeu, et non la difficulté du jeu.

- dans la majorité des cas, il s'agit d'une représentation visuelle, qui peut prendre la forme d'un personnage humanoïde, d'une partie du corps humain (une main virtuelle par exemple), d'un outil (flèche, rayon, tournevis, pince etc.) affiché dans l'environnement, de la même façon que le curseur associé aux mouvements de la souris dans les applications de bureautique plus classique ;
- en l'absence d'une telle représentation visuelle, d'autres modalités sensorielles peuvent être mises à profit, notamment le recours à un retour haptique couplé à la scène, etc.

La représentation des utilisateurs peut avoir également pour fonction de fournir une information aux autres utilisateurs pour faciliter la coopération dans les environnements multi-utilisateurs.

Il est à noter que des représentations anthropomorphes peuvent être utilisées non pour représenter un utilisateur mais pour figurer des entités artificielles de l'application telles les agents logiciels, avec l'idée de faciliter ainsi l'interaction de l'utilisateur. C'est par exemple le cas des agents conversationnels souvent représentés par un personnage exhibant une apparence humaine, y compris sur le plan de certains comportements tels que le suivi oculaire, l'expression faciale, les gestes de communication non verbale, etc.

#### **2.4.2 Le contenu sous l'angle des règles d'utilisation et d'interaction proposées à l'utilisateur.**

L'utilisateur réalise les tâches prévues par le concepteur au moyen d'interfaces comportementales, qui sont la combinaison des règles d'utilisation du dispositif et des systèmes techniques et informatiques permettant de générer l'ensemble des stimuli. Les règles d'utilisation du dispositif définissent les actions requises dans l'application. Ces actions sont choisies et spécifiées par le concepteur de l'application de telle sorte à en faciliter l'identification et la réalisation par l'utilisateur. Pour cela, et dès lors qu'une action de référence bien connue de l'utilisateur existe dans le monde réel, l'approche adoptée consiste souvent à rechercher la similarité la plus élevée possible entre cette action de référence et l'action requise dans l'application. Bien qu'il s'agisse d'un continuum, on peut distinguer 3 niveaux de similarité entre l'acte interactif et l'action réelle :

- viser la réplique spatio-temporelle de l'action de référence opérée dans le monde réel afin de maximiser le transfert de la part de l'utilisateur. Par exemple, il s'agit de spécifier l'ouverture d'une porte en virtuel au moyen de la réalisation d'un geste similaire à celui effectué avec une porte réelle. Toutefois la réplique de toutes les dimensions de l'action n'est pas toujours possible selon les possibilités et contraintes des dispositifs d'interaction (congruence réel/virtuel, interaction naturelle (McMahan *et al.*, 2010), schème (Fuchs *et al.*, 2006)) choisis. Notamment pour cette raison, le transfert du geste réel dans le virtuel s'accompagne dans bien des cas d'une dégradation des conditions de réalisation et en affecte alors les caractéristiques ;
- viser une représentation métaphorique de l'action ; il s'agit alors de s'appuyer sur quelques traits représentatifs de l'action sans chercher à la reproduire fidèlement sur les plans spatial ou temporel (par exemple geste de plus faible amplitude en virtuel qu'en réel, rotation du poignet de gauche à droite pour déclencher l'ouverture d'une porte) ;
- choisir une représentation arbitraire de l'action de référence : il s'agit d'associer arbitrairement une autre action pour signifier l'action voulue (par exemple taper dans ses mains pour déclencher l'ouverture d'une porte).

Les pratiques des usagers, en fonction de leur appropriation du contenu généré par le dispositif, peuvent ou non être conformes aux règles et à la finalité initialement prévue par le

concepteur (soit en s'y conformant, soit en en détournant l'usage, provoquant, le cas échéant, des actions et des effets non prévus par les concepteurs des dispositifs d'interface ou de l'environnement virtuel ou augmenté.

### 2.4.3 Le contenu sous l'angle de l'expérience vécue par l'utilisateur

Les deux sections précédentes adoptent le point de vue extérieur d'un « observateur » pour décrire le contenu proposé à l'(inter)action de l'utilisateur. Complémentairement, il s'agit de considérer le contenu du point de vue de l'expérience effectivement vécue par l'utilisateur au cours et après l'usage d'un produit, d'un système ou d'un service.

La notion d'expérience vécue fait ici référence à ce que l'utilisateur perçoit, ressent (sensations perceptives, émotions), fait et interprète sur le moment, ainsi qu'après coup. De nature subjective, l'expérience vécue inclut une dimension cognitive et pragmatique (utilité, utilisabilité, performance), mais aussi une dimension corporelle et émotionnelle (Cahour, Salembier & Zouinar, 2016). Cette expérience, qui accompagne l'activité de l'utilisateur, est déterminée certes par le contenu objectif proposé en réalité virtuelle ou augmentée, mais également par le contexte physique et social (chez soi, en classe avec un enseignant, avec des pairs, le type de dispositif utilisé, le moment de la journée etc.) ainsi que les objectifs et les caractéristiques de la personne (capacités sensorielles et cognitives, expériences préalables, fatigue, etc.). Cette expérience est dynamique, suivant les fluctuations des pensées, des actions, des émotions et des sensations produites au cours de l'activité. Ainsi par exemple, l'expérience peut varier pour un même contenu « objectif » selon que l'utilisateur utilise un dispositif immersif ou un ordinateur de bureau. Les expériences antérieures peuvent aussi affecter l'expérience vécue au cours d'une exposition : une étude qualitative menée à l'éducation nationale rapporte par exemple un cas d'expérience d'angoisse et de panique vécue par une élève lors de son exposition à l'installation immersive « *The Enemy* » (récit à la première personne de plusieurs combattants de guerre mettant le spectateur en situation de face à face interactif avec chacun d'eux), du fait de l'écho avec son passé de réfugiée ayant vécue la guerre et la fuite dans son pays avant de venir en France). Si ce dernier type d'effet peut survenir quel que soit le média utilisé, les spécificités de certains dispositifs de la réalité virtuelle ou augmentée pourraient accroître l'intensité de l'expérience ainsi vécue.

Il est à noter que la notion d'expérience utilisateur (UX), issue de travaux en ergonomie de la conception et en psychologie de l'interaction entre personnes et ordinateurs<sup>10</sup> pour étendre le périmètre des études à d'autres dimensions que la seule utilisabilité, traduit une évolution des approches et des outils pour la conception centrée sur les utilisateurs afin de (mieux) prendre en compte les dimensions de l'expérience subjective au cours de et après l'usage. La mesure dans laquelle ces approches et outils atteignent cet objectif est cependant sujet à discussion, pour plusieurs raisons, dont le contour souvent flou et variable de la notion, suivant les auteurs et la discipline (design, psychologie, sociologie, marketing, etc.), et partant les propriétés des outils de recueil et d'analyse de cette expérience « utilisateurs ».

---

<sup>10</sup> Voir par exemple Tractinsky, N., Katz, A. S. & Ikar, D. (2000). What is beautiful is usable. *Interacting with Computers* 13(2), 127–145 ; Hassenzahl, LM. (2004). The interplay of beauty, goodness, and usability in interactive products. *Human-Computer Interaction*, 19(4), 319–349.

### 3 Législation applicable à la réalité virtuelle et/ou augmentée

Nous décrivons ici les enjeux juridiques liés à la réalité virtuelle et/ou augmentée (RV/RA). Actuellement, il n'existe pas en France de législation spécifique à la RV/RA, ainsi c'est le droit positif<sup>11</sup> qui s'applique.

Une définition officielle de la réalité virtuelle a été publiée au journal officiel en 2007<sup>12</sup> : « *Réalité virtuelle ou réalité de synthèse* : il s'agit d'un environnement créé à l'aide d'un ordinateur et donnant à l'utilisateur la sensation d'être immergé dans un univers artificiel ». Il n'existe pas de définition officielle pour la réalité augmentée.

Les questions juridiques qui se posent avec la RV/RA sont relatives :

- à la protection de la propriété intellectuelle (brevet, droits d'auteurs et marques) ;
- à la consommation (sécurité et responsabilité des produits dans leur usage physique, protection des utilisateurs) ;
- à la protection des données personnelles et au respect de la vie privée.

#### 3.1 Protection de la propriété intellectuelle

Les technologies de RV/RA sont régies par le Code de la propriété intellectuelle. La propriété intellectuelle couvre :

- la protection des éléments matériels du système de RV/RA et du logiciel associé pour faire fonctionner l'appareil de RV/RA et de tous les accessoires (gants, manette, combinaison...) ;
- la protection du monde virtuel créé ;
- la protection des objets dans ce monde (créés ou importés par l'utilisateur ou par le développeur de l'application).

#### 3.2 Sécurité des produits, protection des utilisateurs et responsabilité

Lors de l'usage d'applications de RV/RA, des situations particulières peuvent survenir, pouvant engendrer des accidents. La question se pose de savoir à qui incombe la responsabilité en cas d'accidents. Les situations accidentogènes peuvent en effet résulter de la conception des jeux.

Par exemple, dans le cadre du jeu intitulé « Pokemon Go », de nombreux joueurs auraient été signalés traversant la rue, sans regarder les voitures, pour attraper un Pokémon de l'autre côté de la rue ou d'autres entrant dans des jardins privés ; un Français a ainsi été interpellé sur une base militaire en Indonésie en 2016. Ont aussi été observées des chutes d'une falaise (Keidar *et al.*, 2017 ; The Independent, 2016) ainsi que des accidents de voiture (Prajapati, 2018; The Independent, 2016). Un propriétaire a fait usage d'une arme à feu sur un joueur qui

---

<sup>11</sup> Le « Droit positif » désigne, à un moment donné, l'ensemble des règles applicables dans un espace juridique déterminé qu'il s'agisse d'un État unitaire comme la France, ou d'un ensemble d'États comme la Communauté européenne.

<sup>12</sup> JORF n°93 du 20 avril 2007 page 7078 texte n° 84.

était entré dans sa propriété en Floride (Lemley et Volokh, 2018 ; Moran, 2016). Le jeu aurait aussi provoqué de nombreux vols de mobiles, voire des attaques de personnes dans des endroits peu sécurisés ou isolés où le jeu les aurait amenés pour capturer un Pokémon (Prajapati, 2018).

Parfois, l'apparition d'un Pokémon légendaire peut aussi provoquer des rassemblements massifs dans des endroits pas forcément adaptés, comme les gares, pouvant soulever des questions de sécurité. L'accumulation massive de joueurs sur un même lieu peut aussi endommager les lieux publics, comme ce fut le cas d'un parc à Milwaukee aux États-Unis. Les résidents proches du parc se sont aussi plaints des déchets, des embouteillages et des activités tard le soir.

Des plaintes pour irrespect ont été déposées contre la société *Niantic Labs* pour des Pokestops<sup>13</sup> placés dans des lieux sensibles comme des églises, les mémoriaux de guerre, le *Holocaust Memorial Museum* à Washington DC ou dans le *Hiroshima Peace Memorial Park* au Japon) (Keidar *et al.*, 2017, Wong, 2016 ; Mulkerin, 2016). Pokémon Go a aussi fait face à des contestations en Inde en plaçant des Pokémon en forme d'œuf dans les lieux de cultes alors que les Hindous et Jains sont pour la plupart végétariens.

La réalité virtuelle propose souvent à l'utilisateur de se déplacer de manière virtuelle dans des lieux publics ou privés. Il s'agit donc de prises de vues réelles (vidéo 360° par exemple). Se pose alors la question de la protection du droit à l'image des personnes qui sont filmées.

En France, aucun texte spécifique ne protège explicitement le droit à l'image. La jurisprudence a donc fait application de l'article 9 du Code civil qui protège le droit à la vie privée. Le consentement des personnes qui sont mises en scène devra donc être recueilli. En l'absence de consentement, l'atteinte à la vie privée peut faire l'objet de sanctions civiles comme pénales. L'article 226-1 du Code pénal dispose que le fait, au moyen d'un procédé quelconque, de porter volontairement atteinte à l'intimité de la vie privée d'autrui, notamment « *en fixant, enregistrant ou transmettant, sans le consentement de celle-ci, l'image d'une personne se trouvant dans un lieu privé* », est puni d'un an d'emprisonnement et de 45 000 euros d'amende.

### 3.3 La réglementation sur la protection de la vie privée et la sécurité des données personnelles

L'article 4 du Règlement général sur la protection des données (RGPD) dispose que « *toute information se rapportant à une personne physique identifiée ou identifiable* » est une donnée à caractère personnel. Cet article précise qu'une « *personne physique identifiable [est] une personne physique qui peut être identifiée, directement ou indirectement, notamment par référence à [...] des données de localisation, [...] ou à un ou plusieurs éléments spécifiques propres à son identité physique, physiologique, génétique, psychique, économique, culturelle ou sociale* ». La réalité virtuelle utilise l'expérience sensorielle et visuelle de l'utilisateur, enregistre sa manière de se déplacer, de converser, etc. Autant d'interactions personnelles qui doivent, de ce fait, être protégées pour éviter l'exploitation, voire la revente de ces données à des sociétés tierces.

Ainsi, et en application de l'article 5 du RGPD, les sociétés d'exploitation de ces programmes informatiques doivent s'assurer que les données à caractère personnel soient collectées pour une finalité (but, objectif) déterminée, explicite et légitime.

---

<sup>13</sup> Les *pokestop* sont des points fixes situés en France et dans le monde, symbolisés par des cubes bleus. Ils permettent de récupérer des objets utiles pour le jeu.

## 4 Immersion et interaction dans le monde virtuel et la réalité augmentée

### 4.1 Le système neurovégétatif : dualité et complémentarité de deux sous-systèmes

Au XIX<sup>e</sup> siècle, Bichat décrit un « autre » système nerveux qui préside à la vie interne « analogue à celle du végétal ». À la différence du système nerveux somatique spécialisé dans le contrôle volontaire des mouvements du corps, le système neurovégétatif (SNV), également appelé système nerveux « autonome, viscéral ou involontaire », coordonne et régule l'ensemble des fonctions automatiques de l'organisme. Ces fonctions, à l'exception de la respiration, échappent au contrôle de la volonté. Elles mettent en jeu de nombreux effecteurs : cœur, vaisseaux, poumons, tube digestif, muscles de la pupille, glandes endocrines et exocrines, peau, organes pelviens.

Le SNV comprend deux sous-systèmes, le sympathique et le parasympathique, qui s'opposent par :

- leur organisation anatomique ;
- les neuromédiateurs et les récepteurs mis en jeu ;
- mais aussi et surtout par les effets physiologiques qu'ils induisent.

Si ces effets physiologiques sont en tous points antinomiques, le résultat global de leurs actions complémentaires est d'assurer l'homéostasie, c'est-à-dire le « maintien de la constance du milieu intérieur » (Claude Bernard, 1878).

#### 4.1.1 Organisation anatomique

Dès 1716, l'anatomiste Winslow pointe le rôle d'un « grand nerf sympathique », en connexion avec la plupart des structures nerveuses de l'organisme et de ce fait chargé d'établir des influences mutuelles, ou « sympathies », entre les organes innervés. Il décrit le système sympathique comme constitué des chaînes nerveuses ganglionnaires positionnées de part et d'autre de la colonne vertébrale, auxquelles il attribue la capacité de relayer ces affinités. En 1903, Langley introduit le terme d'« innervations parasympathiques » afin de différencier le rôle des nerfs crâniens (parmi lesquels le nerf vague) de celui des nerfs sympathiques.

##### 4.1.1.1 Anatomie du système parasympathique

D'origine crânio-sacrée, les voies nerveuses parasympathiques sont composées de deux neurones successifs :

- le premier neurone a son corps cellulaire situé dans le bulbe (III<sup>e</sup>, VII<sup>e</sup>, IX<sup>e</sup>, et X<sup>e</sup> nerfs crâniens), ou bien dans les nerfs sacrés (racines S2, S3, S4) ;
- le second neurone a son corps cellulaire situé dans les ganglions parasympathiques qui constituent les relais entre les deux neurones. Ces ganglions étant souvent inclus dans l'organe effecteur, ce deuxième neurone est donc très court.

Près de 75 % des fibres parasympathiques empruntent le nerf vague ou pneumogastrique (X<sup>ème</sup> nerf crânien) qui innerve le cœur, les poumons, l'estomac, l'intestin grêle, le foie et le pancréas. Le III<sup>ème</sup> nerf crânien assure l'innervation parasympathique de la pupille, et les VII<sup>ème</sup> et IX<sup>ème</sup> nerfs crâniens celle des glandes lacrymales et salivaires.

Les II<sup>e</sup>, III<sup>e</sup>, et IV<sup>e</sup> nerfs sacrés innervent le colon et les organes pelviens.

#### 4.1.1.2 Anatomie du système sympathique

Thoraco-lombaire, le système sympathique est issu de la corne latérale de la moelle épinière dont il sort par la racine ventrale. Les fibres nerveuses sympathiques (1<sup>er</sup> neurone) gagnent ensuite des ganglions-relais à chaque segment vertébral de T1 à L2. Ces ganglions relais sont situés sur la face antéro-latérale des vertèbres, constituant ainsi deux chaînes latérales de part et d'autre de la colonne vertébrale. De là, les fibres sympathiques qui ne se destinent ni au thorax ni à la peau mais au pelvis continuent leur trajet pour rejoindre des ganglions pré-vertébraux situés à proximité des viscères pelviens (ganglions coélique, mésentérique supérieur et inférieur) (cf. Figure 8). Dans tous les cas, les effets physiologiques sur les organes cibles sont induits par les neurones post-ganglionnaires (2<sup>nd</sup> neurone) *via* des neuromédiateurs.

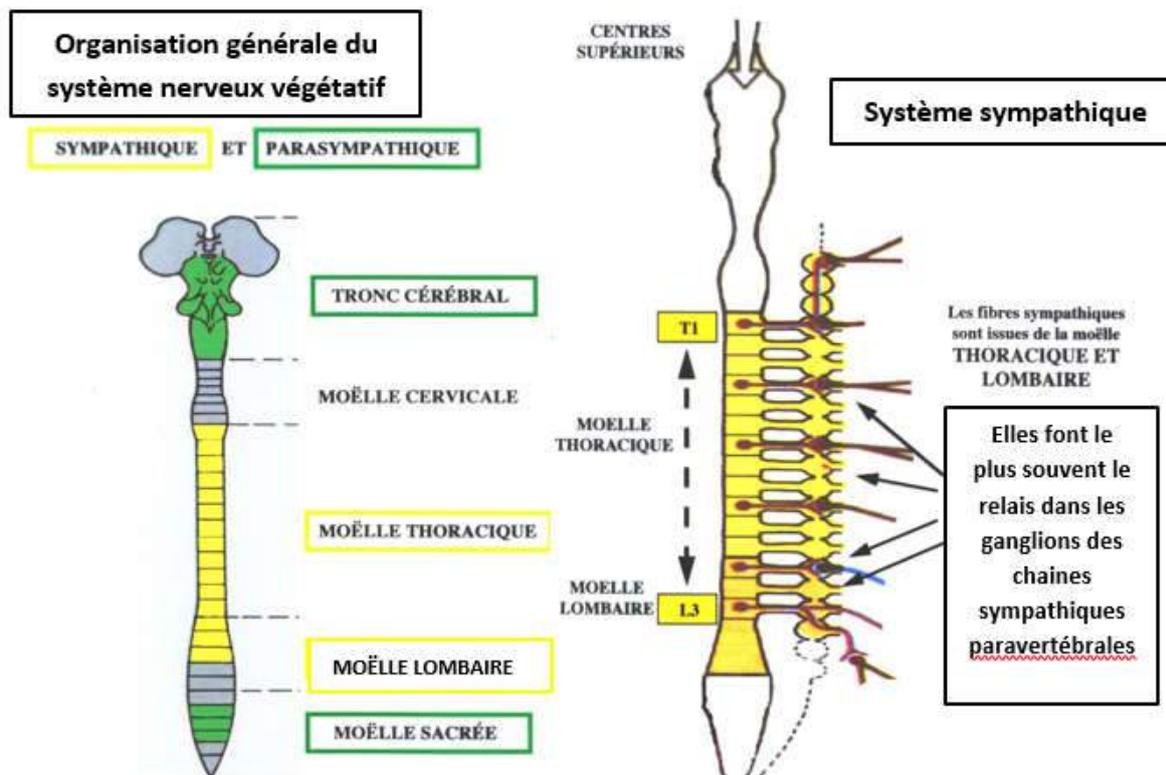


Figure 8 : Système sympathique et parasymphatique

### 4.1.2 Neuromédiateurs et récepteurs

#### 4.1.2.1 Neuromédiateur du système parasymphatique

Dans le système parasymphatique, à la fois le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>nd</sup> neurones sont cholinergiques :

- le 1<sup>er</sup> neurone libère de l'acétylcholine sur des récepteurs *nicotiques* localisés dans le ganglion parasymphatique (on les appelle ainsi car la nicotine est un agoniste de l'acétylcholine) ;
- le 2<sup>nd</sup> neurone libère de l'acétylcholine sur des récepteurs *muscariniques* localisés dans les organes cibles. Les récepteurs muscariniques possèdent deux types d'effet : inhibiteur ou excitateur.

#### 4.1.2.2 Neuromédiateurs du système sympathique

Le système sympathique est également appelé système nerveux *adrénergique*. Les catécholamines endogènes, médiateurs du système nerveux adrénérgique, comprennent la *noradrénaline* (norépinéphrine) et l'*adrénaline* (épinéphrine). Si elles diffèrent par leur lieu de synthèse – respectivement, les terminaisons des fibres nerveuses sympathiques post-ganglionnaires et les glandes médullo-surrénales - leurs structures chimiques dérivent toutes de l'acide aminé tyrosine. Stimulées par des fibres sympathiques issues du ganglion pré-vertébral coélique, les médullo-surrénales déversent dans la circulation sanguine l'adrénaline en quantités faibles à l'état basal. La dégradation des catécholamines dans la circulation sanguine est beaucoup plus lente que dans le système nerveux sympathique, expliquant une durée d'action jusqu'à dix fois plus longue.

La noradrénaline et l'adrénaline induisent leurs effets en agissant sur des récepteurs qui leur sont propres :

- récepteurs alpha-1, localisés dans les glandes salivaires et les muscles lisses (parois des vaisseaux périphériques, sphincters digestifs et urinaires, muscle dilatateur de la pupille) ;
- récepteurs alpha-2, localisés dans le système nerveux central ;
- récepteurs bêta-1, situés au niveau du myocarde ;
- récepteurs bêta-2, situés au niveau des bronches, du tube digestif, de la paroi de l'utérus, du foie et du pancréas.

Il existe des interactions préférentielles entre type de catécholamines et type de récepteurs adrénérgiques :

- adrénaline : récepteurs  $\beta 1$  et  $\beta 2$  à faibles doses, récepteurs  $\alpha$  à fortes doses ;
- noradrénaline : récepteurs  $\alpha$  (grande affinité), récepteurs  $\beta 1$ .

#### 4.1.3 **L'hypothalamus et le cortex limbique**

L'activité des systèmes nerveux sympathique et parasympathique est régulée par les structures limbiques, hypothalamiques et du tronc cérébral au moyen de communications avec les neurones préganglionnaires sympathiques et vagues.

L'hypothalamus reçoit de nombreuses afférences de l'hippocampe et du subiculum, des noyaux amygdaliens, de l'habenula, de la rétine, de certaines régions du cortex et de nombreuses régions du tronc cérébral. Un bon nombre de ces afférences sont issues du système limbique et du tronc cérébral.

Le rôle de l'hypothalamus est de contrôler le milieu viscéral et les sécrétions neuroendocriniennes *via* les hypophyses antérieure et postérieure (*cf.* Figure 9).

Les régions hypothalamiques postérieure et latérale sont particulièrement impliquées dans les réponses sympathiques, de mise en activité et les états d'alerte. Les régions hypothalamiques antérieure et médiale sont plus particulièrement impliquées dans les réponses parasympathiques (*cf.* Figure 10). Beaucoup de ces activités sont coordonnées *via* le faisceau longitudinal dorsal et d'autres voies descendantes. L'hypothalamus donne naissance à un réseau efférent extrêmement étendu et envoie également des projections directes et indirectes vers les neurones préganglionnaires des systèmes nerveux sympathique et parasympathique, vers de nombreux noyaux autonomes et viscéraux et vers la formation réticulaire du tronc cérébral.

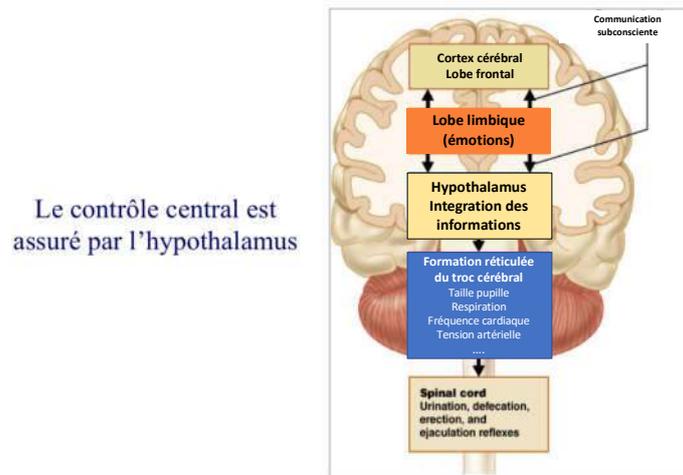


Figure 9 : Rôle de l'hypothalamus.

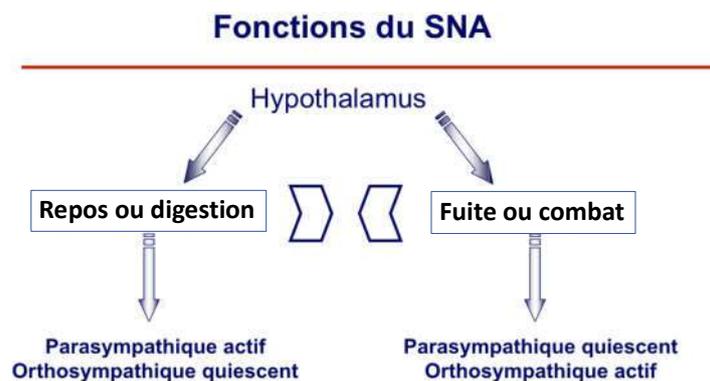


Figure 10 : Fonctions du système nerveux autonome ou SNA.

#### 4.1.4 Effets physiologiques

Le système neurovégétatif contrôle l'ensemble des grandes fonctions automatiques de notre organisme que sont la circulation, la respiration, la digestion, la thermorégulation, et l'excrétion. Alors que le système nerveux parasympathique est un système régénérateur, freinant les fonctions automatiques afin de reconstituer les réserves métaboliques, le système sympathique est un système de mise en tension et d'alerte permettant d'augmenter rapidement le rendement corporel dans les situations d'urgence et de stress.

Quel que soit l'effet exercé par un système sur un effecteur donné, l'autre système a souvent l'effet opposé. Les systèmes sympathique et parasympathique sont activés de façon réciproque : quand l'activité d'un système augmente, celle de l'autre diminue.

##### 4.1.4.1 Effets du système parasympathique

Le système parasympathique est *trophotrope*, c'est-à-dire favorisant un état physiologique de repos et de relaxation au cours duquel l'organisme retrouve ses équilibres. Son activation se traduit par une diminution du métabolisme avec un ralentissement du rythme cardiaque et

respiratoire, une activation des glandes salivaires et de la digestion, ainsi qu'une augmentation des apports sanguins aux tractus digestif et urinaire.

Les effets des stimulations de l'acétylcholine sur les récepteurs muscariniques des principaux organes cibles sont présentés dans le Tableau 2 suivant.

**Tableau 2 : Effets des stimulations de l'acétylcholine sur les récepteurs muscariniques des principaux organes cibles.**

Organes innervés	Effets
<b>Œil</b> Sphincter de l'iris	Contraction ⇒ myosis actif
<b>Cœur</b>	Tonus vagal (bradycardie)
<b>Poumons</b>	Bronchoconstriction
<b>Vaisseaux sanguins</b>	Vasodilatation
<b>Glandes exocrines</b>	↗ de toutes les sécrétions exocrines
<b>Tube digestif</b>	Tonus parasympathique (↗ du péristaltisme gastro-intestinal)
<b>Vessie</b>	↗ de la motilité vésicale

#### 4.1.4.2 Effets du système sympathique

Le système sympathique est *ergotrope*, c'est-à-dire producteur d'énergie, ce qui permet à l'organisme de s'adapter à toutes les situations d'alerte : accélération du cœur (tachycardie), augmentation du tonus sympathique vasoconstricteur, dilatation de la pupille, diminution de l'activité digestive, et forte mobilisation du stock énergétique (surtout sous l'effet de l'adrénaline).

La stimulation des récepteurs catécholaminergiques par un agoniste induit les effets récapitulés dans le Tableau 3 suivant.

**Tableau 3 : Effets de la stimulation des récepteurs catécholaminergiques.**

Organes innervés	Récepteurs impliqués	Effets
<b>Système nerveux central</b>	$\alpha_2$	↗ éveil ↗ attention ↗ émotions
<b>Œil</b> Muscle dilatateur de l'iris Muscle ciliaire du cristallin	$\alpha_1$ $\beta_2$	Contraction ⇒ mydriase active Relâchement ⇒ vision nette de loin

Organes innervés	Récepteurs impliqués	Effets
<b>Cœur</b>	$\beta_1$ $\beta_1$ $\beta_1$ $\beta_1$	Inotrope $\Rightarrow$ $\nearrow$ force contractile du myocarde Chronotrope $\Rightarrow$ $\nearrow$ fréquence cardiaque Dromotrope $\Rightarrow$ $\nearrow$ vitesse de conduction auriculo-ventriculaire Bathmotrope $\Rightarrow$ $\nearrow$ excitabilité ventriculaire (effet arythmogène)
<b>Rein</b>	$\beta_1$	Sécrétion de rénine $\Rightarrow$ $\nearrow$ pression artérielle
<b>Poumons</b>	$\beta_2$	Bronchodilatation
<b>Vaisseaux sanguins</b>		
Peau	$\alpha_1$	Vasoconstriction
Muscles	$\alpha_1$	Vasoconstriction
Coronaires	$\alpha_1$	Vasoconstriction
	$\beta_2$	Vasodilatation <i>prédominante</i>
<b>Peau</b>	$\alpha_1$ $\alpha_1$	Sudation Pilo-érection
<b>Glandes salivaires</b>	$\alpha_1$	Sécrétion d'un mucus visqueux Sécheresse buccale (effet $\alpha_2$ central)
<b>Tube digestif</b>		
Paroi (muscles lisses)	$\beta_2$	$\searrow$ du péristaltisme intestinal
Sphincters	$\alpha_1$	$\nearrow$ tonus sphinctérien
<b>Vessie</b>		
Paroi vésicale (détrusor)	$\beta_2$	Relâchement
Sphincter	$\alpha_1$	$\nearrow$ tonus sphinctérien
<b>Utérus gravide</b>	$\beta_2$	Relâchement
<b>Organes génitaux masculins</b>	$\alpha_1$	Contraction vésicules séminales
<b>Effets métaboliques</b>		
Tissu adipeux	$\beta_1$	Lipolyse $\Rightarrow$ $\nearrow$ acides gras
Foie	$\beta_2$ $\beta_2$	Glycogénolyse $\Rightarrow$ hyperglycémie Néoglucogenèse $\Rightarrow$ hyperglycémie
<b>Pancréas endocrine</b>	$\beta_2$	$\nearrow$ sécrétion insuline

En thérapeutique, par exemple, on utilise l'adrénaline (agoniste alpha et bêta) pour son effet inotrope positif et la vasoconstriction périphérique qu'elle entraîne. C'est le traitement de première intention du choc anaphylactique et de l'arrêt cardiaque.

#### 4.1.5 Dysfonctionnements

La dystonie neurovégétative ou dysautonomie est un dérèglement global du système neurovégétatif qui peut aller :

- dans le sens d'une hyperexcitabilité du système nerveux parasympathique et d'un hyperfonctionnement du nerf vague (parasympathicotonie ou vagotonie) ;
- ou dans le sens d'un hyperfonctionnement du système sympathique (sympathicotonie).

Si certaines dysautonomies peuvent être primitives – c'est le cas par exemple de l'hypotension orthostatique idiopathique –, elles sont le plus souvent secondaires à une pathologie préexistante, dont la plus fréquente est le diabète. Les dysautonomies secondaires sont également observées dans diverses affections du système nerveux central et périphérique :

- neuropathie diabétique ;
- polyradiculonévrites inflammatoires (syndrome de Guillain-Barré) ;
- paraplégies et tétraplégies ;
- polynévrites alcooliques.

Les signes cliniques observables en cas de dysautonomie sont listés dans le Tableau 4 suivant.

**Tableau 4 : Signes cliniques liés au dysfonctionnement du système neurovégétatif.**

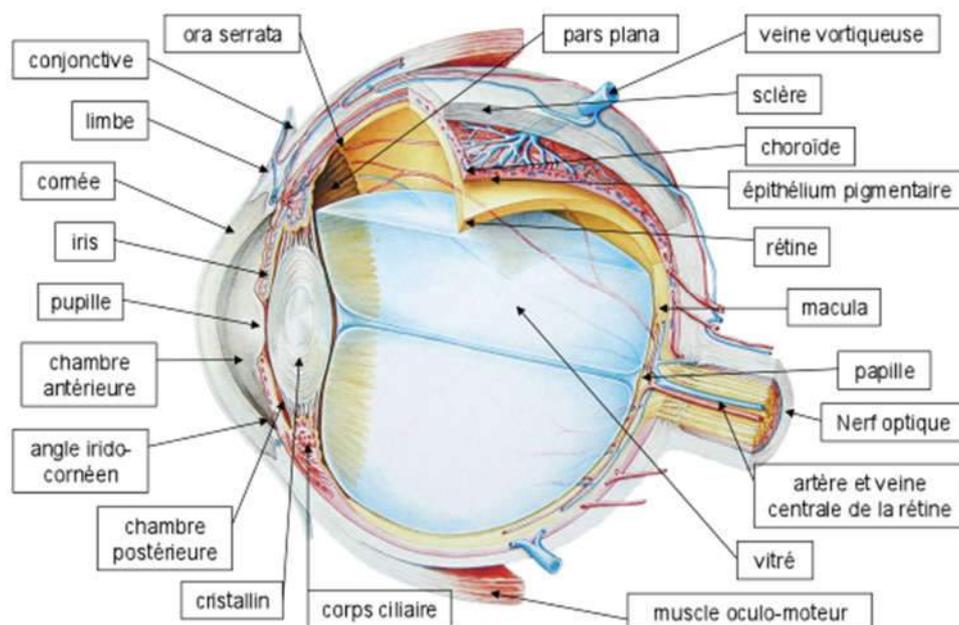
Organes concernés	Symptômes
<b>Système nerveux central</b>	Troubles du sommeil Fatigue
<b>Œil</b>	Troubles de la motilité pupillaire et de l'accommodation
<b>Cœur</b>	Bradycardie ou tachycardie
<b>Poumons</b>	Difficultés respiratoires
<b>Vaisseaux sanguins</b>	Hypotension orthostatique, sensation de malaise Céphalées, sensations vertigineuses Troubles de la circulation cutanée (marbrures, syndrome de Raynaud) Contractures musculaires Fourmillements (visage, bouche, lèvres, membres)
<b>Peau</b>	Anhydrose ou hypersudation
<b>Glandes lacrymales &amp; salivaires</b>	Syndrome sec avec bouche et yeux secs
<b>Tube digestif</b>	Troubles digestifs (constipation, diarrhée, maux de ventre, ballonnements abdominaux)
<b>Tractus urinaire</b>	Incontinence ou rétention urinaire
<b>Organes génitaux masculins</b>	Troubles sexuels, impuissance

La noradrénaline (agoniste alpha prédominant) agit préférentiellement sur les récepteurs alpha. La vasoconstriction périphérique induite est recherchée dans le traitement du choc septique.

## 4.2 Perception visuelle

### 4.2.1 Rappels sur l'anatomie de l'œil humain

L'œil est un organe complexe composé de nombreuses structures (cf. Figure 11). Les fonctions de deux d'entre elles sont présentées succinctement ci-dessous : le cristallin et la rétine. De plus amples détails sur l'anatomie de l'œil sont disponibles dans le rapport de l'Anses relatif aux « effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique 3Ds » (Anses 2014).



**Figure 11 : Anatomie de l'œil humain.**

Le cristallin est une lentille dont la fonction dans la vision est l'accommodation. En effet, il peut se déformer pour permettre la mise au point sur un élément de la scène visuelle regardée. Le mécanisme d'accommodation est décrit de façon plus approfondie dans le rapport de l'Anses relatif aux « effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique 3Ds » (Anses 2014).

La rétine est la tunique la plus interne de l'œil. Elle permet notamment d'adapter le flux lumineux entrant dans l'œil en participant au contrôle du diamètre de la pupille. La portion centrale de la rétine est dédiée à la détection fine et sa partie périphérique à la détection des objets en mouvement, sans qu'ils soient nécessairement identifiés.

L'œil est relié par le nerf optique au système nerveux qui assure le traitement de l'information visuelle. Le premier temps de ce traitement consiste en la transformation de chacun des paramètres visuels monoculaires en provenance de chaque œil en paramètres binoculaires. Au terme de ce traitement, les processus cognitifs permettent la « compréhension » de la scène visuelle ainsi que la mise en œuvre des réponses motrices et oculomotrices, automatiques ou volontaires, destinées à améliorer la mise au point et l'orientation du regard sur un élément de la scène visuelle.

## 4.2.2 La vision binoculaire

### 4.2.2.1 Principe

La vision binoculaire nécessite que chaque œil ait une acuité visuelle « satisfaisante » témoignant d'une normalité oculaire, des voies visuelles ainsi que des structures visuelles corticales. Elle impose également un bon équilibre oculomoteur permettant un alignement des objets perçus sur des points réiniens correspondants (cf. Figure 12). En effet, la vision binoculaire repose sur la mise en jeu de ces points réiniens correspondants, puisque le premier temps consiste en la stimulation de ceux-ci au niveau de la rétine de chacun des deux yeux. Leur message est ensuite transmis de façon monoculaire jusqu'au cortex cérébral, au niveau duquel est réalisée l'intégration binoculaire.

Pour plus de détails, le principe de la vision binoculaire est approfondi dans la rapport de l'Anses relatif aux « effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique 3Ds » (Anses 2014).



Figure 12 : Objet observé et points réiniens correspondants.

### 4.2.2.2 Mécanismes moteurs soutenant la vision binoculaire

Pour explorer le monde visuel tridimensionnel, apprécier avec précision l'emplacement des obstacles lors de notre navigation dans l'espace, réaliser des activités de lecture ou de travail sur écran, un bon fonctionnement des mouvements de nos deux yeux est indispensable. Plusieurs mouvements oculaires permettent de réaliser ces opérations :

- les mouvements directionnels latéraux, verticaux ou obliques pour modifier la direction du regard ;
- les mouvements de vergence pour modifier la profondeur de la vision.

Les mouvements directionnels (latéraux ou verticaux) sont réalisés par des saccades oculaires qui sont les mouvements les plus rapides dont le corps humain soit capable, mais aussi les plus robustes et résistants à l'âge et à la fatigue.

Pour régler l'angle des axes optiques selon la profondeur à laquelle se situe l'objet que nous souhaitons regarder, nos yeux effectuent des mouvements dits de vergence (en direction opposée pour les deux yeux) ; les yeux convergent pour fixer un objet proche et ils divergent pour fixer un objet lointain. Les mouvements de vergence sont particulièrement fragiles, affectés par la fatigue, l'âge, les médicaments et toute atteinte neurologique, même modérée (Ciuffreda *et al.*, 2007), (Ciuffreda *et al.*, 2008), (Leigh *et al.*, 2006). Leur dysfonctionnement peut être à la source d'une fatigue visuelle, de céphalées ou encore de troubles d'équilibre, voire de chutes (Matheron et Kapoula, 2008), (Matheron *et al.*, 2011), (Matheron *et al.*, 2008).

Le plus souvent, les objets sont placés à des directions et distances différentes et la fixation d'un objet à l'autre requiert des mouvements combinant à la fois saccades et vergence. Ainsi, le véritable moteur de l'exploration de l'environnement visuel 3D et de vision binoculaire est le mouvement combiné, autrement dit, la synergie entre saccades et vergence.

Les caractéristiques des mouvements des saccades et de la vergence sont décrites plus en détails dans le rapport de l'Anses relatif aux « effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique 3Ds » (Anses 2014).

#### 4.2.2.3 La diplopie et la confusion

La diplopie est définie par la perception dédoublée d'un objet isolé. La confusion correspond à une mauvaise localisation dans l'espace d'un objet. La Figure 13 ci-dessous précise ces notions :

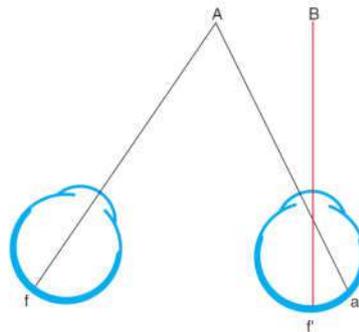


Figure 13 : Diplopie et confusion

- diplopie : l'image du point A se forme sur la rétine de l'œil gauche (en f) et sur un point non concordant de l'œil droit (point a') ;
- confusion : les rétines de l'œil gauche (f) et de l'œil droit (f') ne perçoivent pas le même objet.

#### 4.2.2.4 Disparité binoculaire ou parallaxe binoculaire

Les deux yeux présentent un écart horizontal au niveau du crâne. Celui-ci est variable selon les sujets, de l'ordre de 6,5 centimètres en moyenne. Chaque œil voit donc un même objet selon un angle légèrement différent ou selon une perspective légèrement différente. Cette différence de perception crée des disparités binoculaires : la disparité horizontale et la disparité verticale.

La disparité horizontale correspond à la composante horizontale de la disparité binoculaire. Elle constitue le *stimulus* essentiel de la vision stéréoscopique. Cette dernière se réfère strictement à la capacité dont dispose le système visuel pour percevoir le relief et la profondeur à l'aide de la vision binoculaire.

#### 4.2.2.5 Fusion et rivalité binoculaires

La rivalité binoculaire survient quand les images rétinienne présentent une différence importante. Etant donné que le système visuel humain ne peut pas fusionner deux informations différentes, l'image perçue est une image double contenant des informations des deux images stéréoscopiques superposées. Son corollaire est généralement une extinction d'une des deux images ou de portions d'images incohérentes.

En situation naturelle, la rivalité binoculaire peut apparaître en cas de diplopie (vision double). Celle-ci est généralement due à des difficultés à conserver l'alignement des deux yeux.

#### 4.2.2.6 Conclusion sur la vision binoculaire

Nombreuses sont les populations présentant des troubles de la coordination binoculaire des mouvements et de la vergence, et ceci à tout âge. La vergence couplée de façon naturelle avec les saccades et l'accommodation est le pilier de la vision active, motrice du monde visuel tridimensionnel réel ou virtuel. Comme tous les dispositifs de restitution stéréoscopique, les visiocasques d'aujourd'hui rompent la relation entre accommodation et vergence chez l'humain, phénomène plus ou moins bien supporté dans le temps (cf. rapport et avis de l'Anses relatifs aux « effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique 3Ds »). Qui plus est, l'accommodation et la vergence sont des actions « temps-réel » de l'être humain tandis que, dans le meilleur des cas, le point d'accommodation et la vergence peuvent être réglés avant une séance d'immersion sur un visiocasque.

### 4.2.3 Développement visuomoteur chez l'enfant : développement visuel et perception spatiale

#### 4.2.3.1 Le développement visuel normal

Les capacités visuelles dépendent du développement normal neurologique et oculaire. Elles reposent sur l'acquisition des différents éléments que sont la vision centrale, la vision binoculaire et stéréoscopique, l'emmétropisation, la vision des couleurs, la vision des contrastes, la vision photopique et scotopique et l'oculomotricité (saccades, poursuite, vergences, fonction vestibulo-oculaire). À l'image de la croissance générale de l'enfant, ces acquisitions visuelles s'effectuent par étapes avec une progression non linéaire. Des facteurs extrinsèques peuvent participer au développement visuel, comme la nutrition et en particulier les acides gras à longue chaîne.

Le développement visuel est incomplet à la naissance. Il procède de deux composantes à la fois oculaire et neurologique. Après la naissance, même pour les enfants nés à terme, la maturation visuelle est influencée par de nombreux facteurs dont la stimulation visuelle.

Durant les premières années de vie, il existe des périodes critiques du développement visuel qui, si elles sont perturbées, peuvent résulter en un handicap visuel à long terme. Les nourrissons et les enfants sont donc particulièrement susceptibles de développer des anomalies visuelles, si les conditions optimales du développement visuel ne sont pas réunies.

Le développement visuel est détaillé dans le rapport de l'Anses relatifs aux « effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique 3Ds » (Anses 2014).

#### 4.2.3.2 Récapitulatif des âges clef du développement visuel

Les tableaux ci-dessous (cf. Tableau 5 au Tableau 8) récapitulent quelques âges clef du développement visuel pour différents aspects : la maturation des globes oculaires, l'emmétropisation, le développement de l'accommodation, de la binocularité, de la stéréoaocuité et la maturation des voies visuelles.

**Tableau 5 : Maturation des globes oculaires.**

<b>Maturation des globes oculaires (Brémond-Gignac <i>et al.</i>, 2011 ; Rigaudière <i>et al.</i>, 2012)</b>	
Diamètre antéro-postérieur	17 mm en moyenne à la naissance 20,8 mm vers 2 ans Croissance quasi-définitive vers 4 ans : 22-24 mm
Cornée	11 mm en moyenne à la naissance 11,5 mm vers 2 ans
Cristallin	6 mm en moyenne à la naissance 8 mm vers 10 ans 8,5 mm à vers 20 ans
Volume du globe	Le volume double entre la naissance et environ 2 ans Facteur 2,5 entre la naissance et l'âge adulte

**Tableau 6 : Emmétropisation à la fin de la deuxième année.**

<b>Emmétropisation à la fin de la deuxième année</b>	
Amétropie sphérique	Hypermétropie possible jusqu'à 3 ans puis emmétropisation atteinte avant 10 ans (Atkinson <i>et al.</i> , 2007)
Astigmatisme	Existe fréquemment la première année de vie et diminue fortement vers 18 mois (Atkinson <i>et al.</i> , 1980)

**Tableau 7 : Développement de l'accommodation, de la binocularité et de la stéréoaocuité.**

<b>Développement de l'accommodation, de la binocularité et de la stéréoaocuité</b>	
Estimation de l'accommodation	Mécanisme d'accommodation-vergence semblable à celui de l'âge adulte vers 3-4 mois (Banks, 1980), poursuite de l'amélioration jusqu'à 6 mois (Bobier <i>et al.</i> , 2000) Accommodation importante pendant la petite enfance : 6 à 10 dt vers 5 ans puis 5 à 8 dt vers 10 ans pour diminuer de 0,3 dt par an (Anderson <i>et al.</i> , 2008)
Axes visuels	S'alignent vers 3-4 semaines, fixation ou reprise de fixation possible dès l'âge de 2 mois
Binocularité	Apparaît vers la fin du 1 <sup>er</sup> ou du 2 <sup>ème</sup> mois. Vers les 3 premiers mois, elle correspondrait plus à une combinaison non sélective de l'image corticale provenant d'un œil ou de l'autre (Rigaudière <i>et al.</i> , 2012), la fusion binoculaire s'établit vers l'âge de 3 mois (Birch <i>et al.</i> , 1992 ; Pigassou-Albouy, 2000)

<b>Développement de l'accommodation, de la binocularité et de la stéréocuité</b>	
Stéréocuité	<p>La vitesse de progression de la vision stéréoscopique en fonction de l'âge est difficile à apprécier et il existe de nombreuses données contradictoires. Il est bien établi que la vision stéréoscopique s'améliore rapidement au cours des deux premières années de la vie (Ciner <i>et al.</i>, 1996).</p> <p>Mais certains auteurs estiment que le seuil de la vision stéréoscopique normale se situe vers 300 à 250 secondes d'arc aux alentours de l'âge de 18 mois. Mais, pour ces mêmes auteurs, la vision stéréoscopique présenterait une phase rapide de maturation au-delà de cet âge, maturation qui amènerait la vision stéréoscopique à des valeurs voisines de celles de l'adulte.</p> <p>Ainsi, à 30 mois, la vision stéréoscopique est en moyenne voisine de 125 secondes d'arc. À l'inverse, d'autres auteurs évoquent une possibilité de maturation beaucoup plus rapide de la vision stéréoscopique chez le jeune enfant, celui-ci pouvant avoir une stéréoscopie de l'ordre de 1 000 secondes d'arc vers 6 mois et 120 à 100 secondes d'arc dès 1 an. Au-delà, ces auteurs estiment une stéréocuité de l'ordre de 50 secondes d'arc comme étant normale à 24 mois (Birch et Salomao, 1998).</p>

**Tableau 8 : Maturation des voies visuelles.**

<b>Maturation des voies visuelles</b>	
Voies de conduction	Largement dépendante de l'exposition à la lumière pour les voies de conduction et le cortex visuel primaire (Vital-Durand, 1983)
Nerf optique	La myélinisation du nerf optique commence dès la naissance, augmente rapidement jusqu'à 2 ans (Magoon et Robb, 1981) et se poursuit jusqu'à 10-11 ans
Corps géniculé latéral	Atteint son volume adulte vers l'âge de 6 mois, évolution des neurones géniculés jusqu'à 9 mois (De Courten et Garey, 1983)
Voies M et P	Voie M : maturité vers la fin de la 2 <sup>ème</sup> année (Rasengane <i>et al.</i> , 1997), voie P : maturité vers 10-11 ans (Gordon et McCulloch, 1999)
Cortex visuel primaire	Volume atteint sa taille adulte vers 4 mois, stabilisation du nombre de synapses par neurone vers l'âge de 11 ans

Ces données ont été regroupées sous la forme d'un tableau global exposé ci-dessous (cf. Figure 14).

Tableau présentant les âges moyens des périodes de maturation du système visuel

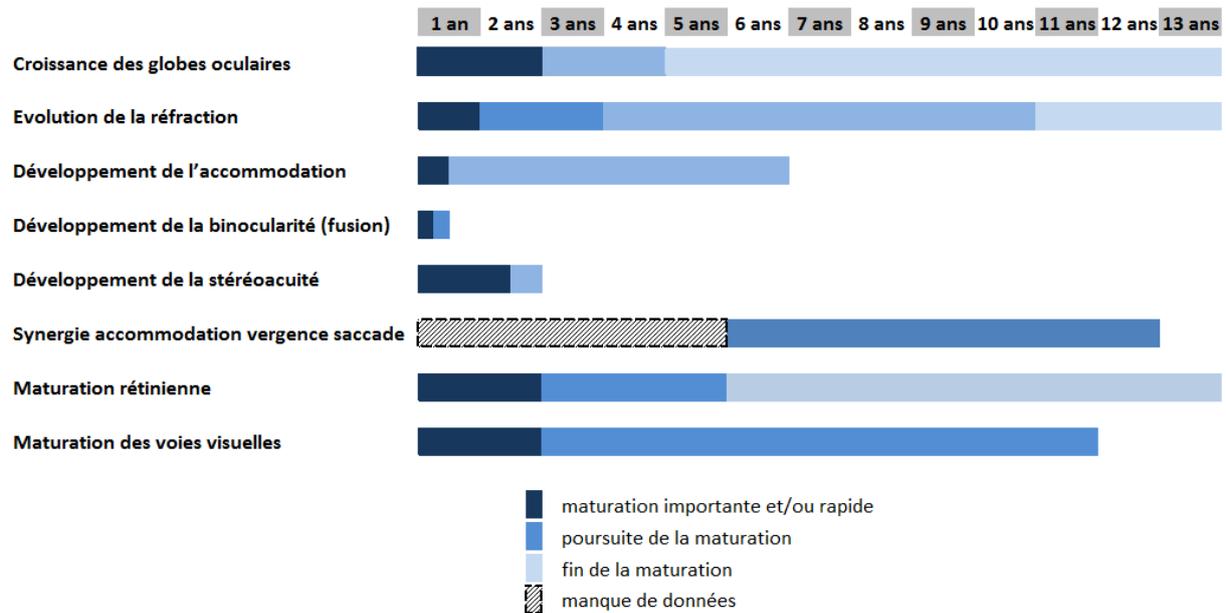


Figure 14 : Âges moyens des périodes de maturation visuelle.

## 4.3 Perception auditive

### 4.3.1 Description générale de l'audition

L'audition est la fonction sensorielle qui permet d'entendre les sons. Le son est la conséquence de vibrations de l'air ambiant :

- captées par l'oreille externe ;
- transmises par l'oreille moyenne puis encodées dans la cochlée et le nerf auditif (cf. Figure 15) ;
- décodées par le cerveau.

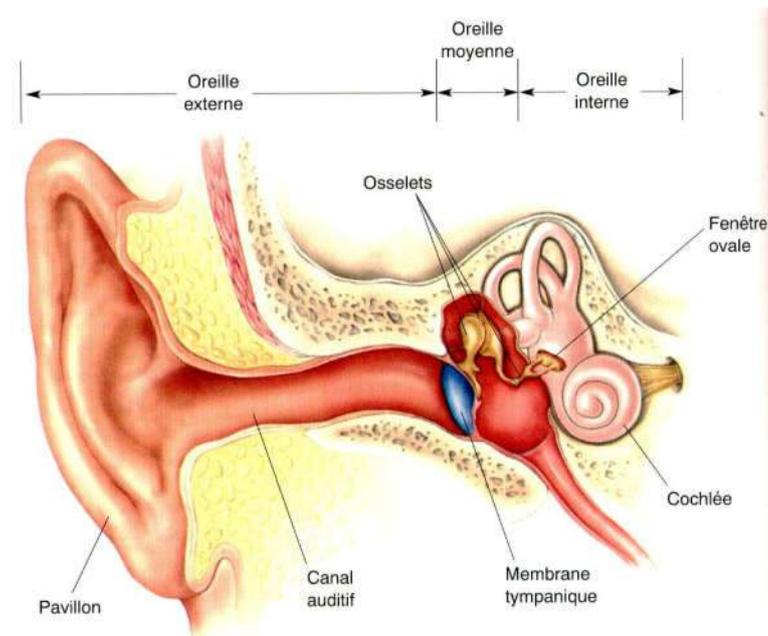


Figure 15 : Compartiments de l'appareil auditif périphérique.

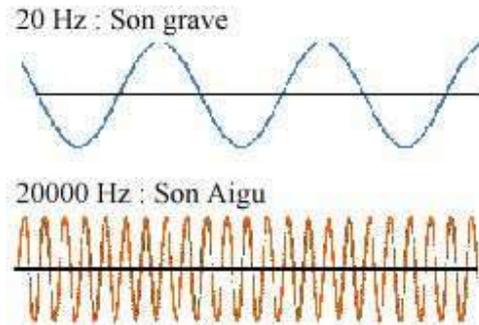
Chaque son est caractérisé par :

- l'amplitude de la vibration sonore (intensité en décibels « *sound pressure level* » : dB SPL)

$$\text{Intensité (dB SPL)} = 20 \log (\text{Pression} / \text{Pression de référence})$$

$$\text{Pression de référence} = 20 \mu\text{Pa}$$

- le nombre de vibrations par seconde (fréquence en Hertz : Hz). Ainsi, un son de basse fréquence est perçu grave alors qu'un son de haute fréquence est perçu aigu (cf. Figure 16).



**Figure 16 : Différence physique entre son grave et son aigu pour une même amplitude de vibration.**

Depuis la cochlée, l'information sonore est véhiculée jusqu'au cerveau par les voies auditives afférentes (cf. Figure 17).

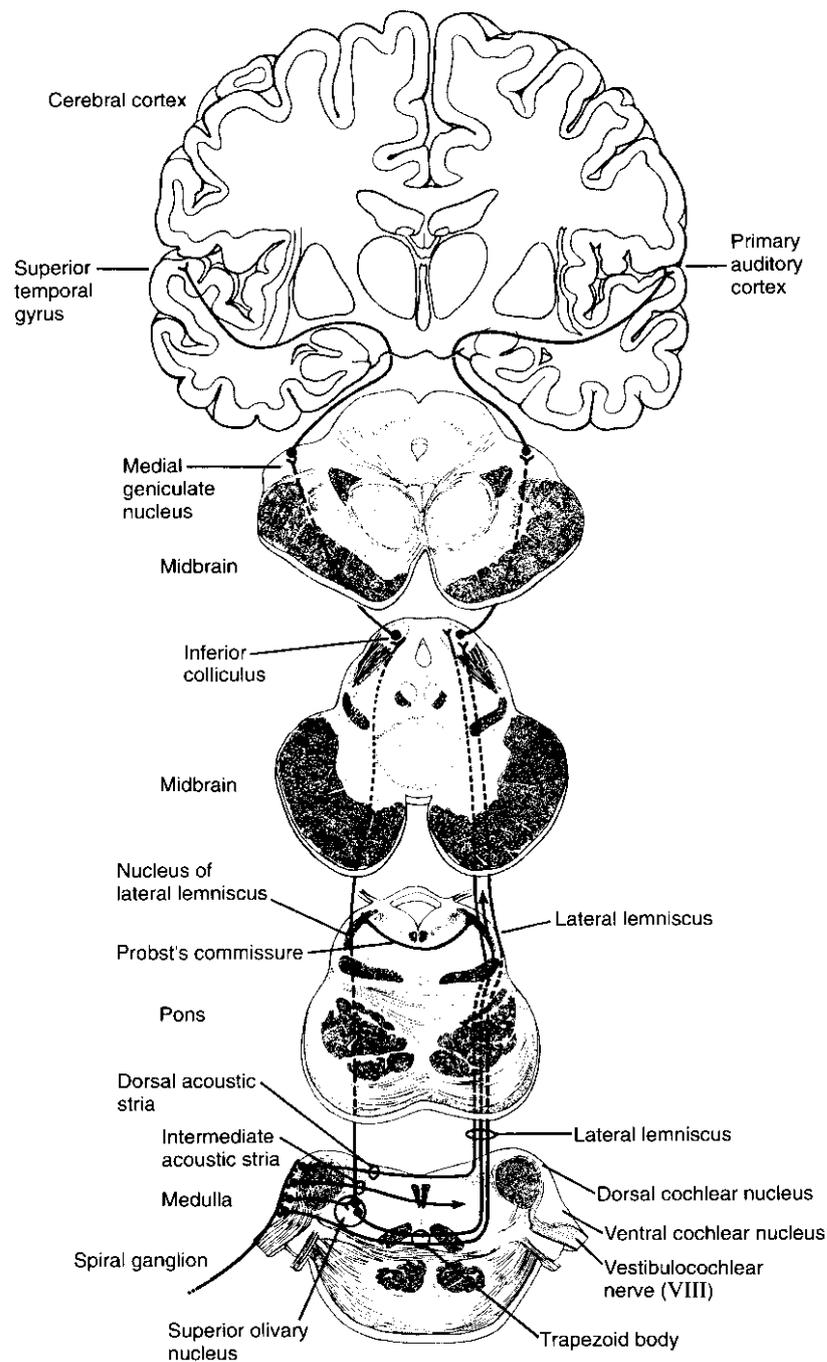


Figure 17 : Représentation des voies auditives afférentes.

#### 4.3.2 Description de la notion de seuil perceptif et de la perception de l'intensité sonore

Selon la loi de Weber-Fechner, les seuils différentiels de perception de l'intensité sonore sont constants et la sensation auditive varie comme le logarithme de l'excitation. Il en résulte une échelle logarithmique de représentation de la perception sonore, utilisée lorsqu'on réalise un audiogramme (cf. Figure 18).

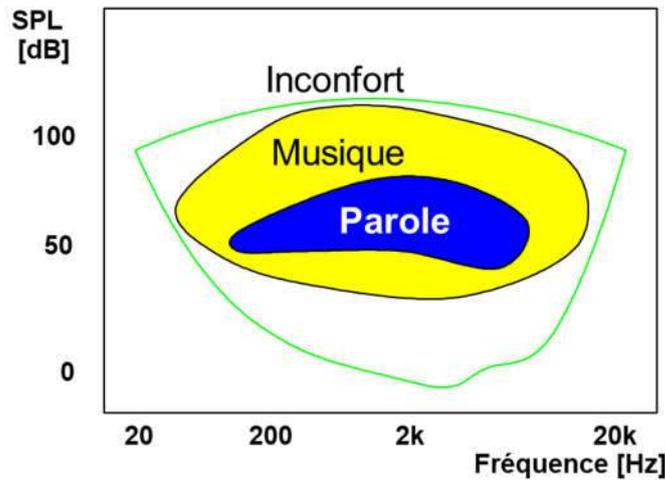


Figure 18 : Champ auditif humain.

Pour une fréquence sonore donnée, on appelle seuil auditif tonal la plus petite intensité sonore capable de générer une perception (cf. Figure 19).

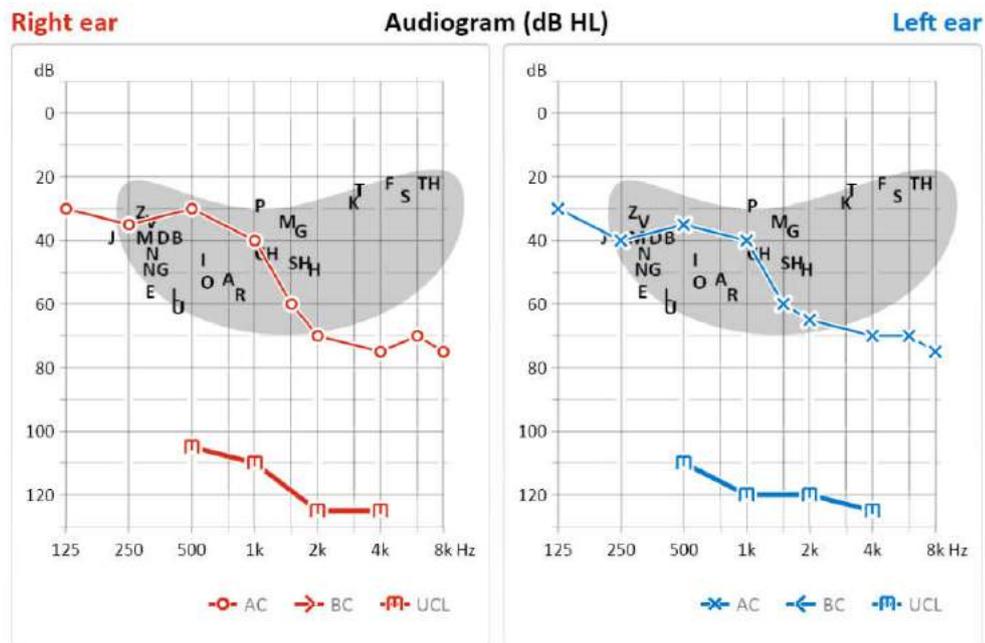


Figure 19 : Représentation d'un audiogramme en pratique clinique.

Sont mesurés les seuils de détection en conduction aérienne (AC), en conduction osseuse (BC) ainsi que les seuils maximums de confort (UCL)

#### 4.4 Perception tactile, haptique et kinesthésie

Les sensations tactiles que nous percevons lorsque nous entrons en contact avec un objet, ou le manipulons, sont issues d'informations générées par des récepteurs sensoriels situés dans la peau, les muscles et les tendons. Leur rôle est de transformer des phénomènes physiques (vibration, étirement, pression, chaleur) en des signaux électriques destinés à notre

système nerveux central qui génère par la suite les perceptions associées à notre interaction tactile avec le monde physique. Les récepteurs cutanés dédiés au toucher et à la pression sont appelés mécanorécepteurs. La proprioception est assurée par des récepteurs musculaires et articulaires (les propriocepteurs). Enfin, les stimuli potentiellement dangereux (chaleur ou froid extrême, douleur), relèvent des nocicepteurs. Nous présentons par la suite ces récepteurs sensoriels et les phénomènes physiques spécifiques qu'ils captent. Par ailleurs, la question des seuils de perception est très intéressante à considérer, en particulier dans le contexte de la réalité virtuelle. Le seuil de perception absolu est la valeur minimale perceptible d'un stimulus. Le seuil de perception relatif est défini comme la plus petite variation d'un stimulus que l'on peut percevoir, la variation d'une force par exemple, ou la position d'un de nos membres. C'est une information importante dans le domaine de la réalité virtuelle dans la mesure où elle est de nature à influencer le choix ou la conception des interfaces. En effet, il serait inutile de mettre en place un système à retour d'effort permettant de représenter des variations de forces inférieures au seuil de perception humain : celles-ci ne seraient tout simplement pas perçues. Nous mentionnons donc par la suite, quand elles sont disponibles, les données expérimentales de seuils de perception.

### ***Toucher***

En ce qui concerne le toucher, différents types de mécanorécepteurs existent et possèdent des caractéristiques différentes qui conditionnent le type de stimuli qu'ils captent. Parmi les caractéristiques importantes, il faut noter leur profondeur dans le derme, leur champ récepteur (zone de captation à la surface de la peau), leur concentration (supérieure dans certaines zones comme la pulpe des doigts). Il faut noter également qu'elles diffèrent selon leur type de réponse : à adaptation rapide (détection de variations) ou lente (la réponse dure jusqu'à la fin du stimulus, ils détectent donc la pression continue). Les corpuscules de Meissner sont associés aux sensations de toucher léger, de textures fines et variables. En effet, leurs caractéristiques s'y prêtent : ils sont à réponse rapide, sont situés dans la partie supérieure du derme et ont un champ récepteur de petite taille. On les retrouve sur toute la peau, et sont plus concentrés sur la pulpe des doigts ou les lèvres. Les corpuscules de Pacini (à réponse rapide, ils captent donc les vibrations, de l'ordre de 60 à 300 Hz) et de Ruffini (à réponse lente, ils captent donc une pression constante) sont situés plus profondément dans le derme et ont donc un champ réceptif plus grand. Les cellules de Merkel sont à réponse lente, proches de la surface, et donc aussi dévolues à la sensation de pression continue (*cf.* Figure 20). Enfin, les récepteurs du follicule pileux situés à la base des poils sont à même de capter des mouvements de ceux-ci, et sont donc responsables, par exemple, de la sensation du vent qui souffle sur la peau.

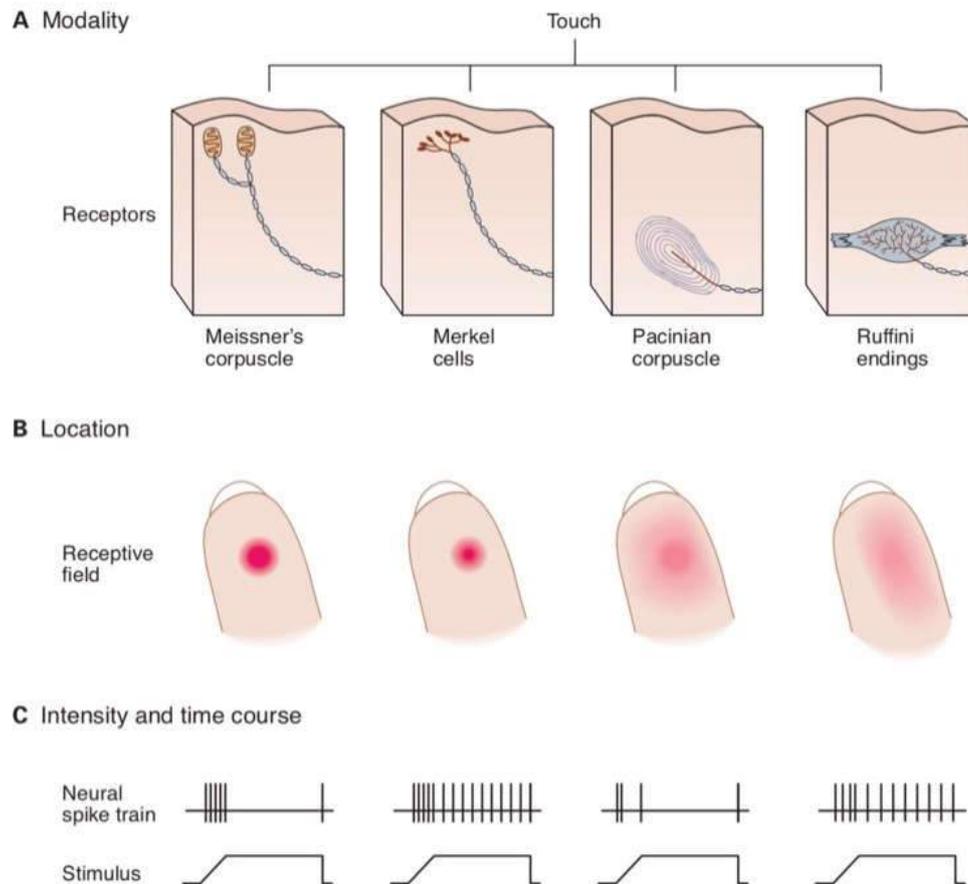


Figure 20 : Les différents types de récepteurs cutanés responsables des sensations tactiles.

Source : Barrett et al., 2012

### Proprioception

La proprioception est la perception consciente de la configuration spatiale de nos membres, des forces qui leur sont appliquées et des sensations d'effort. Elle participe également aux sensations d'équilibre conjointement avec le système vestibulaire, ainsi qu'au guidage du mouvement et de la posture (Proske et Gandevia, 2012). Les récepteurs qui fondent la proprioception sont situés dans les muscles et les tendons. Le fuseau neuromusculaire est sensible à l'allongement et aux contractions du muscle dans lequel il est situé. L'organe tendineux de Golgi renvoie lui une information sur la force exercée par ou sur le muscle. Les étirements et déformations de la peau (captés notamment par les corpuscules de Ruffini, dédiés aux sensations tactiles) semblent aussi participer de la proprioception (Kuling et al., 2016).

Sur la question des seuils de perception de déplacements des membres, un premier niveau d'analyse est celle de la compréhension du sens de déplacement d'un membre : dans quelles conditions (vitesse, déplacement angulaire) détecte-t-on correctement la direction (flexion ou extension) ? Pour le déterminer, on peut imposer un mouvement contrôlé sur un membre et demander aux sujets d'annoncer quand ils perçoivent un déplacement et d'indiquer sa direction (Kuling et al., 2016). Le seuil est défini comme la variation du stimulus générant une certaine proportion de réponses correctes (arbitrairement : 70 %). Une observation générale est que les seuils sont inférieurs sur les articulations proximales (proches du tronc : bras), comparativement aux articulations distales (loin du tronc : poignets, doigts). La seconde observation est que le seuil diminue lorsque la vitesse de déplacement du membre augmente. Pour l'avant-bras, le seuil est de  $0,2^\circ$  pour une vitesse angulaire de  $1^\circ/s$ , et est 8 fois supérieur ( $1,6^\circ$ ) pour une vitesse de  $0,1^\circ/s$  (Kuling et al., 2016). Concernant les seuils relatifs de

mouvement, position et force, se référer au Tableau 9 qui donne une vue globale (il s'agit de moyennes sur différents membres et vitesses de déplacement).

**Tableau 9 : Seuils relatifs de perception, en moyenne sur différents membres, du mouvement, de la position et de la force.**

Variable	Résolution	Seuil différentiel
Mouvement	0,5°-1° (vitesses angulaires entre 10-80°/s)	8 % (entre 4 et 19 % suivant les membres)
Position	0,8-7° (sur l'étendue totale de déplacement)	7 % (entre 5 % et 9 %)
Force	0,06 N	7 % (entre 5 % et 12 %)

Le seuil relatif correspond à la variation minimale du stimulus que l'humain perçoit (la résolution est une mesure de cette variation en unités SI, le seuil différentiel présente la variation comme un pourcentage du stimulus initial). Remarque : les seuils de position sont mesurés en utilisant un déplacement très lent, contrôlé par un actionneur non visible des sujets, donnant l'impression au sujet que son membre ne bouge pas (*i.e.* des vitesses de l'ordre de (1-4°/min).

### Température

La perception de température s'appuie sur des récepteurs cutanés, proches des capillaires sanguins. Ces récepteurs ont la particularité de ne pas être aussi structurés que les organes décrits précédemment (au même titre que les nocicepteurs décrits dans le paragraphe suivant). Ils se présentent simplement sous la forme de neurones dont la partie sensible sont les dendrites (on parle de terminaison nerveuse libre). Ceux sensibles au chaud sont localisés dans l'épiderme (proche de la surface) et sont sensibles à des températures entre 30°C et 46°C. Les récepteurs du froid sont inactifs à 40°C, la fréquence des signaux qu'ils envoient augmente lorsque la température descend jusqu'à 24°C environ, pour à nouveau décroître de 24°C à 10°C. En dessous de 10°C ces récepteurs sont inactifs, et le froid devient un anesthésique local. La perception de température est relative, et dépend notamment de la situation initiale avant l'exposition au stimuli : rentrer dans une pièce dont l'air est à 20°C procure une sensation différente s'il gèle à l'extérieur ou si c'est la canicule. « *La sensation de froid ou de chaud apparaît à condition que les variations de température soient au moins de 6 °C par minute. Si la variation de température est plus lente, l'écart thermique peut devenir très important avant que nous ne ressentions un changement de température* » (Rose, 2016).

### Nociception

Les sensations relatives aux événements potentiellement nocifs ou douloureux, et donc aux événements physiques dont les caractéristiques sont extrêmes relativement à la norme, sont regroupés sous le terme générique de nocicepteurs, il s'agit de terminaisons nerveuses libres. Les nocicepteurs mécaniques répondent à une pression importante (objet pointu, incisions sur la peau), les nocicepteurs thermiques répondent à des températures supérieures à 46°C ou inférieures à 10°C.

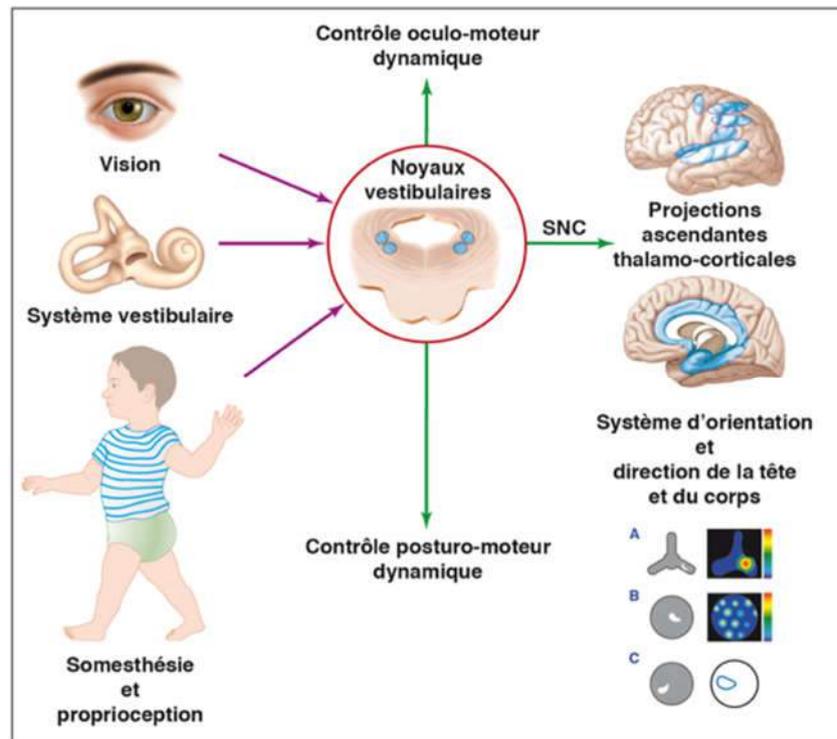
## 4.5 Perception vestibulaire

### 4.5.1 Embryologie

Le vestibule, organe de l'équilibre, se développe durant les 3 premiers mois de grossesse à partir de la placode otique, tout comme la cochlée, organe de l'audition. Les fonctions auditives et vestibulaires sont étroitement liées et permettent, *via* un épithélium sensoriel similaire

composé de cellules liées, de transmettre au système nerveux central sous forme de signaux électriques les sons (au niveau de la cochlée) ainsi que les vitesses des mouvements de rotation et de translation de la tête, dont la force gravitaire (au niveau du vestibule).

Alors que la cochlée termine sa maturation à 7 mois et demi de grossesse, le vestibule est mature dès le 3<sup>ème</sup> mois de grossesse. Tout au long de la vie, il gardera la même structure avec laquelle il participe à l'intégration multi sensorielle nécessaire au contrôle oculomoteur et posturo-moteur dynamique (cf. Figure 21).

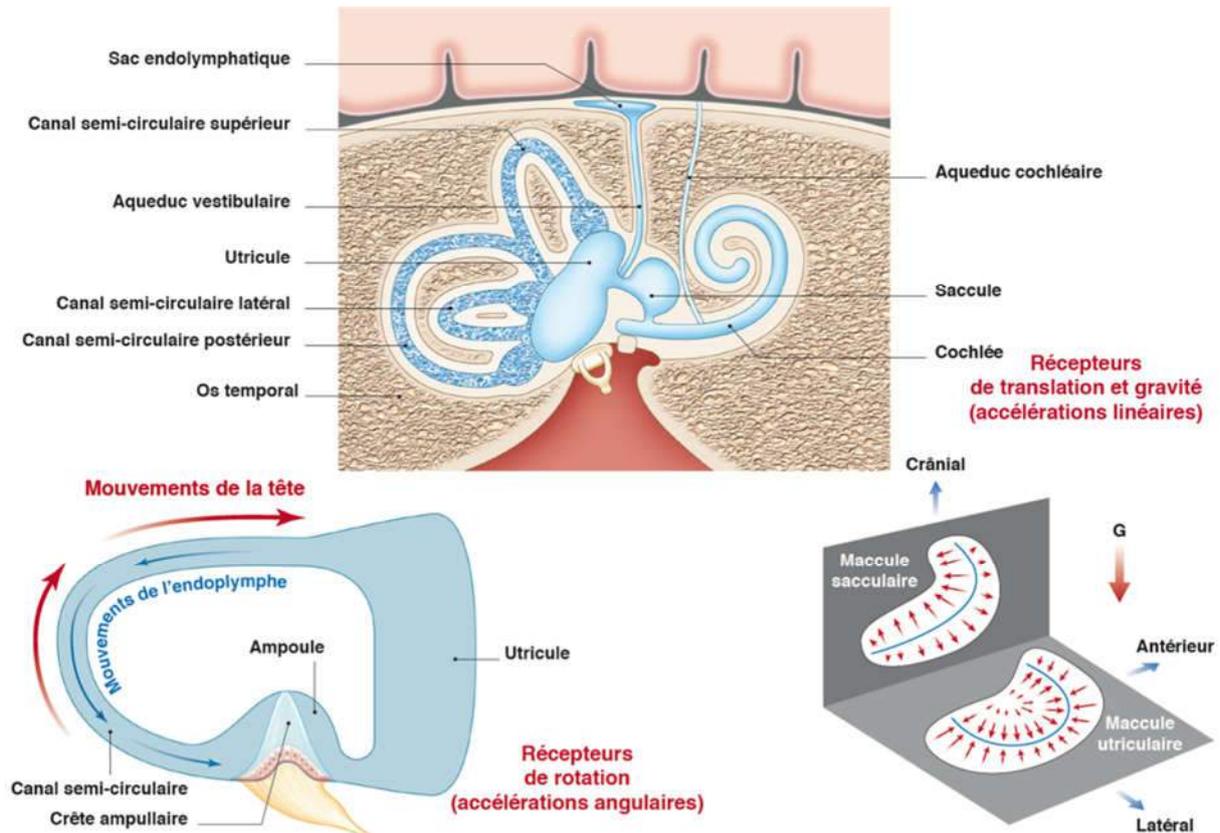


**Figure 21 : L'équilibre est le résultat d'une intégration d'informations multi sensorielles de mouvements et de position : visuelles, vestibulaires et somesthésiques (sensibilité superficielle et profonde).**

Cette intégration débute dès le premier relais du tronc cérébral (au niveau des noyaux vestibulaires) et se poursuit tout au long des voies descendantes vers la moelle et ascendantes vers le cortex. Les informations vestibulaires sont notamment essentielles à la représentation spatiale du corps et de l'espace.

#### 4.5.2 Fonctions du système vestibulaire

Le système vestibulaire situé dans l'oreille interne (cavité creusée dans l'os de la base du crâne) est composé de plusieurs sacs en communication les uns avec les autres : le saccule, l'utricle et trois canaux de forme semi-circulaire ; l'ensemble contient le liquide endolympatique (cf. Figure 22).



**Figure 22 : Schéma du système vestibulaire et de ses composantes.**

Les canaux semi-circulaires sont orientés perpendiculairement les uns aux autres, chacun dans un des trois plans de l'espace : antérieur, postérieur et latéral. Lors des mouvements de rotation dans chacun de ces plans, la force inertielle est responsable d'un déplacement du liquide endolymphatique de sens inverse dans le canal correspondant, qui est détecté par les cellules ciliées regroupées en forme de crête (crête ampullaire) à une extrémité du canal. C'est ainsi que les canaux semi-circulaires renseignent sur les mouvements de rotation dans les plans antérieur, postérieur, et latéral.

Au niveau de l'utricule et du saccule, les cellules ciliées sont regroupées dans des zones appelées macules qui sont orientées respectivement dans le plan horizontal et le plan vertical et impliqués dans la détection des mouvements d'accélération linéaire et la perception de la gravité (cf. Figure 23). Les macules otolithiques sont recouvertes d'une substance gélatineuse contenant des cristaux de carbonate de calcium, les otolithes ou otoconies, qui augmentent leur sensibilité à la gravité.

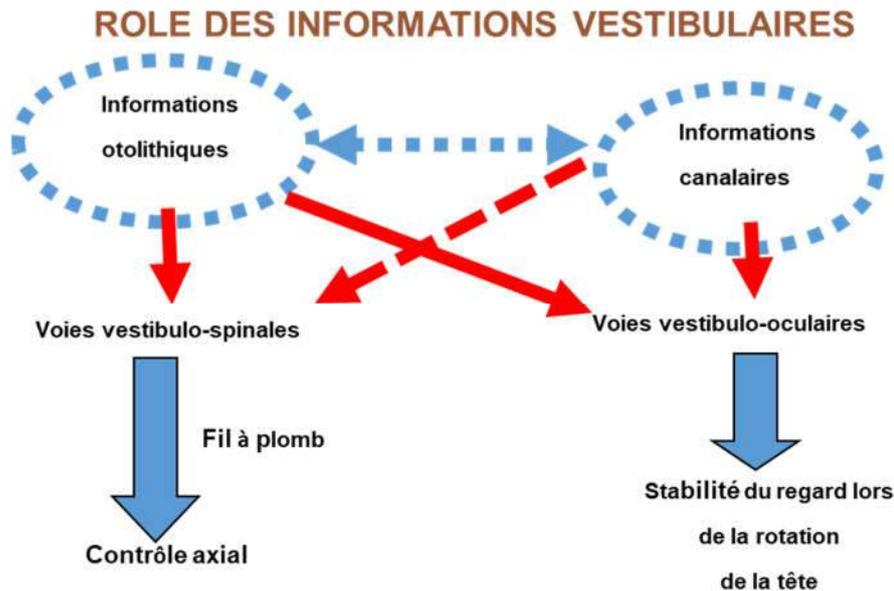


Figure 23 : Rôle des informations vestibulaires.

#### 4.5.3 Rôle du système vestibulaire dans le développement

C'est seulement en cas d'intégrité des informations vestibulaires que peuvent s'observer les étapes suivantes du développement de l'enfant :

- tenue de tête : 3 à 4 mois ;
- tenue assise (tripode) : 5 à 6 mois ;
- debout avec support : 10 mois ;
- marche autonome : moins de 18 mois ;
- réflexe de parachute, chutes avec anticipation.

Le développement de l'équilibre, qui fait intervenir les informations vestibulaires, visuelles et somesthésiques, s'organise durant les 12 premières années de la vie. Une réorganisation des informations multi-sensorielles doit être constamment remise à jour pour s'adapter à la croissance du corps mais aussi à la croissance en taille et caractéristiques réfractives des yeux. L'information vestibulaire est la référence la plus stable puisqu'elle ne change pas tout au long de la vie.

L'utilisation d'écran par des enfants très jeunes et tout au long de la vie joue un rôle important sur l'intégration multi-sensorielle et peut limiter les activités physiques, qui sont le moyen essentiel pour la mise en place et la mise à jour de cette intégration multi-sensorielle, donnant par ailleurs un poids anormalement important aux informations visuelles. On peut penser que l'immersion dans des environnements virtuels va dissocier les informations multi-sensorielles et les détacher de l'environnement réel au cours du développement. Ceci pourrait avoir un effet néfaste sur le développement de l'équilibre chez l'enfant et au cours de la vie sur le maintien d'un équilibre parfait.

On constate depuis une dizaine d'années que l'utilisation des petits écrans vidéo forçant la convergence oculaire rendent symptomatiques des imperfections du système oculomoteur qui restaient très bien tolérées auparavant (Wiener-Vacher *et al.*, 2019).

## 4.6 Perception olfactive

Les molécules odorantes volatiles sont transportées dans l'air inspiré jusqu'au neuroépithélium olfactif, par voie directe orthonasale ou par voie rétronasale (*via* le nasopharynx) lors de la consommation d'aliments ou de boissons. On considère que 10 à 20 % de l'air inspiré parvient jusqu'à la fente olfactive. L'épithélium olfactif se situe au niveau de la lame criblée de l'ethmoïde, dans la fente olfactive, mais également dans la partie supérieure du septum nasal, le long des faces médiales et supérieures des cornets supérieurs et moyens. Il s'agit d'un épithélium pseudostratifié qui contient des cellules basales, des cellules de soutien, des glandes de Bowman et des cellules sensorielles que sont les neurones olfactifs primaires.

Les substances odorantes, généralement hydrophobes, se lient à des molécules de transport appelées *Odorant Binding Protein* qui ont pour rôle de faciliter le transport des odorants à travers le mucus pour leur permettre d'atteindre les récepteurs olfactifs.

La molécule odorante se fixe alors à un récepteur transmembranaire spécifique situé à la surface des cils au niveau du dendrite du neurone olfactif primaire.

Chaque neurone olfactif primaire exprime un seul type de récepteur olfactif et chaque récepteur olfactif peut reconnaître plusieurs odeurs différentes. Une molécule odorante peut se lier à plusieurs récepteurs. Les gènes codant pour les récepteurs olfactifs constituent une grande famille de gènes qui représentent environ 3 % de l'ensemble du génome humain (900 gènes). Les récepteurs olfactifs appartiennent à la famille des récepteurs couplés aux protéines G. La fixation d'une molécule odorante sur un récepteur olfactif entraîne la stimulation d'une protéine G qui active une adénylate cyclase responsable de la production d'adénosine monophosphate (AMP) cyclique. L'AMP cyclique induit l'ouverture de canaux ioniques entraînant un influx de calcium. Le calcium permet à son tour l'ouverture de canaux ioniques favorisant ainsi la sortie d'ion chlorure. Ceci entraîne une dépolarisation du neurone olfactif primaire, qui génère un potentiel d'action dont la fréquence dépend de la concentration du stimulus. Cette étape de transformation d'un stimulus chimique en un signal électrique, qui sera ensuite transmis jusqu'au cerveau, est appelée la transduction.

Les axones des neurones olfactifs primaires traversent la lame criblée et réalisent une synapse avec les dendrites d'autres neurones au niveau des glomérules du bulbe olfactif (les cellules mitrales et les neurones à panache). Tous les axones d'un même glomérule proviennent de neurones olfactifs primaires exprimant le même récepteur. Les axones des cellules mitrales et des neurones à panache forment le tractus olfactif latéral qui se projette principalement ipsilatéralement au cortex olfactif primaire. Le cortex olfactif primaire comprend le cortex piriforme, le noyau olfactif antérieur, le tubercule olfactif, l'amygdale et le cortex entorhinal. Le cortex olfactif secondaire comprend l'hippocampe, l'hypothalamus, le thalamus, le cortex orbitofrontal et le cervelet. Ces différentes structures au sein des cortex olfactifs primaires et secondaires sont reliées entre elles.

## 4.7 Description des conflits « intra-sensoriels » en conditions d'immersion

### 4.7.1 Conflits spécifiques au système visuel

#### 4.7.1.1 Contrainte sur la synergie entre accommodation et vergence

En conditions naturelles, lorsque l'observateur fixe un point en profondeur, la distance d'accommodation et la distance de vergence sont les mêmes. Les mécanismes d'accommodation et de vergence opèrent donc conjointement et de manière coordonnée, la synergie entre ces deux mécanismes s'affinant avec le développement du système visuel. En condition d'interfaçage 3Ds, la distance d'accommodation, celle à laquelle le cristallin doit

s'adapter pour former une image nette sur le fond de l'œil est toujours celle de l'écran (cf. Figure 24). La distance de vergence, en revanche, dépend de la profondeur à laquelle se trouve l'objet virtuel que l'observateur veut fixer. Pour voir net l'objet d'intérêt, l'observateur sera donc amené à dissocier l'effort d'accommodation de celui de vergence, allant ainsi à l'encontre de la synergie normalement développée au cours de l'apprentissage visuel et oculomoteur.



**Figure 24 : Distances d'accommodation et de vergence en situation naturelle (à gauche) et en situation d'interfaçage 3Ds (à droite).**

#### 4.7.1.2 Contraintes sur la synergie entre vergence et saccades

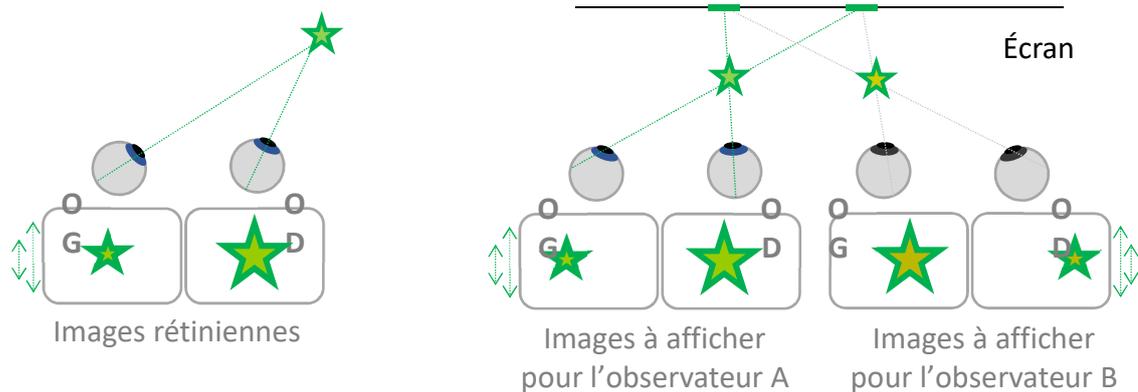
La présence de disparité binoculaire (chaque œil voit un même objet selon un angle légèrement différent ou selon une perspective légèrement différente) dans les dispositifs 3Ds stimule le système de vergence qui s'activera en synergie avec les déplacements des yeux par des saccades horizontales ou verticales. Ainsi, lors de la visualisation des dispositifs 3Ds, le système nerveux central contrôle à la fois saccades et vergences comme lors de l'exploration du monde visuel 3D réel. Si l'on admet l'hypothèse des saccades monoculaires rendues inégales pour les deux yeux par la disparité binoculaire (hypothèse de Helmholtz), alors l'exploration du monde virtuel 3Ds ne serait faite que par des saccades codées de façon monoculaires. Or, des études des saccades pour chaque œil individuellement n'ont jamais été réalisées pour la 3Ds.

De surcroît, le problème du conflit entre disparité et accommodation, qui peut être une source de fatigue, s'ajoute aux contraintes imposées au mécanisme moteur de la réponse à la disparité (vergence intra-saccadique ou bien saccade monoculaire). Le conflit entre accommodation et disparité est-il mieux toléré lors d'une exploration par des saccades plutôt que par des vergences ? Ce sont des questions encore inexplorées. Seules des études explorant ces questions pourront apporter une base objective pour l'évaluation des effets potentiels de la 3Ds.

#### 4.7.1.3 Incohérence de disparité verticale

En situation naturelle, un objet qui n'est pas à égale distance des deux yeux produit une image de taille différente sur chaque œil, induisant de la disparité verticale. Pour préserver ce phénomène en situation d'interfaçage, il faudrait pouvoir adapter la taille des images projetées sur chaque œil en fonction de la position de la direction du regard de l'observateur. Toute autre situation amènera une incohérence entre la disparité verticale attendue et la disparité verticale effective. La Figure 25 ci-dessous présente la disparité verticale. À gauche, la disparité verticale des images rétiniennes est observée en situation naturelle, lorsque l'objet est à distance différente des deux yeux. À droite, les images qui devraient être affichées pour chaque observateur afin de mimer la disparité verticale naturelle sont représentées. Ces

images dépendent de la position de l'observateur et sont incompatibles entre différents observateurs.



**Figure 25 : Disparité verticale.**

#### 4.7.1.4 Incohérence entre indices de profondeur (conflits d'indices monoculaires et binoculaires)

Si la distance de l'observateur à l'écran n'est pas prise en compte dans la conception ou la restitution de contenu 3D, le système visuel va rencontrer des difficultés supplémentaires. Les disparités artificiellement recrées sont en effet adaptées à une distance théorique de l'observateur. Si celle-ci est sous-estimée ou surestimée, les distances perçues seront écrasées ou au contraire dilatées (*cf.* Figure 25), pouvant mener à des incohérences entre la distance perçue *via* la vergence et les distances perçues *via* d'autres indices (taille relative ou parallaxe de mouvement par exemple).

Dans notre environnement quotidien, le cerveau combine les informations issues des différents indices de profondeur présentés précédemment afin d'optimiser sa perception en relief, et d'accéder à une estimation « absolue » des tailles et des distances. Les indices de profondeurs ont en effet une contribution plus ou moins importante dans la perception générale du relief, selon la distance de l'observateur à la scène perçue (Cutting & Vishton, 1995).

La Figure 26 présente les contrastes de profondeur selon la distance de visualisation pour différents indices de profondeurs. L'information d'occultation est prépondérante sur tous les autres indices et n'est approchée que par la disparité binoculaire. La sensibilité à la profondeur fournie par la disparité binoculaire diminue avec la distance, mais reste un élément majeur dans la perception du relief pour des distances de visualisation de moins de 10 m. Un autre élément important, jusqu'à une distance de 10 m, est la parallaxe du mouvement (appelée perspective de mouvement dans le schéma). L'accommodation ou la vergence ne contribuent que légèrement à la perception des profondeurs et principalement pour des distances inférieures au mètre.

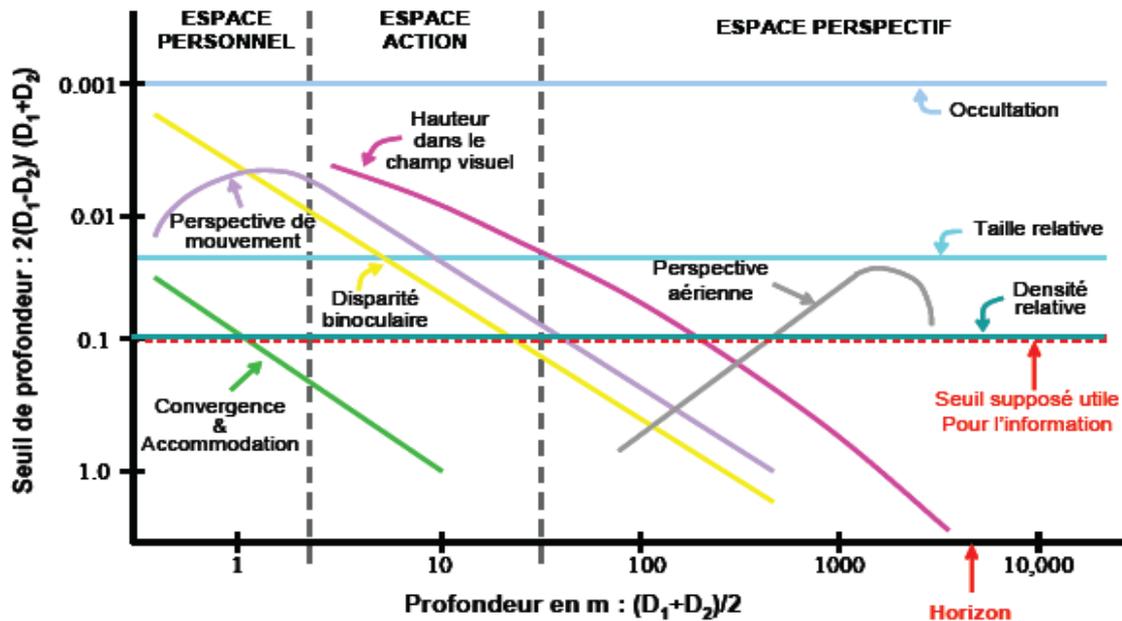


Figure 26 : Représentation schématique de l'efficacité des neuf indices principaux de perception de la profondeur en fonction de la distance par rapport à l'observateur.

Source : Cutting et Vishton, 1995.

Un autre élément qui pourrait contribuer à introduire des conflits entre indices de profondeur est la distance interpupillaire. Il s'agit en effet d'une caractéristique importante qui diffère entre les individus et dont dépend la disparité binoculaire. Des recherches approfondies sur la distance interpupillaire chez des personnes de sexe, d'ethnies et d'âge différents ont montré que la distance interpupillaire des adultes se situe entre 50 et 70 mm, avec une moyenne de 63 mm. En prenant en compte les cas extrêmes et les enfants, on peut considérer que la distance interpupillaire se situe dans un intervalle allant de 40 à 80 mm (Dodgson, 2004).

À disparité présentée égale, les personnes ayant une plus petite distance interpupillaire devraient percevoir plus de profondeur que celles possédant une distance interpupillaire plus grande (même effet que lorsque l'on accroît la distance entre caméras à distance interpupillaire fixe). Le conflit entre les distances perçues *via* les différents indices est donc susceptible de varier selon les populations (enfants et adultes).

#### 4.7.1.5 Diamètre pupillaire

Au niveau individuel, une diminution de luminosité élargit le diamètre pupillaire, ce qui induit une diminution de la qualité de l'image par augmentation des aberrations (Howard, 2008) et réduit la profondeur de champ, nécessitant alors une accommodation plus fine pour conserver la netteté sur le point fixé.

Au niveau de la population, on observe également des différences de diamètre pupillaire entre individus. Outre le niveau de luminosité et l'activité mentale, le diamètre pupillaire dépend en effet de l'âge et du sexe. De telles différences pourraient également affecter la stéréoscopie, et déterminer des populations plus ou moins sensibles aux conflits accommodation - vergence.

Les spécialistes de contenus 3Ds augmentent artificiellement la profondeur de champ, rendant toute l'image nette quelle que soit sa profondeur, de façon à rendre possible l'exploration de l'espace 3D par l'observateur sans rencontrer de zone de flou (hors mise au point de la caméra). Cette approche va à l'encontre de la perception naturelle, dans laquelle les objets

situés à distance en profondeur de l'objet fixé (derrière ou devant) sont flous et ne viennent donc pas interférer directement avec la perception de l'objet fixé.

## 4.8 Description des incohérences visuo-vestibulaires en immersion

### 4.8.1 Définition du conflit visuo-vestibulaire

Alors que le système visuel fournit l'information provenant du mouvement relatif œil-environnement, le système vestibulaire perçoit l'accélération angulaire et linéaire de la tête dans l'espace grâce, respectivement, aux canaux semi-circulaires et aux macules otolithiques de l'utricule (horizontales) et du saccule (verticales). En situation d'immersion, il existe par définition un conflit entre les informations visuelles procurant au sujet -dont le point de vue se déplace dans l'environnement virtuel- une sensation de mouvement, alors même que les informations vestibulaires en provenance des capteurs canaux et otolithiques renseignent au contraire la stabilité du corps (cf. Figure 27 ci-dessous). La cybercinétose, dans le contexte de l'immersion, est la résultante d'une incohérence entre, d'une part, les informations visuelles, vestibulaires et kinesthésiques réelles et, d'autre part, les informations sensorimotrices attendues par le sujet car prédites par un modèle de représentation interne (Golding et Gresty, 2013). Il a été établi récemment que des noyaux localisés dans le tronc cérébral intégraient les informations vestibulaires avec les signaux émetteurs en provenance du système gastro-intestinal, ce qui explique les symptômes nauséux caractéristiques de la cybercinétose (Yates *et al.*, 2014).

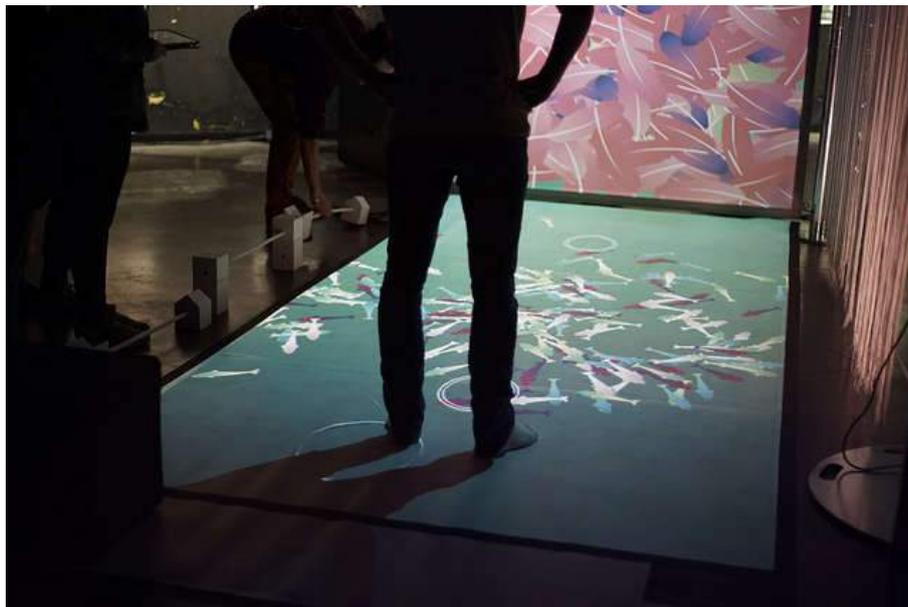


Figure 27 : Prototype de rééducation vestibulaire en immersion.

Le défilement de l'environnement visuel crée une illusion de mouvement alors même que le sujet reste statique.

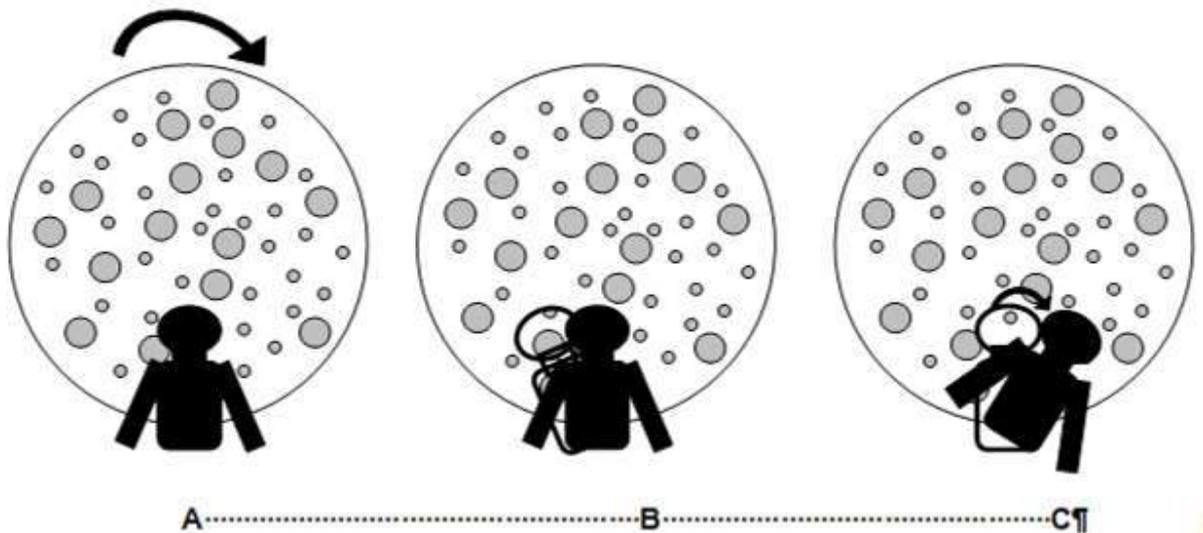
### 4.8.2 Effet de la stimulation optocinétique sur la posture

Le contrôle postural est largement influencé par les mouvements de la scène visuelle (Nashner et Berthoz, 1978). Physiologiquement, un mouvement de l'environnement visuel entraîne une perception erronée de mouvement dans la direction opposée : c'est le phénomène devection, ressenti par exemple lorsqu'assis dans un train à l'arrêt, on regarde par la fenêtre un train arriver en sens inverse, même à faible vitesse. Le glissement des images

du train sur la rétine entraîne des mouvements oculaires visant à les stabiliser : c'est le réflexe optocinétique expliquant que lorsque le paysage est en mouvement, le réflexe oculaire involontaire est de le suivre des yeux.

Dans le contexte de l'expérience immersive, on peut s'attendre, en raison du phénomène de vection, à ce que l'environnement virtuel perturbe la stabilité posturale. Il existe deux types de stimulation optocinétique (SOK) selon que le mouvement de la scène visuelle est linéaire (horizontal/vertical) ou circulaire. Chez un sujet debout, une SOK horizontale provoque une inclinaison de la tête et du corps dans la direction du mouvement de la scène visuelle (Cheung *et al.*, 1989). En cas de SOK circulaire, la rotation du champ visuel dans le plan frontal provoque également un déplacement latéral du centre de pression mais dans des proportions plus marquées que lors d'une stimulation linéaire (cf. Figure 28 ci-dessous). Les études d'imagerie fonctionnelle cérébrale ont montré que durant une SOK étaient observés non seulement un regain d'activité du cortex visuel (Brandt *et al.*, 1998), mais aussi une augmentation de l'activité du cortex vestibulaire pariétoinsulaire (Dieterich et Brandt, 2000).

Il est à noter que vection et déviation posturale sont deux phénomènes indépendants : la déviation posturale induite par la SOK précède l'illusion de mouvement. En d'autres termes, l'observation d'une déviation posturale n'est pas conditionnée par la perception consciente du phénomène de vection (Previc et Mullen, 1990).



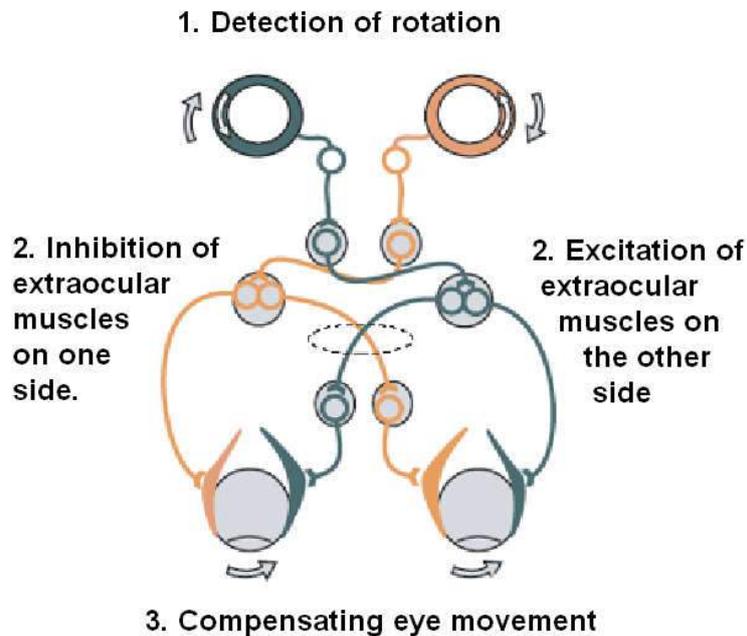
**Figure 28 : Stimulation optocinétique circulaire.**

*En A, le sujet est debout, devant une grande surface circulaire que l'on peut tourner (par exemple à droite) déclenchant un mouvement visuel et engendrant ainsi, en B, une sensation de déséquilibre du corps du sujet, dans le sens opposé (c'est à dire à gauche). En C, le sujet effectue un déplacement de son corps en vue de compenser cette sensation de déséquilibre, c'est-à-dire dans le sens du mouvement visuel.*

### 4.8.3 Mise en jeu du réflexe vestibulo-oculaire en immersion

Les canaux semi-circulaires latéraux, antérieurs et postérieurs détectent les accélérations angulaires de la tête dans les 3 plans de l'espace (*yaw*, *roll*, *pitch*), avant de déclencher des mouvements oculaires « compensateurs » ayant pour but de stabiliser l'image sur la rétine durant l'accélération angulaire : c'est le réflexe vestibulo-oculaire (RVO). Le ratio entre l'amplitude du mouvement oculaire compensateur et celle du mouvement d'accélération imprimée à la tête permet le calcul du gain physiologique du RVO, normalement égal à 1 (cf. Figure 29 ci-dessous). Face à un sujet se plaignant de vertiges ou de troubles de l'équilibre, le diagnostic de dysfonctionnement d'un ou de plusieurs canaux semi-circulaires repose sur

la constatation d'une anomalie du gain du RVO pour le canal testé. Ce dysfonctionnement peut se traduire par des anomalies objectivables du contrôle postural (Ionescu *et al.*, 2020).

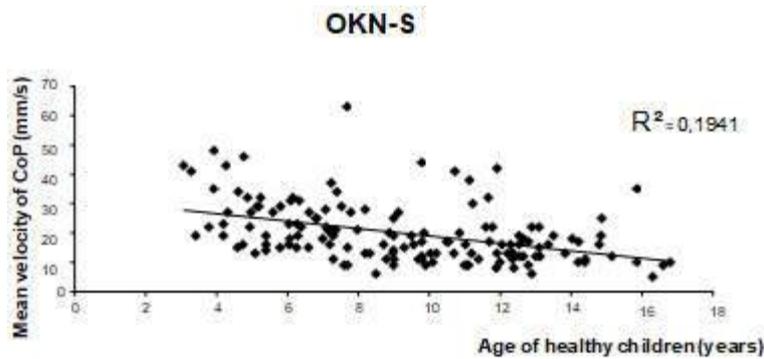


**Figure 29 : Réflexe vestibulo-oculaire selon Mikael Häggström.**

Source : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ThreeNeuronArc.png>.

En immersion, il existe, en dehors de tout dysfonctionnement patent des canaux semi-circulaires, des circonstances où le RVO ne peut jouer son rôle de stabilisateur de l'image rétinienne, avec pour corollaire le risque d'apparition d'oscillopsies. Une de ces circonstances est liée à la qualité technologique insuffisante de certains casques de RV, dont le temps de rafraîchissement, supérieur à 50 ms, engendre un retard de fonctionnement de la boucle sensori-motrice physiologique. Ce retard est lié au délai entre le mouvement d'accélération de la tête et la mise à jour de l'environnement visuel à l'intérieur du casque. Une autre circonstance est la présence chez le sujet participant à l'expérience immersive de troubles de la vergence. Le gain du RVO est dépendant de la distance de fixation du sujet, et par conséquent de l'angle de la vergence à l'intérieur du casque : il augmente normalement en vision proche. En cas de troubles de la vergence, une sur-compensation vestibulo-oculaire ou au contraire une compensation insuffisante est susceptible d'induire un mouvement résiduel des images sur la rétine, responsable à son tour d'une instabilité posturale, voire d'une perte d'équilibre.

Notamment, les très jeunes enfants sont, en l'absence de troubles de la vergence, relativement immuns à la cybercinétose, mais leur susceptibilité à en développer augmente ensuite pour culminer vers l'âge de 9 ans avant de décliner à nouveau à l'adolescence, à l'âge adulte puis au grand âge (Henriques *et al.*, 2014). Ceci est à mettre en parallèle avec des données récentes portant sur la maturation du contrôle postural avec l'âge, illustrée par la Figure 30 ci-dessous (Goulème *et al.*, 2018).



**Figure 30 : Vitesse d'oscillation (mm/sec) du centre de pression sur plate-forme dynamique de force en réponse à une stimulation optocinétique rotatoire en fonction de l'âge (n=156 enfants, sex ratio=1).**

La stimulation optocinétique était présentée à 250 cm de l'enfant à une vitesse de rotation de 15°/seconde. D'après Goulème *et al.*, 2018.

#### 4.8.4 Susceptibilité individuelle à la cybercinétose

Chez le patient vestibulaire, le risque de développer une cybercinétose est quasi-nul en cas de déficit vestibulaire bilatéral sévère. Il est également faible en cas d'extinction unilatérale de la fonction vestibulaire. En revanche, la susceptibilité à la cybercinétose semble plus importante chez les sujets souffrant d'hydrops labyrinthique (maladie de Menière) (Sharon et Hullar, 2014), et est encore plus élevée chez le sujet migraineux, ou souffrant d'un vertige équivalent migraineux (Akdal *et al.*, 2013). Ce dernier résultat pourrait expliquer en partie la prépondérance féminine de la cybercinétose (Paillard *et al.*, 2013), sachant qu'avec le temps, les crises de migraine laissent volontiers la place chez la patiente migraineuse à des manifestations vertigineuses.

Un marqueur neurophysiologique de la susceptibilité à la cybercinétose pourrait être un seuil anormalement bas des potentiels évoqués myogéniques vestibulaires cervicaux (Tal *et al.*, 2013).

## 5 Effets sanitaires de la réalité virtuelle et/ou de la réalité augmentée

### 5.1 Méthode d'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires des technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée

#### 5.1.1 Revue de la littérature scientifique

La présente expertise repose principalement sur une analyse de la littérature scientifique internationale décrivant des effets sanitaires liés à une exposition à des technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée. Pour ce faire, une recherche bibliographique a été menée.

##### 5.1.1.1 Période de référence

La recherche bibliographique a été réalisée sur la période qui s'étend de janvier 2010 à juillet 2018. Certaines études clés, parues de juillet 2018 à janvier 2020 ont aussi été incluses lorsqu'elles ont été jugées pertinentes et de qualité satisfaisante. De plus, les experts ont pu, si besoin, inclure dans la bibliographie toute étude parue avant 2010 si cela semblait nécessaire, notamment pour présenter un état de l'art dans les parties introductives des chapitres relatifs aux effets sanitaires.

##### 5.1.1.2 Moteurs de recherche

Les moteurs de recherche utilisés lors de cette expertise sont *Scopus* (<http://www.scopus.com/home.url>) et *PubMed*. *Scopus* est un moteur de recherche dans une base de données bibliographiques scientifiques pluridisciplinaire répertoriant notamment des publications biologiques, médicales mais aussi relatives aux sciences humaines et sociales. *PubMed* est un moteur de recherche centré sur les publications du domaine médical.

##### 5.1.1.3 Typologie des documents expertisés

Les documents pris en compte dans l'expertise sont des articles et des revues scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture, sans préjuger de leur facteur d'impact.

Les articles originaux rédigés en anglais ou en français ont été systématiquement analysés par le groupe de travail.

Les revues descriptives ou narratives, qui consistent à synthétiser l'ensemble des études publiées sur un sujet donné, n'ont pas, quant à elles, été analysées. Néanmoins, quand cela s'est avéré nécessaire, notamment pour étayer les introductions scientifiques en amont de la description d'un effet, les experts se sont parfois appuyés sur des revues présentant des données scientifiques faisant consensus.

##### 5.1.1.4 Bibliographie

Dans un premier temps, le groupe de travail a listé, sur la base d'avis d'experts, l'ensemble des effets sanitaires possibles liés à une exposition aux technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée. Ceci a permis de définir plusieurs catégories ciblées d'effets sanitaires à investiguer. Pour chaque catégorie, un thésaurus a été défini par le groupe de travail.

Les grandes catégories d'effets sanitaires étudiés sont :

- les effets liés à l'ergonomie des interfaces de RV et/ou RA :

- troubles musculo squelettiques (postures exagérées, gestes répétitifs, effet du poids et ajustement inadapté du casque) ;
- accidentologie (déficit d'éclairage, occultation et encombrement de l'espace environnant) ;
- affections diverses et parasites (contact avec les dispositifs utilisés par de nombreuses personnes, défaut de prophylaxie, hygiène) ;
- effets liés à l'air ambiant ;
- les effets physiologiques :
  - cybercinétose (nausée, vomissement, maux de tête, inconfort général, ...) ;
  - les effets visuels (inconfort et fatigue visuels, diplopie, asthénopie, ...) ;
  - les effets cardiaques (palpitations cardiaques, pression dans la poitrine) ;
  - les effets vestibulaires (vertiges) ;
  - les effets neurologiques (crises d'épilepsie),
- les effets psychologiques et psychosociaux :
  - risques émotionnels, déréalisation ;
  - dépendance à l'égard de l'interface et du contenu ;
  - effets liés au contenu (violence, rapport à la sexualité, ...) ;
  - isolement social ;
- les effets sur le développement (développement visuel, émotionnel, cognitif, développement du système auditif) ;
- les effets liés aux agents physiques :
  - effets liés à la modulation temporelle de la lumière (fatigue visuelle, maux de tête, ..) ;
  - effets liés à la lumière bleue des écrans ;
  - effets liés aux champs électromagnétiques ;
  - effets liés au niveau sonore des interfaces.

Par la suite, un thesaurus directement lié aux technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée a été défini.

Pour réaliser la recherche bibliographique, un croisement des thesaurus relatifs aux technologies d'une part et aux effets sanitaires d'autre part a été effectué. Les experts ont procédé à l'analyse des publications recensées en sous-groupe, par type d'effet.

### 5.1.2 Une analyse collective

Les experts du groupe de travail ont analysé et discuté collectivement les articles recensés, au sein de sous-groupes correspondant aux différents effets sanitaires précités.

Chaque article a été sélectionné sur la base de son titre et de son résumé afin de juger de sa pertinence par rapport à la question traitée. Les articles retenus ont ensuite été analysés en détail par deux experts. Ces analyses ont ensuite été discutées en réunions plénières, afin d'évaluer collectivement le niveau de qualité méthodologique de la publication.

### 5.1.3 Critères de qualité retenus pour l'analyse des études

Lors de l'analyse des publications, les experts ont exclu celles qui présentaient des faiblesses méthodologiques majeures, comme par exemple des facteurs de confusion trop importants non pris en compte. Dans l'ensemble, après un tri sur la pertinence des publications, compte tenu pour certains aspects étudiés du peu de ressources bibliographiques disponibles, la plupart des publications apportant des éléments utiles à la discussion ont été conservées.

### 5.1.4 Présentation des résultats issus de la revue de la littérature

Les résultats des études considérées par les experts du groupe de travail comme utiles à l'évaluation des effets sanitaires des technologies de RV et/ou RA sont présentés de manière succincte pour chaque effet étudié.

### 5.1.5 Évaluation du niveau de preuve d'un effet sanitaire ou biologique donné

Le groupe de travail a élaboré une méthode pour évaluer le niveau de preuve associé à un effet donné. Cette méthode fait intervenir 2 étapes :

- Étape 1 : évaluation des éléments de preuve relatifs à « un effet donné » apportés par les études ;
- Étape 2 : classification de l'effet en croisant les niveaux de preuve relatifs aux effets observés chez l'humain d'une part et les niveaux de preuve relatifs aux effets observés sur les modèles, et notamment chez l'animal, d'autre part.

Par la suite le groupe de travail a proposé d'évaluer le risque de survenue des effets au regard de l'exposition attendue.

#### **Étape 1 : évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné**

Les termes qualificatifs utilisés pour désigner le niveau de preuve apporté par les études épidémiologiques et cliniques chez l'humain d'une part et par les études sur des modèles expérimentaux d'autre part sont décrits ci-dessous. Pour chaque effet et pour chaque type d'étude, le groupe de travail a établi l'une des conclusions suivantes :

- **les éléments de preuve sont suffisants pour conclure à l'existence d'un effet** : une relation de cause à effet est probable entre l'exposition aux technologies de réalité virtuelle/ réalité augmentée et l'effet étudié. En d'autres termes, une relation positive a été établie entre l'exposition et la survenue de l'effet, dans le cadre d'études où les biais et facteurs de confusion ont pu être exclus avec suffisamment de certitude.
- **les éléments de preuve sont limités pour conclure à l'existence d'un effet** : une association a été établie entre l'exposition à la réalité virtuelle/réalité augmentée et la survenue de l'effet étudié. Le groupe de travail estime qu'une interprétation causale de cette association est plausible, mais considère qu'on ne peut totalement éliminer l'existence de biais ou de facteurs de confusion dans les études analysées.
- **les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet** : les études disponibles ne sont pas d'une qualité, d'une concordance ou d'une puissance statistique suffisante pour permettre de conclure à la présence ou à l'absence d'effet entre l'exposition à la réalité virtuelle /augmentée et l'effet étudié.
- **les données disponibles ne montrent pas d'effet** : plusieurs études suffisantes, couvrant la totalité des niveaux d'exposition connus pour être rencontrés chez l'humain, et dont les résultats convergent, ne font pas ressortir d'association positive entre

l'exposition aux technologies de réalité virtuelle/augmentée et l'effet étudié, et ce, quel que soit le temps ou la fréquence d'exposition examiné. Biais et facteurs de confusion doivent être exclus avec une certitude raisonnable, et les études devraient avoir un suivi suffisamment long. Lorsque les renseignements disponibles suggèrent « une absence d'effet », cette conclusion ne peut s'appliquer qu'à l'effet lié à une exposition à la réalité virtuelle/augmentée aux conditions et niveaux d'exposition et à la durée d'observation pris en considération dans les études dont on dispose. Au demeurant, l'éventualité de l'existence d'un risque très faible aux niveaux d'exposition étudiés ne peut jamais être totalement exclue.

Le groupe de travail a appuyé son raisonnement sur un logigramme (cf. Figure 31) qui permet de définir le niveau de preuve associé à un effet.

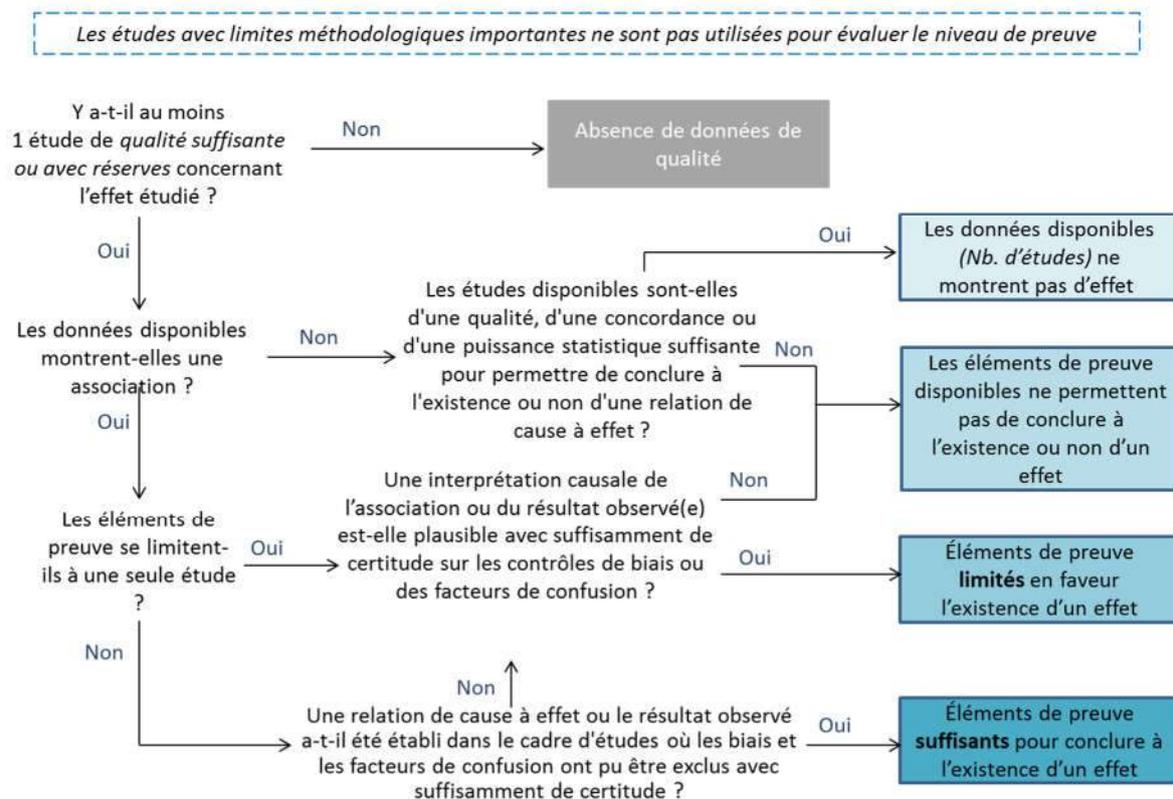


Figure 31 : Logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études.

**Étape 2 : classification de l'effet selon une matrice de croisement des études chez l'humain et sur modèles**

Au final, tous les éléments d'appréciation sont examinés dans leur ensemble afin d'aboutir à une évaluation globale pour l'humain de l'impact d'une exposition à la réalité virtuelle ou augmentée pour chaque effet étudié.

La matrice de croisement des éléments de preuve chez l'humain et sur les modèles (cf. Figure 32 ) a été utilisée pour classer l'effet lorsque cela était possible.

		<b>Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles</b>			
		Éléments de preuve <b>suffisants</b> pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve <b>limités</b> pour conclure à l'existence d'un effet	Les éléments de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
<b>Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques</b>	Éléments de preuve <b>suffisants</b> pour conclure à l'existence d'un effet	<b>Effet avéré</b>			
	Éléments de preuve <b>limités</b> pour conclure à l'existence d'un effet	<b>Effet probable</b>	<b>Effet possible</b>		
	Les éléments de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet	<b>Effet possible</b>	<b>Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet étudié</b>		
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet				

Figure 32 : Matrice de croisement des éléments de preuve chez l'humain et sur des modèles.

Chaque effet étudié est classé dans l'une des catégories ci-après. Le classement d'un effet résulte d'un avis scientifique et s'appuie sur le caractère plus ou moins probant des éléments d'appréciation tirés d'études chez l'humain et d'autres informations pertinentes comme les études sur les mécanismes biologiques, les fonctions physiologiques ou les altérations des systèmes vivants. L'évaluation globale a été discutée en groupe de travail et a fait l'objet d'un avis collégial. Les effets peuvent être classés comme suit :

- l'effet étudié est avéré pour l'humain ;
- l'effet étudié est probable pour l'humain ;
- l'effet étudié est possible pour l'humain ;
- les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet ;
- probablement pas d'effet pour l'humain.

### **L'effet étudié est avéré pour l'humain**

Cette catégorie n'est utilisée que lorsque l'on dispose d'*éléments de preuve suffisants* de l'existence de l'effet étudié pour l'humain.

### **L'effet étudié est probable ou possible pour l'humain**

Si l'effet étudié n'est pas avéré dans les études chez l'humain, alors les études sur les modèles (*in vivo* ou *in vitro*) sont prises en compte, en complément des études épidémiologiques, afin d'aboutir à l'évaluation globale pour l'humain de l'exposition à la réalité virtuelle ou augmentée.

Cette catégorie comprend les effets pour lesquels, au maximum, on a obtenu des éléments de preuve *limités* pour conclure à l'existence de l'effet étudié dans les études expérimentales ou épidémiologiques et, au minimum, on ne dispose d'aucune étude expérimentale ou épidémiologique, mais on dispose d'éléments de preuve *suffisants* pour conclure à l'existence de l'effet étudié dans les études *in vitro* ou *in vivo*. Les dits effets sont classés soit dans la catégorie *effet probable pour l'humain*, soit dans la catégorie *effet possible pour l'humain* sur la base d'éléments de preuves issus des études épidémiologiques et expérimentales, de données mécanistiques et d'autres renseignements pertinents.

L'*effet probable* traduit un niveau de preuve plus élevé qu'*effet possible*.

#### ***Effet probable pour l'humain***

On fait appel à cette catégorie lorsque l'on dispose d'*éléments de preuve limités pour conclure à l'existence de l'effet* étudié dans les études chez l'humain et d'*éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet* dans les études *in vitro* ou *in vivo*.

#### ***Effet possible pour l'humain***

Cette catégorie concerne les effets pour lesquels on dispose d'*éléments de preuve limités pour conclure à l'existence de l'effet* étudié dans les études chez l'humain, et lorsque les éléments de preuve sont au maximum *limités* dans les études *in vivo* et *in vitro*. On peut également y faire appel lorsque l'on dispose d'*éléments de preuve non conclusifs* dans les études chez l'humain ou en l'absence d'études de qualité, mais que l'on dispose d'*éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence de l'effet* dans les études *in vivo* et *in vitro*, corroborés par des données mécanistiques et d'autres données pertinentes.

### **Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet**

Cette catégorie concerne les effets pour lesquels les éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié sont *non conclusifs* ou *en l'absence de données de qualité* dans les études chez l'humain et dans les études *in vivo* et *in vitro*.

On classe aussi dans cette catégorie les effets qui ne correspondent à aucune des autres catégories.

Une classification dans cette catégorie n'est pas un constat d'absence d'effet ou de sûreté globale. Cela signifie souvent que davantage de recherches sont nécessaires, notamment lorsque les données sur l'effet étudié peuvent être interprétées différemment.

### **Probablement pas d'effet pour l'humain**

Relèvent de cette catégorie les effets étudiés pour lesquels on dispose d'éléments de preuve suggérant *une absence d'effet* dans les études chez l'humain, ainsi que dans les études *in vivo* et *in vitro* pour un grand nombre de conditions ou de scénarios d'exposition. Il est néanmoins très difficile de démontrer une absence d'effet.

## **5.2 Effets liés à l'ergonomie des dispositifs physiques et à l'environnement dans lequel prend place leur utilisation**

L'ergonomie des dispositifs physiques porte sur les caractéristiques anatomiques, anthropométriques, physiologiques et biomécaniques de l'humain dans leurs relations avec l'activité. Les thèmes étudiés incluent notamment les gestes et postures, les manipulations d'objets, les mouvements répétitifs, la disposition du poste de travail, la sécurité et la santé, et notamment les troubles musculo-squelettiques.

L'ergonomie physique concerne aussi l'effet des ambiances physiques (ambiance sonore, vibrations, ambiance lumineuse et ambiance thermique (pour un panorama général et quelques valeurs repères, voir par exemple Millanvoye, 2004) dont l'éventuelle intensité ou qualité particulière pourrait exercer un effet négatif sur la santé ou la qualité des actions accomplies. Si les effets des ambiances ne sont pas spécifiques aux technologies considérées, ils pourraient être favorisés lors d'expositions longues et pour certaines configurations (e.g. salles immersives).

### **5.2.1 Blessures, traumatismes et pathologies physiques résultant de l'usage de RA et RV**

Une catégorie d'effets sanitaires possibles concerne les atteintes musculo-squelettiques décrites dans quelques revues de la littérature (Pourmand *et al.*, 2017 ; Perrier-Melo *et al.*, 2015 ; Serino *et al.*, 2016), notamment :

- les atteintes induites par la sur-sollicitation de certaines articulations et tendons, par le maintien en statique de postures non naturelles et/ou non confortables sur des périodes de temps importantes, par les frottements et l'appui sur une zone de contact, etc. ;
- les blessures et traumatismes liés à des chocs et/ou des chutes accidentelles en lien avec l'utilisation de dispositifs de RV/RA et/ou du fait d'une absence d'attention vis-à-vis de l'environnement réel, par exemple lors d'un usage concomitant à une tâche principale requérant l'attention (conduite, déplacement piéton, etc.) ;
- les pathologies liées à un défaut d'hygiène des dispositifs partagés par de multiples utilisateurs.

Seules deux études de qualité suffisante attestent de l'existence de traumatismes et de pathologies résultant de l'usage de la réalité augmentée, avec une focalisation sur la seule

situation d'usage en extérieur et en mobilité. À l'inverse, il ne semble pas exister de publication scientifique concernant les dispositifs de réalité virtuelle, même si des accidents ont parfois été mentionnés dans la presse ou sont connus au travers de retours informels.

Barbero et ses collaborateurs (Barbero *et al.*, 2018) ont réalisé une étude rétrospective à partir de l'information des dossiers médicaux électroniques d'un organisme de prestation de soin représentant près de 4 millions de patients américains. Une recherche systématique des termes « *pokemon* » ou « *pokémon* » dans le dossier des patients ayant réalisé une visite entre juillet et novembre 2016, complétée d'une analyse manuelle, a permis d'identifier 222 patients joueurs de *Pokemon Go* ou ayant eu un effet indésirable en lien avec ce jeu. Parmi ces patients, 75 (34 %) ont rapporté des blessures liées à l'usage de ce jeu. Dans 2/3 des cas il s'agit d'une lésion au niveau musculo-squelettique ou cutané. Il s'agit dans la plupart des cas d'effets indésirables de nature aiguë, essentiellement des entorses, des fractures (doigts, radius, pied, crâne, commotions cérébrales), des blessures cutanées. La plupart de ces blessures concernent des piétons, et les blessures sont généralement similaires à celles observées pour d'autres formes d'activité physique légère à modérée se déroulant en extérieur. S'appuyant sur une estimation du nombre de joueurs dans la population américaine, les auteurs en concluent que la prévalence des blessures dans la population des joueurs, sur une période de 4 mois, est faible (estimée à 0,026 % ou 26,3 pour 100 000 joueurs), et d'autant plus pour ce qui concerne le nombre de blessures graves (estimé à 0,003 % ou 2,8 pour 100 000 joueurs). Une autre étude rétrospective (Kim & Min, 2011), menée par questionnaire auprès de 608 étudiants coréens, rapporte une corrélation significative entre le groupe des jeunes caractérisés comme « dépendants » au *smartphone* et le nombre d'accidents de type heurt et collision, ainsi que les chutes. Une analyse plus fine montre que cet effet est spécifiquement associé à usage important d'application de jeu et de divertissement. Ces études fournissent cependant peu d'information sur les conditions réelles et les facteurs précisément impliqués dans la survenue des effets sanitaires indésirables. Toutefois, la distraction induite par le jeu est l'une des explications les plus probables. En effet, comme le montre Pourmand (Pourmand *et al.*, 2017), les études des effets des usages de la console *Wii* font part du même type d'argument et semble-t-il d'autant d'accidents.

### 5.2.2 Risques liés à l'ergonomie des dispositifs d'affichage

L'impact de la manière dont les casques et les dispositifs d'interaction manipulés par les usagers sont conçus a été étudié depuis plusieurs années dans le champ de la réalité virtuelle et de la téléopération.

Le domaine de la réalité augmentée étant plus récent, cela peut expliquer le nombre d'études très inférieur par rapport à la réalité virtuelle. L'un des enjeux techniques de la réalité augmentée implique l'intégration des mondes réels et virtuels en temps réel, d'où un matériel quasi-systématiquement porté par l'utilisateur, des contraintes d'encombrement, de légèreté et d'autonomie électrique renforcées par rapport à la réalité virtuelle, ainsi que des algorithmes plus exigeants en matière de ressources de calcul. La réalité augmentée vise le plus souvent à « augmenter » la perception en ajoutant à l'environnement des informations utiles bien que peu visibles. C'est aussi le principe des HUD (*head-up displays*) des pilotes d'avion et plus récemment de certaines voitures haut de gamme. Comme mentionné en introduction, il y a quatre grandes classes de dispositifs d'affichages pour la réalité augmentée :

- les dispositifs VST (*Video See Through*), qui restituent une vue de l'environnement réel *via* des caméras positionnées à peu près au niveau des yeux et utilisent des casques de réalité virtuelle ou des casques développés spécifiquement pour la réalité augmentée ; pour cette catégorie, les effets sont en grande partie similaires à ceux observés avec les casques de réalité virtuelle (fatigue visuelle et latence notamment) à l'exception de la non perception de son propre corps ;

- les dispositifs OST (*Optical See Through*), sont des dispositifs semi-transparents qui laissent à l'utilisateur une perception directe de l'environnement réel, généralement monté sur des lunettes ;
- les dispositifs HHAR (*Hand-held Augmented Reality*), fondés sur la métaphore de la « *Magic Window* » et exploitant la caméra intégrée dans les tablettes et autres smartphones pour offrir à l'utilisateur de contrôler manuellement une vue superposant la scène filmée et des « augmentations » au travers de la position de la tablette ;
- les dispositifs SAR (*Spatial Augmented Reality*) fondés, à l'inverse des dispositifs précédents, sur une projection directe de l'augmentation sur des surfaces physiques réelles d'objets et de surfaces dans l'environnement, par « *projection mapping* » ; peu d'études sont disponibles sur cette dernière classe.

Plusieurs facteurs susceptibles de provoquer un inconfort et des effets à long terme lors de l'utilisation des casques ont été identifiés (Nichols, 1999) :

- le poids total et la répartition des masses. Le poids de l'équipement optique et son positionnement vers l'avant dans certains casques peuvent par exemple induire un déséquilibre vers l'avant et une fatigue peut apparaître en fonction de la masse et du temps d'utilisation ;
- les caractéristiques des zones de contact (taille, forme, matière, etc.) et la pression appliquée sur ces zones ;
- le degré et la facilité d'ajustement du casque ou du dispositif aux différences interindividuelles et aux exigences de la tâche ;
- la présence de câbles ou d'éléments contraignant voire entravant les mouvements ;
- la qualité de l'affichage (résolution, champs visuel, latence etc.).

De plus, la nature et les exigences de la tâche, ainsi que les choix de conception de l'interface et des règles d'interaction constituent autant de facteurs supplémentaires susceptibles d'interagir avec les précédents (par exemple Kadri *et al.*, 2007).

Au delà des risques spécifiques à la réalité augmentée, certains risques afférents à la réalité virtuelle concernent ainsi également la réalité augmentée.

Quercioli (Quercioli, 2017) rapporte des problèmes similaires en réalité augmentée à ceux rencontrés en réalité virtuelle : poids du dispositif (à base de *Google Cardboard*) et nausées dues à la latence.

Un autre effet concerne la fatigue visuelle. Les résultats sont là quelque peu contradictoires : Gabbard (Gabbard *et al.*, 2019) rapporte de la fatigue visuelle tandis que Gao (Gao *et al.*, 2019) aboutit à des résultats contrastés selon le type de mesure de la fatigue visuelle, celles-ci ne faisant pas consensus. Les différences entre ces deux études pourraient s'expliquer par des distances d'accommodation variables (Gabbard *et al.*, 2019) et fixes (Gao *et al.*, 2019) .

Un effet moins évoqué concerne l'accroissement de la charge de travail perçue liée à l'utilisation des casques et à l'interaction avec certains environnements virtuels et augmentés, comparativement à des dispositifs avec écrans plus traditionnels (Häkkinen *et al.*, 2010). Une étude expérimentale (Pölönen *et al.*, 2010) impliquant 106 sujets entre 23 et 45 ans a comparé quatre modèles de lunettes de RA/RV et un grand écran TV sur plusieurs effets, dont la charge de travail perçue. La charge de travail était mesurée au moyen des dimensions « effort », « frustration », « exigence physique » et « charge totale » du questionnaire NasaTLX (Hart & Staveland, 1988). La tâche expérimentale, simple et ne requérant pas d'interactivité, consistait à regarder un film durant 40 minutes. Les résultats montrent d'une part un niveau de charge de travail peu élevé (ce qui est compréhensible du fait des caractéristiques de la tâche) et, d'autre part, une charge de travail induite par le port des casques plus élevée que la situation de référence avec grand écran : les casques induisent ainsi une exigence physique supérieure, demandent plus d'effort et ont une charge globale plus élevée. Il apparaît aussi des variations significatives spécifiques selon le type de casque, sur quatre dimensions

d'évaluation de la charge : « effort », « frustration », « exigence physique » et « charge totale ».

Au-delà de l'effet notable rapporté, la portée de l'étude reste limitée du fait de la faible représentativité de la tâche utilisée, et de l'absence d'analyse des facteurs à l'origine des différences constatées. En outre, l'évaluation subjective a une valeur diagnostic essentielle pour améliorer la conception, mais, faute de valeur de référence et du fait de sa contingence forte à d'autres variables propres au contexte (tâche, condition de réalisation, expertise etc.) le niveau mesuré de la charge perçue reste difficile à interpréter pour juger de son caractère acceptable ou non pour les utilisateurs (Grier, 2015 ; Hart, 2006).

Kim *et al.*, (2019) ont étudié l'influence du dispositif et du type d'interface utilisateur sur une tâche de collecte de pièces puis de placement sur une grille dans un atelier. Les informations utiles étaient présentées de manière textuelle ou graphique, dans un visiocasque de RA monoculaire ou binoculaire et le tout de manière permanente ou à la demande. La condition de référence était une feuille de papier. Les résultats ne permettent que de conclure que l'interface utilisateur est plus importante que le choix du type de casque. L'utilisation de la RM permet d'augmenter la performance et de réduire la charge de travail perçue au prix d'une diminution du confort de l'utilisateur (lisibilité et changement de distance d'accommodation répétée entre mondes réel et virtuel).

Un article de Tsai (Tsai et Huang, 2018) montre quant à lui une légère diminution de la charge cognitive de planification (mais sur la base d'un jugement subjectif) de route mais pointe un risque de « tunnelisation » (« l'allocation de l'attention à un canal d'information particulier, à un diagnostic d'un jeu d'hypothèses ou à la réalisation d'une tâche dite objectif, pour une durée dépassant la durée optimale, étant donné les coûts associés à la négligence des informations présentées par les autres canaux, ou à de nouvelles hypothèses non envisagées, ou encore à la non réalisation d'autres tâches » telle que définie par Wickens (2005)).

### 5.2.3 Évaluation du niveau de preuve

Force est de constater le faible nombre et les limites des études existantes sur les effets sanitaires évalués ici. Focalisées sur la RA en situation de mobilité, ces études rapportent une prévalence faible des atteintes musculo-squelettiques, analogue à celle observée pour d'autres formes d'activité physique légère à modérée se déroulant en extérieur. En ce qui concerne la réalité virtuelle et les applications de réalité augmentée autres que *Pokemon GO*, les rares synthèses citées en introduction (s'appuyant sur des études de cas, voire sur des articles de presse) fournissent des données qualitatives sur la variété d'atteintes physiques sans toutefois renseigner sur leur prévalence. Ces atteintes, de types blessures, fractures, atteintes au niveau des tendons, apparaissent similaires à celles décrites dans l'étude sur l'application de RA mobile *Pokemon Go* (Barbero *et al.*, 2018). Toutefois, faute d'études sur les effets de l'exposition à la RA/RV dans le cadre professionnel ou de loisir sous l'angle des atteintes physiques examinées dans ce chapitre, il n'est pas possible de conclure aujourd'hui sur le niveau de preuve de ces effets.

Une autre dimension examinée concerne l'impact en matière de charge de travail. En l'état actuel, et compte tenu de l'existence d'une seule étude disponible s'appuyant sur une tâche peu représentative – là encore avec une centration sur la réalité augmentée et les dispositifs de type lunettes portées – il n'est pas possible de conclure. Toutefois, il semble y avoir un effet d'accroissement de la charge de travail perçue lors de l'utilisation de dispositifs mobilisant un affichage près des yeux, comme cela est le cas avec les lunettes de RA ou de RV.

Globalement, quelles que soient les études, il faut souligner le manque récurrent d'information précise sur les caractéristiques des dispositifs utilisés, des procédures et des conditions d'étude, ce qui constitue un frein important pour l'établissement de conclusions solides. Ce dernier aspect est d'autant plus important qu'avec le temps, l'évolution et les développements

technologiques peuvent engendrer d'importantes différences entre les situations et les dispositifs impliqués.

Enfin, quelques auteurs évoquent de façon prospective des effets potentiels tels que l'occurrence de convulsions épileptiques ou d'addictions (Pourmand *et al.*, 2017), voire des risques spécifiques pour les enfants en matière de sécurité, d'intégrité physique et de bien-être dans le cadre de pratiques de jeu en extérieur : risque accru de blessures, d'enlèvement, d'intrusion, de violence et de coût économique (Serino *et al.*, 2016). Cependant, il n'existe pas aujourd'hui de données disponibles pour statuer sur le fait qu'ils soient avérés et à un niveau supérieur relativement à d'autres activités similaires en matière d'environnement et de contexte.

*Le groupe de travail conclut que les éléments de preuve ne permettent pas de conclure ou non l'existence d'un effet chez l'Homme.*

*Il n'existe pas à ce jour de données sur des modèles animaux ni chez humain.*

*Les données disponibles ne permettent donc pas de conclure à l'existence ou non d'un effet lors d'une exposition à la réalité virtuelle ou augmentée.*

## 5.3 Cybercinétose

L'objectif de cette partie est de rendre compte des effets néfastes de la réalité virtuelle (à l'exclusion de la réalité augmentée) pour ce qui est des symptômes s'apparentant au mal des transports, communément appelé cybercinétose, ou cinétose provoquée par une exposition à des stimulations virtuelles.

La cybercinétose a été étudiée dans le contexte de l'utilisation des simulateurs de mouvement dès les années 80, avec l'objectif de mieux comprendre les conditions de son apparition et d'en maîtriser les effets. L'armée américaine a mené de nombreuses études sur le mal du simulateur, qui ont ensuite été étendues à la réalité virtuelle. La littérature sur la cybercinétose ne concerne donc pas spécifiquement la réalité virtuelle, mais s'est construite historiquement sur celle du mal du simulateur, ce qui explique le contexte expérimental parfois extrêmement réduit par rapport à ce que représente la réalité virtuelle (e.g., visualisation passive d'une scène en mouvement).

Afin de rendre compte des effets de la réalité virtuelle en matière de cybercinétose, nous commencerons par définir celle-ci, puis nous présenterons les études réalisées contenant des données sur la cybercinétose en se concentrant principalement sur ces 10 dernières années. Les études ont été regroupées selon les types de mesures qu'elles emploient (mesures subjectives, mesures de la stabilité posturale, mesures physiologiques). Les études présentant des données sur les post-effets (voir section 5.4) d'une exposition à la réalité virtuelle sont ensuite analysées, avant d'aborder les études d'utilisateurs, dans lesquelles il peut arriver qu'aucun effet néfaste de la réalité virtuelle ne soit rapporté.

### 5.3.1 Qu'est ce que la cybercinétose ?

L'utilisation de la réalité virtuelle provoque parfois des effets indésirables chez leurs utilisateurs, rassemblés sous le nom de cybercinétose. La cybercinétose, ou cinétose liée à l'usage de stimulations générées avec un dispositif de réalité virtuelle, regroupe des symptômes similaires à ceux éprouvés dans d'autres cinétoses : pâleur, sensation de malaise, désorientation, maux de tête, fatigue, vertiges, nausées, vomissements, tachycardie, hypersalivation. Ce sont des manifestations physiopathologiques inconstantes, qui reposent sur des modes de réaction individuels, combinant des signes sympathiques et parasympathiques pouvant prendre des formes multiples (nauséuses, vertigineuses, psychiques).

Les cinétoses, qu'elles relèvent de la cybercinétose, du mal de simulateur, du mal de voiture, du mal de mer ou du mal de l'espace par exemple, sont le résultat de l'exposition à des stimulations sensorielles non habituelles, impliquant souvent de nouvelles congruences sensorielles. L'adaptation des individus aux stimulations à l'origine de la cinétose est très variable et l'on ne sait pas encore quels sont les facteurs prédictifs de l'apparition de la cinétose et les possibilités d'adaptation aux stimulations générant celle-ci. Pour certains individus, il suffit d'arrêter l'exposition aux stimulations pour que la cinétose s'arrête. Pour d'autre, celle-ci persiste même après une brève exposition aux stimuli qui ont suscité la cinétose. Les cinétoses sont philogénétiquement assez largement exprimées, car elles sont retrouvées chez plusieurs espèces animales. Parmi les marqueurs biochimiques, une mesure physiologique relativement spécifique est l'augmentation de la vasopressine plasmatique accompagnée d'une augmentation non spécifique de l'ACTH (hormone adrénocorticotrope ou adrénocorticotrophine) plasmatique, du cortisol et des catécholamines (voir R. M. Stern, Koch, & Andrews, 2011 pour plus de détails).

Dans le cadre de l'utilisation de la RV, les symptômes relevant de la cybercinétose ont une probabilité d'occurrence élevée, largement rapportée dans la presse générale mais également dans de nombreuses études scientifiques. Être capable de prédire si un individu va être sujet à des symptômes de cybercinétose permettrait d'éviter des expériences déplaisantes. Cependant, s'il y a plusieurs hypothèses pour expliquer la survenue de cybercinétose, aucune ne permet d'établir des stratégies pour empêcher son apparition. Les conséquences même de la cybercinétose sont peu investiguées : il est fréquent de voir son étude limitée à son apparition, et non à sa durée ou à sa disparition progressive, comme c'est le cas pour d'autres cinétoses dont on connaît les effets néfastes (e.g. grande difficulté pour un astronaute de réaliser ses tâches pendant les premiers jours de microgravité où il/elle souffre de mal de l'espace).

Beaucoup d'études ont été réalisées sur l'apparition de cinétose lors de l'utilisation des simulateurs de conduite ou de vol dans les années 1980, avant de s'intéresser directement à la cinétose provoquée par l'exposition à la réalité virtuelle. La variété des dispositifs, des interfaces, comme des contenus des environnements utilisés, limite la possibilité d'estimer son incidence avec précision.

Les différentes hypothèses proposées pour expliquer les causes de la cybercinétose sont toutes basées sur les hypothèses émises dans le cadre plus général des cinétoses. La théorie dite du conflit sensoriel (Reason & Brand, 1975) est la plus ancienne théorie explicative en matière de survenue des cinétoses lors de l'exposition à la réalité virtuelle, et la plus largement acceptée au vu des nombreuses références que l'on retrouve dans la plupart des rapports, articles et travaux théoriques sur le sujet. Cette théorie postule que la survenue des cinétoses a pour origine l'existence d'un conflit multisensoriel (*i.e.*, entre les informations provenant de différents systèmes sensoriels) ou bien intra-sensoriel (*i.e.*, au sein d'un même système sensoriel, comme lorsque le conflit s'opère entre les organes canalaire et otolithique du système vestibulaire (Griffin, 1990)). Ainsi, dans le cas de l'utilisation d'un simulateur de conduite statique par exemple, les informations de mouvement fournies par le système visuel entreraient en conflit avec l'absence d'informations vestibulaires concordantes, puisque le conducteur ne bouge pas. Ce conflit rendrait la construction d'une cohérence perceptive difficile, voire impossible, ce qui induirait les manifestations neurovégétatives connues des cinétoses. Cette théorie postule également que la cinétose apparaît quand les schémas de covariance entre les signaux sensoriels générés par le déplacement ne sont pas en accord avec les schémas des signaux attendus (construits sur la base d'expériences antérieures). Sur simulateur de conduite statique, les cinétoses seraient donc induites par la différence entre les attentes d'une stimulation multisensorielle unifiée telle qu'elle est expérimentée quotidiennement sur la route, et ce qui est perçu. Associée à cette théorie est celle de Treisman, qui a proposé que les conflits sensoriels soient assimilés par l'organisme à l'ingestion d'une toxine, donc déclenchant une réponse émétique (Treisman, 1977).

La théorie du cadre stationnaire de Prothero (1998) se base sur la perception spatiale pour interpréter les cinétoses et fournit une explication cognitive à la théorie du conflit sensoriel. En effet, cette théorie propose que le cerveau utilise des indices sensoriels pour former un modèle interne de ce qui est stationnaire, de telle façon qu'un mouvement soit perçu relativement à cette référence immobile, et dont les ruptures pourraient être sources de cinétoses. L'hypothèse du cadre stationnaire suggère que les cinétoses ne soient pas physiquement induites par des indices de mouvement contradictoires, mais soient induites mentalement par des cadres stationnaires contradictoires déduits des signaux de mouvement. Les cinétoses seraient ainsi principalement induites, non pas par un conflit sensoriel, mais par un conflit cognitif.

La théorie du contrôle postural (Riccio & Stoffregen, 1991), développée comme une alternative à la théorie du conflit sensoriel, part de l'observation que la congruence des informations sensorielles est un événement rare, y compris dans la vie quotidienne, et que l'environnement changeant dans lequel nous évoluons implique d'adapter notre posture en permanence. Les configurations perceptives inhabituelles impliquant donc des changements dans les couplages perception-action nécessaires au contrôle de la posture, cette théorie postule que les cinétoses surviendraient dans les situations où des stratégies de contrôle ne sont pas disponibles, en raison de la nouveauté de la situation et de difficultés à s'y adapter. L'hypothèse centrale de la théorie du contrôle postural est donc que l'instabilité posturale, marqueur d'une inadaptation à la situation, serait une condition nécessaire et suffisante de la survenue des cinétoses. Elle prédit ainsi que des différences dans les *patterns* d'ajustements posturaux (avant l'exposition et/ou au cours de l'exposition) existent entre les individus qui seraient sujet à la cybercinétose et les individus qui ne le seraient pas.

Il a été rapporté que les symptômes de la cybercinétose seraient plus sévères que ceux du mal du simulateur et d'autres cinétoses (transport, espace...), et ne présenteraient pas les mêmes types de profil d'apparition (Stanney & Kennedy, 1997). Il est possible que les développements technologiques intervenus depuis le travail cité conduisent à une nouvelle analyse de ces profils. Il a longtemps été estimé que les limitations technologiques (latence, précision du *tracking*, etc.) étaient impliquées dans la genèse de la cybercinétose et que par conséquent la cybercinétose disparaîtrait grâce aux avancées technologiques : ces dernières années ont démontré qu'il n'en est rien. On assiste maintenant à une recrudescence récente des études sur la cybercinétose, motivées par l'obstacle que sa potentielle survenue crée toujours au développement d'un marché.

L'apparition et les conséquences de la cybercinétose peuvent être évaluées par différents outils. Beaucoup d'études se basent sur les réponses de participants à des questionnaires listant des symptômes. Nous commencerons par présenter ces questionnaires (cf. 5.3.2), leurs avantages et inconvénients, avant de faire une revue des conclusions des études fondées sur ce type de mesures. Les études approchant la cybercinétose au moyen de questionnaires sont majoritaires. Elles ont été divisées selon les paramètres technologiques potentiellement liés à la cybercinétose auxquels elles s'intéressent (mode de navigation, mode d'interaction, mode de diffusion), et selon les différentes caractéristiques de l'utilisateur qu'elles prennent en compte (sexe, présence, anxiété, expérience, sensibilité au mal des transports et âge).

La cybercinétose est également évaluée par des mesures posturales, dans un contexte théorique considérant que l'instabilité posturale est un prédicteur de la cinétose. Il a été rapporté que l'apparition de la cinétose est précédée d'un changement significatif de certains indices posturaux (R. S. Kennedy & Stanney, 1996; Riccio & Stoffregen, 1991). Dans le cadre spécifique de la cybercinétose, les études mesurent les oscillations posturales pendant ou autour d'une exposition à un stimulus de réalité virtuelle, et se servent de ces mesures comme valeur prédictive de la cybercinétose ou comme valeur de mesure de la cybercinétose, très souvent associée à des scores de questionnaires. Ces études font l'objet de la partie 5.3.3.

Enfin, quelques études tentent une approche de la cybercinétose par des mesures physiologiques autres que celles de la posture (température de la peau, fréquence

cardiaque...). La partie 5.3.4 se concentre sur ces études. Peu d'études sont encore recensées et les mesures restent variées.

La partie 5.3.6 présente les effets visuels liés à la cybercinétose, et détaille les troubles visuels pouvant apparaître après une exposition en réalité virtuelle.

Finalement, un bilan des études dans lesquelles la cybercinétose a été mesurée, mais où elle n'a pas ou peu été retrouvée, est donné. La particularité de ces études est qu'elles sont souvent dites d'« usage » : une application à visée spécifique est testée sur un groupe d'utilisateurs et l'objectif premier est de vérifier l'efficacité de l'application. Des mesures de cybercinétose sont faites de façon anecdotique et les effets néfastes de l'utilisation de l'application sont mentionnés mais ne font pas l'objet spécifique de l'étude.

### 5.3.2 La cybercinétose évaluée par des questionnaires

#### 5.3.2.1 Présentation des questionnaires

La majeure partie de la littérature se penchant sur la cybercinétose propose aux participants d'évaluer les symptômes provoqués au moyen de questionnaires, que ce soit par auto- ou hétéro-évaluation. Plusieurs outils métrologiques ont été utilisés, utilisant différentes formes de cotation (étendue de la gradation des réponses, nombre d'items...). Il a paru important de présenter les caractéristiques de ceux-ci afin de fournir un cadre d'interprétation aux études utilisant ces questionnaires qui sont rapportées dans la section 5.3.4. Très souvent, la cybercinétose est évaluée en lien avec la susceptibilité au mal des transports. La sensibilité au mal des transports est également mesurée par des questionnaires, qui sont présentés à la fin de cette partie.

##### 5.3.2.1.1 *Questionnaires évaluant la Cybercinétose*

*Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) (R. S. Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993)*

Le *Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)* a été développé pour fournir une échelle de mesure des cinétoses intervenant lors de l'utilisation de simulateurs de vol par des pilotes de l'armée américaine (R. S. Kennedy *et al.*, 1993), principalement afin d'identifier les simulateurs générant des problèmes chez leurs utilisateurs. Les auteurs notent que les cinétoses liées aux simulateurs sont différentes de celles observées lors de transports, et que par conséquent une échelle spécifique doit être utilisée. En effet, certains symptômes n'ont pas la même valeur prédictive en condition de simulateur et de transport réel. La fatigue est par exemple un signe précurseur du mal des transports. Cependant, en simulateur, la fatigue n'est pas forcément liée à une réponse parasympathique due à une stimulation excessive de mouvement. Elle peut tout simplement indiquer que la tâche à effectuer est énergétiquement coûteuse si elle n'est pas accompagnée d'autres symptômes liés à une activation parasympathique.

L'objectif des auteurs était de déterminer quels symptômes changeaient systématiquement avant et après l'exposition. Les symptômes ont été sélectionnés sur la base d'études préalables faites durant 1 200 expositions sur 10 simulateurs différents, avec les critères suivants :

- changement systématique avant et après l'exposition ;
- fréquence d'apparition suffisamment élevée pour avoir une valeur indicatrice.

Les vomissements ont été ainsi retirés de la liste des symptômes, car leur apparition est trop faible pour avoir une valeur statistique (2 occurrences sur environ 1 200 expositions).

Le questionnaire développé a pour objectif d'être utilisé en post exposition, sur des participants en bonne santé. Les auteurs notent en effet que chez des sujets rapportant une pathologie vestibulaire, ainsi que chez des sujets venant de souffrir d'une infection grippale, les seuils de susceptibilité à la cinétose sont accrus (de Wit, 1957; Kellogg, Kennedy, & Graybiel, 1965).

Par conséquent, chez eux, l'utilisation d'un questionnaire reflète les variations entre la pré et post exposition liées à la pathologie, plutôt qu'à l'exposition.

L'échelle comprend 16 symptômes et est constituée de trois clusters de symptômes partiellement indépendants, chacun reflétant l'impact de l'exposition sur un ensemble spécifique de systèmes physiologiques de l'humain : *désorientation* (D), incluant des symptômes comme les étourdissements et les vertiges; *oculomoteur* (O), incluant fatigue oculaire, difficulté à focaliser, vision floue, maux de tête ; *nausée* (N), incluant nausées, estomac dérangé, salivation accrue, éructations.

Chaque item (symptôme) est noté de 0 à 3. Ils sont additionnés par cluster, puis multipliés par une valeur correspondant au poids de chaque cluster (N = total cluster N x 9,54 ; O = total cluster O x 7,58 ; D = total cluster D x 13,92) permettant de comparer l'expression de la cybercinétose entre clusters. Ils peuvent aussi être additionnés et multipliés par 3,74 pour donner un simple score total (sans prise en compte des différents clusters). Le score total minimal est de zéro, le score total maximal de 235,62. Dans l'étude de validation du questionnaire sur 1 200 observations, l'écart type des scores est de 15.

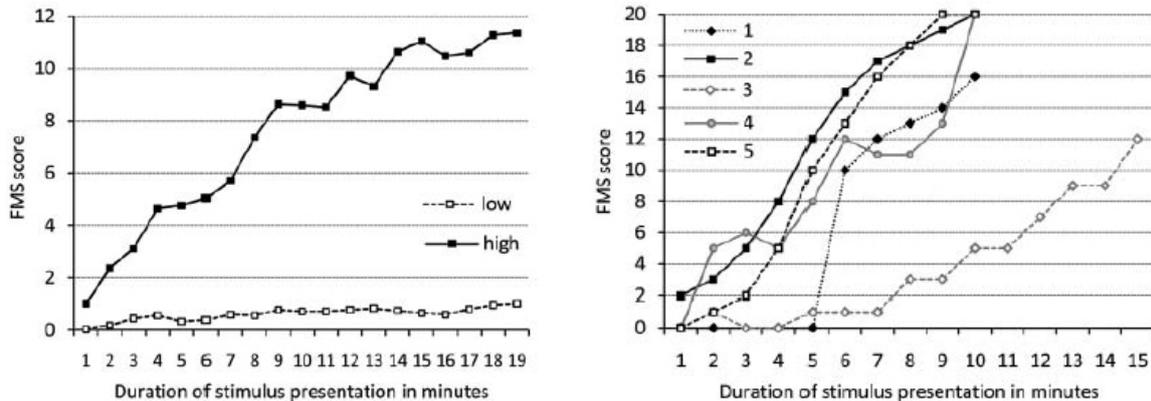
La séquence temporelle de l'enchaînement des symptômes distinguerait la cybercinétose des autres types de cinétoses. La cybercinétose débiterait par des symptômes fréquents et sévères de *désorientation* (D), suivis par des symptômes du cluster *nausée* (N) et moins par des symptômes *oculomoteurs* (un profil D>N>O). Le mal de simulateur suivrait un profil O>N>D, le mal de mer un profil N>O>D, et le mal de l'espace un profil N>D>O (Stanney, Kennedy, & Drexler, 1997).

#### Fast Motion Sickness (FMS) (Keshavarz & Hecht, 2011a)

Cet outil a été proposé avec l'objectif de mesurer la cinétose pendant l'exposition, quelle que soit la nature de celle-ci (transport réel ou réalité virtuelle). Le participant doit dire s'il se sent malade, sur une échelle de 0 à 20, en se focalisant sur la nausée, l'inconfort général, les sensations gastriques, et en ignorant d'autres effets du type nervosité, ennui et fatigue. Cette mesure a été validée par les auteurs sur deux expériences (total de 126 participants) qui cotent verbalement la sévérité de la cinétose chaque minute pendant l'exposition (visualisation sur un grand écran d'une vidéo prise depuis une voiture de course en mouvement pendant 19 minutes dans l'une et d'une simulation de trajet sur un grand huit pendant 15 minutes dans l'autre), avant de remplir le SSQ. Les scores FMS ont montré une bonne corrélation avec le score total au SSQ et son cluster N.

L'avantage de cette mesure est sa répétabilité. Les auteurs ont pu ainsi montrer l'évolution de l'inconfort au cours de l'exposition (cf. Figure 33 gauche), et regarder en particulier la courbe de 5 de leurs sujets qui ont dû arrêter l'expérience avant la fin de l'exposition à cause de leur niveau d'inconfort (cf. Figure 33 droite).

On peut noter au moins deux inconvénients à cette mesure : 1) on ne peut être certain que les participants se focalisent sur les symptômes pertinents et écartent les symptômes reliés à leur niveau de stress lorsqu'ils cotent leur niveau d'inconfort ; 2) la mesure se focalise sur ce qui est relié à la nausée et écarte ainsi d'autres contributeurs potentiels à la cybercinétose, comme la désorientation.



**Figure 33 : Évolution du score FMS (min : 0, max : 20) au cours d'une exposition de 19 minutes à un stimulus visuel en mouvement présenté sur grand écran.**

À gauche, les deux courbes présentent les données des participants séparés en deux groupes selon la médiane du score FMS (*low* = score < 6, n=34 ; *high* = score >=6, n=31). Les scores rapportés s'étendent entre 0 et 11.

À droite, scores de 5 participants ayant abandonné l'exposition à cause d'une nausée trop importante. Le score maximal de 20 est ici atteint alors qu'il ne l'est pas pour le reste de la population.

#### Virtual Reality Symptoms Questionnaire (VRSQ) (H. K. Kim, Park, Choi, & Choe, 2018)

Ce questionnaire a été développé pour pallier le fait que le SSQ n'est pas dédié à la réalité virtuelle. Il est fondé sur une modification et adaptation du SSQ. Les auteurs pensent que la cybercinétose est une sous composante du mal de simulateur, et que certaines caractéristiques du SSQ ne s'appliquent ainsi pas à la réalité virtuelle. À ce titre, ils proposent une simplification du SSQ, basée sur l'analyse des scores au SSQ de 24 participants faisant une tâche de sélection de cibles visualisées dans un visiocasque, répondant au moyen d'un bouton situé sur le dessus du visiocasque ou en maintenant le regard fixe sur la cible. Deux tailles de cibles sont testées. Les résultats de l'étude suggèrent que les modes de réponses ont une influence sur la cybercinétose : la sélection de la cible par le regard est liée à la présence de symptômes plus intenses. La taille de la cible est également en jeu : les cibles les plus petites sont également reliées au fait de rapporter plus de symptômes. Le contenu de l'environnement et la tâche ont donc potentiellement un rôle dans le développement des symptômes. Les résultats des clusters du SSQ montre que les scores au cluster N sont les plus faibles. Une analyse factorielle suggère de ne retenir que 9 items et 2 clusters (O et D), formant le VRQ. Une bonne corrélation est retrouvée entre le VRSQ et le SSQ. il est ainsi proposé d'utiliser le VRSQ afin de faciliter les évaluations, puisque ce questionnaire est plus court.

#### Motion Sickness Assessment Questionnaire (MSAQ) (Gianaros, Muth, Mordkoff, Levine, Stern, et al., 2001)

Cette échelle comporte 20 items cotés de 1 à 9, et une structure en 4 facteurs (gastro-intestinal, central, périphérique, dimension liée à la fatigue - sopite<sup>14</sup>).

<sup>14</sup> Le Syndrome de sopite se décrit comme étant un mal des transports se manifestant uniquement par des signes de fatigue (difficulté de se concentrer ou de faire des efforts, l'apathie, les sensations de grande fatigue, de faiblesse, de lourdeur, etc.). Ce syndrome est possiblement causé par le système vestibulaire. Lawson et al. (2002) cite une étude dans les années soixante, effectuée par Graybiel et ses collaborateurs, qui démontre cette possibilité car les participants restreignaient intentionnellement leurs mouvements de tête même après la cessation des nausées.

<http://w3.uqo.ca/cyberpsy/index.php/cybermalaises/>

Afin d'aboutir au questionnaire, 4 phases se sont succédées, de la construction à la validation. Dans la première phase de l'étude, 67 étudiants (44 femmes, âge médian 21 ans) ont listé 10 adjectifs décrivant leurs sensations dans des situations de cinétose. Une liste de 87 adjectifs a été générée et classée selon les scores de 10 à 1 qui leur ont été attribués sur la base de la pertinence de l'adjectif pour décrire l'expérience de cinétose.

Après élimination des adjectifs similaires, les 34 adjectifs en haut du classement ont été inclus dans un questionnaire pour la deuxième phase de l'étude. Lors de celle-ci, 747 étudiants (448 femmes, âge médian 19 ans) ont coté sur une échelle de Likert en 4 points les 34 adjectifs selon la précision de description de leur expérience de cinétose. Vingt adjectifs ont été retenus pour leur pouvoir descriptif de la cinétose, et analysés pour mettre en évidence une structure factorielle. Une solution à 4 facteurs est retenue : gastro-intestinal, central, périphérique, sopite. Dans une troisième phase, 310 participants (172 femmes, âge médian 19 ans) cotent l'échelle en 20 items afin de la valider. Dans la dernière phase, 21 étudiants (13 femmes, âge médian 19 ans) sont soumis à un stimulus optokinétique (mouvement tambour projetant des lignes noires et blanches), l'échelle leur est proposée pour estimer leur niveau de cinétose, et est comparée aux scores d'autres questionnaires afin de vérifier la corrélation des scores.

Cette échelle comporte des items que l'on retrouve dans d'autres échelles. Elle est basée sur des rapports subjectifs ne précisant pas la situation générant la cinétose.

#### Autres échelles

On retrouve dans la littérature l'utilisation d'échelles dont la variation relève de la granularité de la cotation proposée et non des items testés. Elles se concentrent en général sur le symptôme de nausée. Plusieurs critiques sont soulevées par les échelles ne proposant qu'une cotation entre 1 et 4 (1 = pas de symptômes, 4 = nausée forte) (Draper, Viirre, Furness, & Gawron, 2001), ou encore en 5 points, ou en 7 points (Griffin & Newman, 2004). Les auteurs du FMS (Keshavarz & Hecht, 2011b) reprochent à ces dernières de ne pouvoir adéquatement représenter la variation de l'intensité de la nausée dans ses manifestations extrêmes.

Le *Misery Scale Index* (MSI) est une échelle en 11 points, cotée de 0 à 10 (Bos, de Vries, van Emmerik, & Groen, 2010). Chaque gradation représente la présence d'un symptôme particulier : 1 correspond à inconfort, puis viennent le vertige, la sensation de chaleur, les maux de tête, et enfin tout ce qui est relié aux nausées et vomissements. Il est difficile de soutenir l'utilisation de cette échelle qui repose sur une hiérarchisation des symptômes injustifiée, et pour laquelle répondre correctement aux questions n'est pas aisé pour les participants.

Une version courte du SSQ a été proposée (Nichols, Cobb, & Wilson, 1997), le *Short Symptom Checklist* (SSC). C'est un questionnaire qui ne contient que 6 items (2 pour chaque cluster), cotés en 5 points, de « pas du tout » à « sévère ». Les auteurs veulent l'utiliser pour répéter les mesures pendant l'exposition, mais sa répétition est compliquée et la corrélation avec le SSQ post exposition est moins bonne qu'avec la FMS.

#### **5.3.2.1.2 Questionnaires de sensibilité au mal des transports**

Les liens entre la cybercinétose et la sensibilité au mal des transports ont d'abord été étudiés dans le cadre plus large du mal de simulateur. Les variations dans l'incidence du mal de simulateur sont reliées aux caractéristiques techniques des simulateurs employés, et dépendent des critères utilisés pour mesurer la cinétose. On a pu également observer que certaines différences individuelles dans la sensibilité au mal de simulateur sont liées à l'existence d'un lien entre la cinétose et la sensibilité au mal des transports telle que déterminée par un questionnaire sur les expériences passées de mal des transports (Kennedy, Fowlkes, Berbaum, & Lilienthal, 1992).

Depuis, de nombreuses études utilisent des questionnaires investiguant la sensibilité des participants au mal des transports, dont le plus commun est le *Motion Sickness Questionnaire* (MSQ) (Reason, 1968). Le MSQ donne un score sur la base de l'intensité de symptômes

associés à la cinétose dans différentes situations de mobilité (voiture, bus, train, avion, petit bateau, navire, balançoire, manège, montagnes russes). Une simplification en 10 items (*Motion Sickness Susceptibility Questionnaire*, MSSQ) a été proposée (J. F. Golding, 1998) dans une étude confirmant sa validité et la forte association entre migraine et sensibilité au mal des transports (deux tiers des patients migraineux sont sensibles au mal des transports).

Une étude récente (Gavvani, Walker, Hodgson, & Nalivaiko, 2018) a souligné que les manifestations paroxystiques de la cinétose et de la cybercinétose sont les mêmes, venant ainsi confirmer l'utilité de rechercher une sensibilité générale à la cinétose pour prédire la cybercinétose. En soumettant le même groupe de 30 jeunes adultes à deux stimulations provocatrices, l'une en réalité virtuelle avec visiocasque, l'autre pendant des accélérations sur un siège rotatoire, il a été montré que les symptômes et les manifestations physiologiques (conductance de la peau mesurée au niveau du front) sont similaires dans les deux conditions. L'apparition de nausée et les scores maximaux de cinétose, tels que mesurés par le MSAQ, sont fortement corrélés dans les deux situations. Il est intéressant de noter que la latence de l'apparition des nausées était corrélée négativement avec la nausée maximale signalée par les sujets dans les deux situations. En d'autres termes, les sujets se sentant plus rapidement nauséux ont également eu des scores de nausée plus élevées à la fin de l'expérience. L'une des explications possibles de cette constatation est que les sujets qui ont déclaré une apparition précoce des nausées, ont continué à développer des symptômes plus rapidement au fur et à mesure de l'expérience. Cette constatation va dans le sens d'un principe de précaution : s'arrêter à l'apparition de symptômes afin de ne pas les empirer.

Enfin, il est important de noter qu'une stimulation visuelle n'est pas un facteur sensoriel nécessaire pour l'apparition de la cinétose, puisque les sujets aveugles rapportent de la cinétose (Graybiel, 1970). Il semblerait que seuls les patients vestibulaires bilatéraux y soient résistants (Johnson, Sunahara, & Landolt, 1999). Si ces faits sont généralisables à la cybercinétose, cela suggère que les environnements virtuels dans lesquels le participant est immobile alors qu'il est exposé à un mouvement, qu'il soit visuel ou auditif (générant ainsi un conflit avec les informations vestibulaire en situation passive), ou encore les environnements virtuels dans lequel le participant est actif, générant ainsi des stimulations vestibulaires, sont susceptibles de provoquer de la cybercinétose à des degrés divers selon la sensibilité du participant au mal des transports.

### 5.3.2.2 Avantages et inconvénients d'une mesure par questionnaire

Les études de la cybercinétose employant des questionnaires, que ce soit en mode d'auto- ou hétéro-évaluation, ne peuvent livrer des réponses univoques quant aux facteurs en jeu dans l'apparition des symptômes. Si le SSQ reste l'outil le plus utilisé, les préconisations des auteurs ne sont pas systématiquement suivies. On retrouve ainsi souvent des expériences dans lesquelles le SSQ est proposé aux participants avant et après l'exposition en réalité virtuelle, prenant la variation du score entre les deux moments comme un effet de l'exposition. Ce type de mesure répétée pose au moins trois types de problèmes :

- 1) La répétition du questionnaire peut induire chez le participant l'idée que l'on s'attend à ce que les mesures varient d'une passation à l'autre, provoquant ainsi une augmentation artificielle des scores.
- 2) La passation d'un questionnaire avant l'exposition peut inciter le participant à focaliser son attention pendant l'exposition sur des symptômes auxquels il ne ferait autrement pas attention.
- 3) La variation entre les deux mesures peut refléter une appréciation subjective de l'effet de l'exposition (Dong, Yoshida, & Stoffregen, 2011) plus qu'un score de cybercinétose. Les scores aux auto-questionnaires sont, encore plus que les hétéro-questionnaires, dépendants de la tendance à la somatisation du participant. Certaines échelles du mal des transports ont proposé d'inclure des items non reliés à la cinétose (par exemple, « avez-vous eu mal aux mains ? ») de sorte à évaluer la tendance à la somatisation

des participants, mais celles-ci ne sont presque jamais utilisées en réalité virtuelle, et il n'est pas proposé d'analyse des scores permettant de moduler le score total par un facteur de somatisation.

Dans la ligne de ce dernier problème, une étude (Almeida, Rebelo, Noriega, & Vilar, 2017) a observé que la simple action de lire un consentement de participation insistant sur les effets secondaires de la réalité virtuelle est reliée à des scores plus élevés au SSQ pendant une exposition en réalité virtuelle *via* visiocasque (étude sur 54 participants, 27 femmes, moyenne d'âge de 30 ans). Il est possible que l'anxiété induite par la suggestion soit un médiateur de cet effet.

Finalement, il faut préciser que le SSQ est un questionnaire qui a été établi sur une population composée de 1 200 soldats, ainsi non représentative de la population générale. Le questionnaire a été construit dans le but de caractériser les symptômes liés à l'utilisation de simulateurs, afin de mettre en évidence les particularités techniques des simulateurs qui pourraient expliquer l'apparition des symptômes. Les 16 items sont représentés dans plusieurs facteurs, chaque facteur étant composé de 7 items. Les facteurs du SSQ ne peuvent donc renseigner sur la nature physiologique de la manifestation avec précision.

Enfin, les questionnaires ne sont que l'image des symptômes en post exposition, puisqu'il n'est pas possible de les compléter pendant l'exposition. Les échelles courtes basées sur la cotation de l'unique symptôme de nausée ont été imaginées afin de remédier à ce problème (Keshavarz & Hecht, 2011b), mais peuvent provoquer des ruptures dans l'immersion du participant en perturbant sa sensation de présence dans l'environnement virtuel. Cette méthode est également critiquable du fait qu'elle ne s'intéresse qu'au seul symptôme de nausée, alors qu'il est rapporté que les manifestations paroxystiques de la cybercinétose telle que l'émésis (vomissement) existent, même si elles sont rares (H. K. Kim *et al.*, 2018).

Pour toutes ces raisons, il est possible de retenir de cette revue des études le facteur d'abandon comme une mesure supplémentaire de la cybercinétose, en plus des scores aux échelles et des mesures physiologiques. Le nombre de participants décidant d'arrêter l'exposition à un environnement virtuel est sans doute la mesure la plus fiable de la cybercinétose.

### **5.3.3 Revue des études utilisant des questionnaires d'auto et hétéro-évaluation de la cybercinétose**

Certaines études se concentrent sur les facteurs technologiques comme facteurs potentiellement explicatifs de la genèse de la cybercinétose. D'autres s'intéressent aux facteurs humains, et mettent en évidence les importantes différences interindividuelles qui existent dans les manifestations de la cybercinétose.

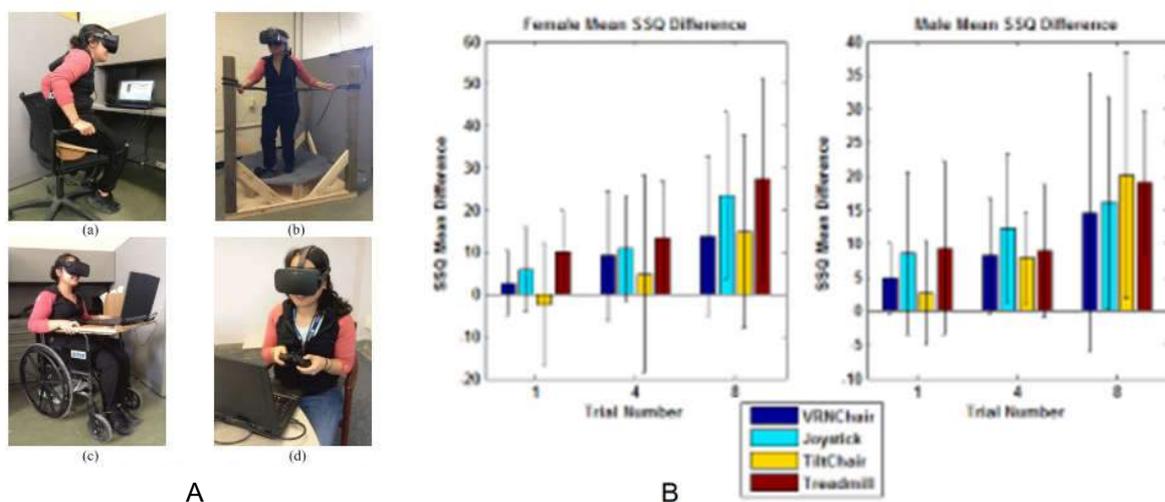
#### **5.3.3.1 Paramètres technologiques potentiellement en jeu dans la genèse de la cybercinétose**

##### **Mode de navigation et d'interaction (e.g. passif vs actif)**

Huit études ont été recensées. Cinq d'entre elles se concentrent sur les liens entre mode de navigation dans l'environnement virtuel et cybercinétose. Les trois autres s'intéressent à des aspects plus spécifiques, dans des situations expérimentales dont on peut critiquer la proximité avec la réalité virtuelle à cause de la passivité imposée au sujet.

Une étude (Aldaba *et al.*, 2017) a été conduite sur 20 participants de 18 à 31 ans (dont 10 femmes) afin d'évaluer la variation de la cybercinétose mesurée par le SSQ et la stabilité posturale dans quatre conditions de contrôle de navigation dans un environnement virtuel : le participant est sur une chaise dont l'assise est orientée vers l'avant (*cf.* Figure 34 A(a)), il contrôle les rotations dans l'environnement virtuel en tournant sur l'axe de la chaise et ses

translations en se penchant en avant ; le participant est sur un tapis omnidirectionnel et contrôle la navigation par les mouvements des pieds (cf. Figure 34 A(b)) ; le participant est dans une chaise roulante (VRNChair) et détermine sa navigation par la manipulation de la chaise (cf. Figure 34 A(c)) ; le participant est assis sur une chaise traditionnelle et manipule un *joystick* pour se déplacer dans l'environnement virtuel (cf. Figure 34 A(d)). L'environnement est visualisé dans un visiocasque (*Oculus Rift* ou *HTC Vive*). La tâche du participant est d'explorer plusieurs étages d'un immeuble pour trouver des cibles. La seule variable reliée au score du SSQ est le temps passé dans l'environnement virtuel : plus il est long, plus le score est haut. Cependant, les données sur le temps passé dans l'environnement ne sont pas mentionnées dans l'étude et sont dérivées de la distance parcourue, dont les variations sont de l'ordre de quelques mètres. Il est ainsi difficile de conclure un effet avéré du temps passé dans l'environnement sur le SSQ. Dans cette étude, les mesures de SSQ sont faites avant l'exposition et après le 1<sup>er</sup>, 4<sup>ème</sup> et dernier essai à la tâche (8 essais au total). La répétition des passations du SSQ (4 fois au total) limite la validité des résultats. De plus, les scores ne sont pas rapportés dans l'étude : seules les différences de scores entre les conditions peuvent être lues sur une figure. Aucun abandon n'est rapporté.



**Figure 34 : A : les 4 modes de navigation testés - B : différences dans les scores au SSQ avant et après exposition, selon le mode de navigation et le sexe (à gauche : femmes, n=10 ; à droite : hommes, n=10).**

Dans une autre étude (Conradi & Alexander, 2012), le mode de navigation ne dépend pas de l'interface mais de la liberté de contrôle laissée au participant. La navigation est totalement libre (contrôle de la rotation et de la translation par le participant), guidée (contrôle de la rotation seulement), restreinte (pas de contrôle de la direction de la navigation, juste de la direction du regard, analogue d'être passager dans une voiture), ou fixe (comme au cinéma). Les participants (28 sujets, 8 hommes, 30 ans en moyenne) doivent mémoriser la couleur et la localisation de drapeaux rencontrés. Les sessions de navigation durent 8 minutes maximum. Les participants visualisent la scène avec un visiocasque *NVISOR SX* équipé d'un *tracker* de mouvements de la tête. Chaque participant passe les 4 conditions, ainsi qu'une session d'entraînement. Le questionnaire SSQ est passé en pré et post-expérience, ainsi qu'une heure après la fin de chaque session. Un test de posturographie est également proposé, ainsi qu'un test de Romberg (maintien de la posture debout pieds joints, yeux fermés et bras tendus vers l'avant). Les scores augmentent juste après la session et reviennent au niveau initial une heure après. Il n'est pas retrouvé d'influence du mode de navigation sur le SSQ, ni sur la performance de mémorisation. Les sujets coutumiers de la réalité virtuelle ont un score SSQ qui diminue plus vite au cours des sessions. Quatre sujets n'ont pas fait l'expérience jusqu'au bout à cause de la cybercinétose.

Un autre étude (Mayor, Raya, & Sanchez, 2019) montre elle un effet de l'interface sur la cybercinétose, en comparant 4 méthodes de navigation pour le sujet immergé visuellement

via un visiocasque *HTC Vive* : 1) méthode « point d'intérêt », le participant fixe des indicateurs visuels pour contrôler le mouvement, le participant est assis sur un siège pivotant ; 2) « *Gamepad* » (manette de jeu) -utilisation d'un *gamepad* pour interagir avec les objets et bouger-, le participant est assis sur un siège pivotant ; 3) « *Teleport* », utilisation d'un objet tangible représenté dans l'environnement virtuel sur lequel sont disposés des boutons de contrôle et un *tracker*, le sujet est debout et immobile ; 4) « *Room scale* », interaction via le *tracking* de la tête, plus des objets traqués, le sujet est debout et peut marcher dans la zone de *tracking* (4 mètres sur 4).

Les sujets sont immergés dans 4 scènes différentes sollicitant des interactions selon chacune des méthodes, pendant une durée moyenne de 6 minutes 25 secondes pour chaque scène. Un questionnaire de présence et le SSQ sont proposés après chaque session. Au total, 48 sujets participent à l'expérience (dont 24 femmes), avec un âge médian de 28,5 ans (18-62). L'utilisabilité des modes d'interaction est également étudié via le temps mis pour effectuer la tâche.

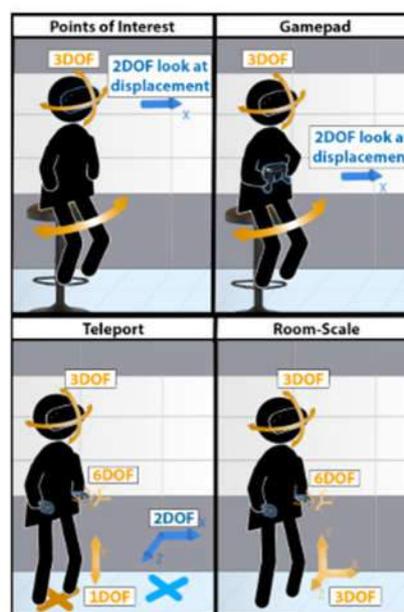


Fig. 1. The figure shows the different DOF allowed in the user's real movement (orange/light color) and additional DOF thanks to the virtual locomotion method used (blue/dark color). The sum of both indicates all the possibilities that the user has to move in the virtual environment for each method.

### Figure 35 : Différents champs de profondeur dans l'environnement réel de l'utilisateur (couleur orange) et d'autres champs de profondeur grâce à des méthode de locomotion virtuelle.

Un effet du mode d'interaction est retrouvé sur la présence et sur le score de cybercinétose tel que mesuré par le SSQ. Les méthodes « *Teleport* » et « *Room Scale* » produisent moins de cybercinétose que « *Points of interest* » et « *Gamepad* ». Le cluster D du SSQ est celui montrant le plus de différence.

L'étude relève 13,5 % d'arrêts sur un total de 192 tests sur tous les sujets confondus. Le nombre d'arrêts est supérieur dans la méthode « *Points of interest* » (65,4 %) suivie par les méthodes « *gamepad* » (15,4 %) et « *teleport* » (15,4 %), puis « *room scale* » (3,8 %). Au total, la méthode jugée la plus agréable par les participants est « *room scale* », c'est également celle qui suscite le moins de cybercinétose. Elle est celle donnant lieu à l'interaction la plus naturelle, mais elle pose le problème de la limitation liée à la surface de *tracking*.

Des résultats suggèrent que l'utilisation d'un mode de navigation pertinent à la situation virtuelle proposée n'a pas de lien avec l'incidence de cybercinétose (Mittelstaedt, Wacker, & Stelling, 2018). Dans le cadre de cette étude, il s'agit d'une comparaison du mode de contrôle

et du mode de visualisation dans une tâche de navigation sur un vélo. Le sujet pédale sur un vélo qu'il guide ou le sujet contrôle la navigation *via* un « *gamepad* ». Deux autres conditions comparent la visualisation *via* un écran et *via* un visiocasque (*Oculus 1*, avec stereo visuelle). Dans toutes les conditions, les mouvements de la tête sont trackés. Les 60 sujets (dont 40 femmes), âge moyen 25,62 ans, sont répartis en 3 groupes selon la condition : vélo et visiocasque, vélo et écran, *gamepad* et visiocasque. Ils participent à 3 sessions de navigation prédéfinie dans une île, avec des côtes et des descentes selon la session.

La cybercinétose est mesurée avec le SSQ à trois reprises : avant, pendant et après l'expérience.

Alors que la condition avec écran prend soin de reproduire les caractéristiques du port d'un casque de réalité virtuelle (HMD pour *Head Mounted Display*) (poids équivalent ajouté sur la tête, limitation du champ visuel à l'identique dans les deux conditions d'équipement visuel), la visualisation sur grand écran s'avère moins provocatrice de cybercinétose que le visiocasque. Il n'y a pas plus de manifestations de cybercinétose dans la condition de navigation avec le vélo qu'avec la manette de jeu. Il est à noter que 4 des 60 participants ont arrêté de façon précoce l'expérience.

Un autre mode de navigation a été étudié dans le cadre très particulier de l'utilisation de la réalité virtuelle pour le traitement du stress post traumatique lié à l'exposition de soldats aux conflits en Afghanistan et Iraq, suggérant qu'aucune différence en matière de cybercinétose, telle que mesurée par le SSQ, n'apparaît lors de l'utilisation d'une *VirtuSphere* ou d'un *gamepad* (Skopp *et al.*, 2014). Cependant, cette étude exploratoire a été menée sur 10 soldats n'ayant rapporté que très peu de symptômes de cybercinétose quelle que soit la condition.

Les dernières études mentionnées dans cette partie se concentrent sur des caractéristiques pratiques pouvant être apportées aux conditions d'exposition en réalité virtuelle afin d'en réduire les effets néfastes, et ont toutes été réalisées par le même groupe.

Une étude (D'Amour, Bos, & Keshavarz, 2017) sur 82 sujets (43 femmes), divisés en 4 groupes testant chacun une condition d'équipement, regarde si l'ajout d'air et/ou de vibrations peuvent réduire la cybercinétose. Les conditions auxquelles sont exposés chacun des groupes sont les suivantes : flux d'air, vibrations, flux d'air plus vibrations, situation contrôle. Le flux d'air est délivré par deux ventilateurs situés de part et d'autre de l'écran. Les vibrations sont délivrées par le siège sur lequel le sujet est assis. Les participants sont exposés passivement pendant 15 minutes à la vidéo d'une trajectoire à bicyclette dans une ville, *via* un grand écran, alors qu'ils sont assis. La FMS est utilisée pour mesurer l'incidence de la cinétose à chaque minute, ainsi que le SSQ en pré et post exposition. La cinétose est significativement diminuée dans le cas de la condition avec flux d'air (quelle que soit la mesure : FMS, mais aussi SSQ total et ses clusters) alors qu'il n'y a pas d'effet significatif des vibrations au niveau du siège. Au total, 28 participants ont arrêté l'expérience à cause de l'inconfort provoqué par la cinétose. Il n'y a aucune différence significative dans la répartition des abandons selon les conditions. La seule différence significative concerne le taux d'abandon élevé des femmes par rapport aux hommes (21 femmes et 7 hommes). Cette étude vient cependant confirmer que l'ajout d'un flux d'air est un moyen efficace pour réduire le risque d'apparition de cybercinétose, qui pourrait avoir un lien avec une action sur la température du corps. Elle vient s'ajouter à deux études utilisant la même méthodologie, suggérant pour l'une que l'ajout d'une musique plaisante agit sur la réduction de la cinétose (Keshavarz & Hecht, 2014), et pour l'autre que l'ajout d'une odeur agréable (rose) vient réduire la cinétose chez les sujets remarquant cette odeur pendant l'exposition (Keshavarz *et al.*, 2015).

Un autre aspect pratique pouvant limiter la cybercinétose relève de la liberté de mouvement pendant une exposition. Est-ce que la contention limitant les possibilités de mouvement du tronc et de la tête, en situation assise, peut réduire la cybercinétose ?

Pour répondre à cette question, une étude (Keshavarz *et al.*, 2017) a proposé à deux groupes de participants (groupe jeune, 21 sujets, âge moyen 25 ans ; groupe sénior, 16 sujets, âge moyen 71 ans) de jouer à une course de voiture sur une console de jeu (*PS3*) dans deux conditions différentes : assise libre, assise avec contention de la tête et du dos par une bande élastique. Chaque sujet est soumis aux deux conditions, à 24 h minimum d'intervalle. Les sujets étaient assis à 2 mètres d'un grand écran (3 m x 1,96 m), sur un siège équipé d'un volant et de pédales. Les séances de jeu durent 25 minutes au maximum, pendant lesquelles est mesuré le score FMS à chaque minute. À la fin de chaque session, le SSQ est complété. De plus, les sujets doivent dire s'ils se sont sentis malade ou pas, de façon binaire, et sont répartis dans un groupe « malades » ou « bien portants » selon leur réponse dans la condition donnée.

Les résultats montrent que l'incidence de cybercinétose ne diffère pas entre les conditions avec ou sans contention. La contention réduit la cybercinétose dans le groupe de personnes âgées, mais pas chez les jeunes qui ont rapporté de la cybercinétose dans la condition libre (*cf.* Figure 36). Le taux de cybercinétose a augmenté avec le temps dans le groupe des malades par rapport au groupe des bien portants et, avec le temps, la contention passive a réduit proportionnellement le taux de cybercinétose chez les personnes âgées, particulièrement dans le groupe des malades. Aucune différence n'est retrouvée au niveau de l'activité posturale entre les deux groupes, que ce soit avant ou après l'exposition à la tâche de conduite. Cinq participants n'ont pas suivi les deux séances de conduite en raison de manifestations importantes de cinétose lors de la première séance (3 conducteurs avec restrictions et 2 sans restrictions) et ont donc été exclus des analyses des données.

Les résultats de cette étude suggèrent donc que la restriction du mouvement pourrait être une méthode afin de limiter la cybercinétose chez les sujets âgés sensibles à celle-ci dans des conditions libres de mouvement. Les limitations de l'étude tiennent aux conditions non standardisées entre les participants, car ceux-ci ont un contrôle actif de la tâche de pilotage (vitesse et trajectoire).

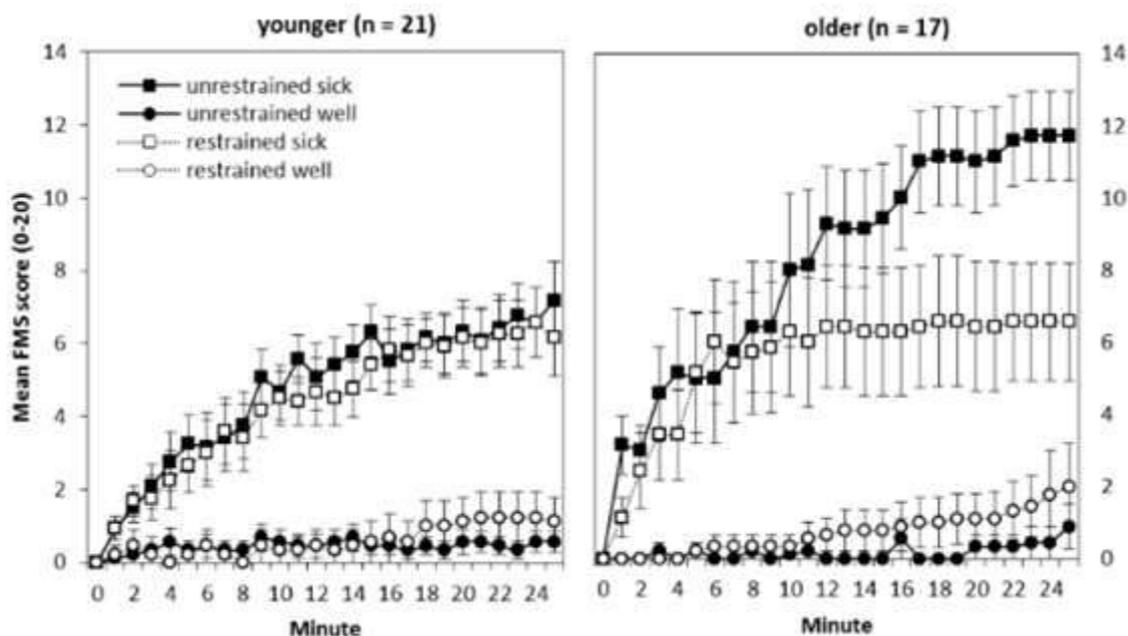


Figure 36 : Score de *Motion Sickness* (MS) pour les jeunes (gauche) et les adultes (droite).

Le type de déplacement dans l'environnement virtuel a été étudié dans une méta-analyse récente (Saredakis *et al.*, 2020), l'utilisation d'un contrôleur (par exemple *gamepad*) influençant significativement les scores de SSQ (moyenne totale la plus élevée M = 32,55). Les nausées et les sous-échelles oculomotrices sont également influencées de manière significative par le type de déplacement, les scores étant plus élevés à l'arrêt qu'en déplacement et en marche réelle. Cependant, l'hétérogénéité des études ne permet pas de conclure de manière tranchée sur le rôle du mode de déplacement.

En conclusion, il est difficile de formuler un avis tranché quant au rôle du mode de navigation et d'interaction sur la cybercinétose : les études emploient des méthodes variées et ne donnent pas systématiquement le temps d'exposition. Elles utilisent le SSQ en pré et en post exposition, parfois sans donner les scores bruts mais seulement la différence entre les deux passations. Des effets bénéfiques de certaines caractéristiques environnementales sont à noter, comme l'aération, les odeurs agréables et la contention du mouvement chez les plus âgés. Des effets potentiellement aggravants peuvent être liés au mode de navigation et d'interaction, sans faire l'unanimité des différents auteurs.

#### Mode de diffusion du rendu visuel (e.g. HMD vs écran, stéréo vs mono) et importance du contenu visuel

Le rôle de plusieurs facteurs liés au rendu visuel dans l'apparition de cybercinétose a été investigué. Nous avons classé les études pertinentes selon les 3 facteurs suivants : impact de l'interface de visualisation, impact du rendu stéréoscopique, impact d'autres caractéristiques liées au contenu visuel.

#### Visiocasque vs écran

Une revue des études publiées entre 1950 et 2017 utilisant le SSQ et se concentrant sur l'entraînement militaire et les simulateurs de vol a rapporté que l'utilisation d'un visiocasque est lié à plus de cybercinétose que l'utilisation d'un CAVE (Geyer & Biggs, 2018). En 2008 notamment, une étude comparant la visualisation sur visiocasque (*Virtual research V8*), petit écran, écran de projection et large écran semi-circulaire, mesure les scores au SSQ chez 71 étudiants (33 femmes et 38 hommes) lors de l'immersion dans une usine virtuelle et trouve que les scores au SSQ sont plus élevés dans la condition de visualisation par visiocasque (Sharples *et al.*, 2008). Cependant, il est à souligner que la qualité des visiocasques s'est radicalement transformée depuis 2012, permettant la diminution de l'inconfort provoqué entre autre par leur ergonomie (poids, chaleur). Malgré tout, 5 des 6 études analysées soulignent le lien entre visiocasque et cybercinétose, sans toutefois permettre de distinguer les facteurs potentiellement en cause : stéréo visuelle (pour les études dans lesquelles un visiocasque en stéréo est étudié comparativement à un dispositif sur écran de bureau), mouvement actif de la tête (même remarque) ou encore type de contrôle sur l'environnement virtuel.

En 2011, une série de trois études est publiée pour explorer l'impact des paramètres d'affichage visuel sur la cinétose (Keshavarz *et al.*, 2011), lors de la visualisation de vidéos prises sur un circuit de course automobile. Dans la première expérience, un groupe a regardé un film de 18 minutes 42 secondes *via* un visiocasque *NVISOR SX* utilisé en monoculaire (31 participants, 16 femmes, âge moyen 24 ans) et un deuxième groupe a regardé un grand écran de projection (260 cm x 195 cm) (20 participants, 12 femmes, âge moyen 26 ans), en cotant la FMS chaque minute. Un questionnaire binaire (oui/non) contenant une liste de symptômes similaires à celui du SSQ est proposé après la visualisation. La résolution et l'angle de vision étaient égalisés entre les deux formes de visualisation. Les scores de la FMS augmentent au fur et à mesure de l'exposition dans les deux groupes, mais contrairement aux attentes, la visualisation *via* l'écran de projection génère des scores de cinétose significativement plus élevés qu'avec le visiocasque.

Pour comprendre ce résultat, une deuxième expérience est menée. Deux autres groupes regardent le film avec un champ de vision limité et un angle d'affichage réduit, avec un synoptère<sup>15</sup> (cf. Figure 37) permettant de fournir une image identique à chaque œil, comme dans un visiocasque (19 participants, 10 femmes, 24 ans) ou un dispositif de réduction du champ de vision (20 participants, 11 femmes, 24 ans). Trois participantes doivent arrêter la visualisation à cause d'une cinétose sévère. La cinétose est réduite dans les deux groupes dans la même mesure, suggérant que la visualisation synoptique n'est pas en jeu dans la cinétose, mais soulignant le rôle potentiel de l'angle de vue : plus il est large, plus la cinétose rapportée est importante.



Figure 37 : Le synoptère utilisé dans l'étude de Keshavarz et al., 2011.

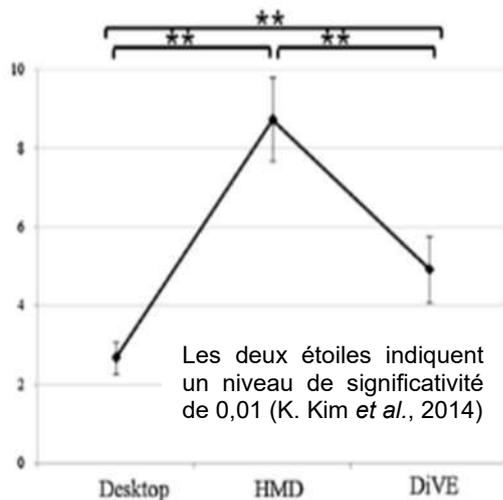
Une troisième expérience est menée pour investiguer le rôle du contexte visuel autour de l'écran. Un cinquième groupe d'observateurs (20 participants, 9 femmes, 24 ans) visualise le film sur le grand écran avec un champ de vision limité par le port d'un masque obturant le pourtour de l'écran. Les résultats montrent une diminution des scores de cinétose. Les auteurs concluent que, au-delà de l'angle d'affichage, il faut considérer l'environnement visuel autour de l'écran. S'il est présent, l'environnement augmente la cinétose en provoquant un conflit intra-visuel supplémentaire qui rend plus difficile pour le système visuel de dominer l'information vestibulaire, et augmente donc le conflit nauséogène entre l'information visuelle et vestibulaire.

Dans cette série d'expériences, 4 participants sur 110 ont dû abandonner. Il est important de garder à l'esprit que ces études sont menées sur des vidéos et ne concernent la réalité virtuelle que dans la mesure où elles utilisent les mêmes interfaces de visualisation. À ce titre, elles apportent une suggestion intéressante sur le rôle de l'angle de vue et du conflit intra-visuel provoqué par la visualisation du contexte de l'écran. Cependant, ces suggestions ne sont pas confirmées par toutes les études utilisant des dispositifs et des contenus relevant de la réalité virtuelle, comme celle rapportée plus loin (Riecke & Jordan, 2015).

---

<sup>15</sup> Appareil binoculaire à miroirs.

Dans l'étude de (Kim *et al.*, 2014) le mode de présentation de l'environnement visuel est comparé entre un écran de bureau (17 pouces), un visiocasque (Z800 3DVisor, eMagin, stereo) et un CAVE à 6 murs de projection, et entre deux types de tâches à effectuer (stressante et neutre). Le niveau émotionnel, le score pour les tâches à effectuer, ainsi que la conductance de la peau (voir également partie mesures physiologiques) sont mesurées. La cybercinétose est évaluée avec le SSQ après chaque condition. Cinquante-trois participants (28 femmes, âge moyen = 21,6 ans) sont recrutés parmi une population d'étudiants et effectuent les deux tâches avec les 3 dispositifs. La durée des immersions n'est pas indiquée : la durée totale de l'expérience varie entre 90 et 120 minutes. L'ordre de passation des différentes conditions et tâches est pseudo-randomisé et équilibré afin d'éviter un effet d'ordre. Les conditions CAVE et visiocasques sont très proches : elles utilisent les mêmes interfaces de contrôle et d'interaction, et proposent toutes les deux une diffusion visuelle en 3D. La condition CAVE induit la plus forte sensation de présence et le visiocasque provoque le plus grand nombre de symptômes liés à la cybercinétose. Le niveau de cybercinétose est le plus bas avec l'écran de bureau (voir figure X). Même si le score au SSQ est significativement plus élevé avec le visiocasque, les scores restent relativement bas (en dessous de 10) et aucun abandon n'est rapporté dans l'étude.



**Figure 38 : Illustration des scores au SSQ sur 53 participants, dans chacune des 3 conditions de visualisation.**

cybercinétose est le plus bas avec l'écran de bureau (voir figure X). Même si le score au SSQ est significativement plus élevé avec le visiocasque, les scores restent relativement bas (en dessous de 10) et aucun abandon n'est rapporté dans l'étude.

Une étude (Riecke & Jordan, 2015) a comparé 4 systèmes de visualisation : télévision 3D, rétroprojection stéréoscopique sur grand écran, visiocasque *oculus rift* et visiocasque *nVisor SX111*, au cours de 3 expériences. La première compare l'écran 3D au grand écran avec rétroprojection (23 participants, 9 femmes, âge entre 20 et 40 ans). La deuxième compare l'*oculus rift* à la télévision 3D (23 participants, 11 femmes, âge entre 19 et 53 ans). La troisième expérience compare les deux visiocasques *oculus rift* et *nVisor*, utilisés avec un champ de vue natif ou égalisé avec celui de l'écran 3D. Elle inclue 30 participants (dont 11 femmes, entre 19 et 31 ans). La tâche des participants est de poursuivre un objet avec un *joystick*, dans un environnement fortement texturé (herbe et gros flocons de neige) afin de créer un flux optique puissant. Dans les expériences 1 et 2, la navigation active est contrôlée avec un *joystick*. Dans l'expérience 3, la navigation est passive. Dans les 3 expériences, les participants sont assis et équipés d'écouteurs audio permettant d'annuler le bruit environnant. L'étude est faite intra-sujet : chaque participant est soumis à deux types d'interface de visualisation dans la même expérience. L'intensité de la vection<sup>16</sup> est mesurée, ainsi que le degré de cybercinétose, estimé sur une échelle allant de 0 (pas du tout) à 100 (doit arrêter l'expérience), et d'immersion (sur une échelle de 0 à 100).

Malgré la mesure très imprécise de la cybercinétose, se restreignant à estimer si le participant souffre du mal des transports pendant l'expérience, aucun abandon n'est observé, et les plaintes des participants sont très faibles. Dans la première expérience comparant télévision 3D et grand écran avec rétroprojection, aucune différence significative n'est retrouvée pour la vection, la cybercinétose (score moyen de 20 %), ou l'immersion. Par ailleurs, l'intensité de la vection ne prédit pas la cybercinétose.

<sup>16</sup> Sensation de mouvement propre induite par la visualisation d'un flux visuel, alors que l'on est immobile.

Dans la deuxième expérience comparant le visiocasque *Oculus Rift* à la télévision 3D, aucune quantification de la cybercinétose n'est réalisée. Le report se limite à un entretien post-exposition. Quatre participants disent avoir ressenti de la cybercinétose. Deux d'entre eux ont été plus sensibles au visiocasque, les deux autres à l'écran 3D. La comparaison n'est donc pas significative. Dans l'expérience 3 comparant les deux types de visiocasque en navigation passive, aucune différence n'est à nouveau observée pour la vection comme pour la cybercinétose (score moyen de 9 %).

Contrairement aux autres publications, les conclusions de cette étude sont que les participants sont très tolérants au changement d'interface de rendu visuel, et que le type d'interface visuelle n'a pas un grand rôle sur la cybercinétose. Il est à noter que les participants de cette étude contrôlent les déplacements par un *joystick* et que les mouvements de la tête ne sont utilisés que pour mettre à jour la stéréo. Les conditions de mouvement sont donc limitées et réduisent ainsi le risque de cybercinétose. Toutefois, les différentes interfaces de visualisation comparées conservent la stéréo et le champ visuel. Ceci ne permet pas d'isoler le rôle de ces facteurs mais suggère leur faible influence puisque la cybercinétose est faible.

À l'opposé de ces résultats, l'étude de (Dennison *et al.*, 2016) comparant les effets des conditions de visualisation sur la cybercinétose et des variables physiologiques conclue sur un effet néfaste des visiocasques (voir partie mesures physiologiques). Elle inclut 20 participants adultes (dont 6 femmes), avec une expérience antérieure des jeux vidéo. Les participants sont assis et naviguent librement dans le jeu *Half Life*, avec le contrôleur de la console de jeu *Xbox*. Ils le visualisent d'abord sur un écran (*Fiel Of View* : 60°H 40°V, 1920x1280 pixels, 60 Hz) et après une pause de 5 minutes, *via* un visiocasque *Oculus Rift DK2*. Chaque immersion dans le jeu est prévue pour durer 10 minutes.

La sensibilité au mal des transports est mesurée avant la navigation *via* le MSSQ (composantes A et B), et la sévérité de la cybercinétose est évaluée *via* le SSQ après la navigation dans chaque condition de visualisation. Une cotation verbale des malaises est réalisée toutes les 2 minutes (de 1 : pas de symptôme à :4 nausée modérée). Onze participants ont dû abandonner avant la fin de l'expérience dans la condition visiocasque : un avant 4 minutes, 5 sur l'intervalle 4 à 6 minutes, puis 5 autres sur l'intervalle 6 à 8 minutes. Il n'y a pas eu d'abandon dans la condition écran.

Un effet significatif de la condition de visualisation et du temps a été rapporté au niveau de la cotation verbale des malaises : plus élevée dans la condition visiocasque que dans la condition écran, augmentant sévèrement avec le temps d'exposition dans la condition visiocasque, puis baissant pendant la période de repos. Par ailleurs, l'évaluation du SSQ post exposition était supérieure dans la condition visiocasque (moyenne : 71,81) comparée à la condition écran (moyenne : 8).

De plus, les mesures physiologiques diffèrent significativement entre les deux conditions (écran vs visiocasque) et peuvent être utilisées pour estimer la sévérité de la cybercinétose (voir partie mesures physiologiques). L'effet du visiocasque est donc avéré dans cette étude. Cependant, il reste que la condition visiocasque est systématiquement passée après la condition écran, donc après déjà 10 minutes d'utilisation du jeu.

Une étude comparant mode de contrôle et mode de visualisation dans une tâche de navigation sur un vélo ((Mittelstaedt *et al.*, 2018) (voir section 5.3.1.1)) conclue également que la visualisation sur grand écran (écran de 140 cm de diagonale à 1 mètre du participant) s'avère moins provocatrice de cybercinétose que sur visiocasque (*Oculus 1*). Dans les différentes conditions étudiées, les mouvements de la tête sont systématiquement capturés. Les deux conditions de visualisation sont équilibrées afin de pouvoir être comparées : poids équivalent rajouté sur la tête pour la visualisation sur grand écran, limitation du champ visuel à l'identique dans les deux conditions d'équipement visuel. Les 60 sujets (40 femmes, âge moyen 25,6

ans) sont répartis en 3 groupes selon la condition : vélo et visiocasque, vélo et écran, *gamepad* et visiocasque. Il y a donc plus de participants qui sont exposés au visiocasque qu'au grand écran. Les scores au SSQ (total et par facteur) dans les conditions avec visiocasque sont cependant significativement plus élevés que dans la condition grand écran, pour les scores obtenus pendant l'immersion uniquement (cf. Figure 40).

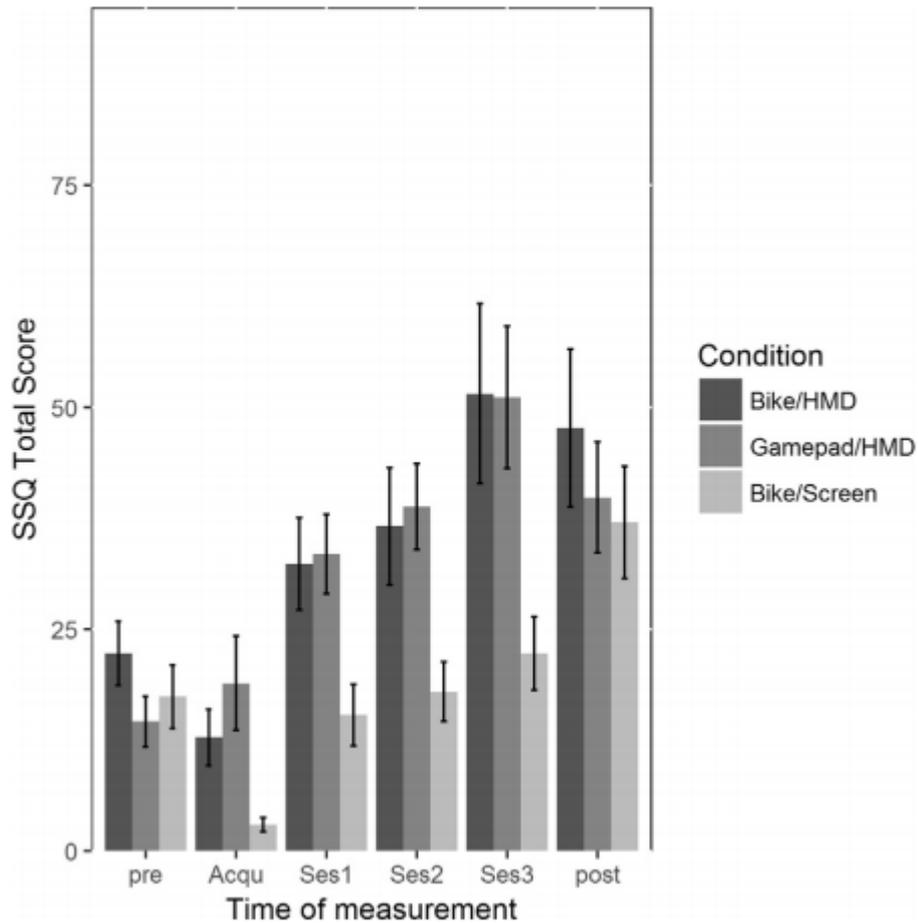
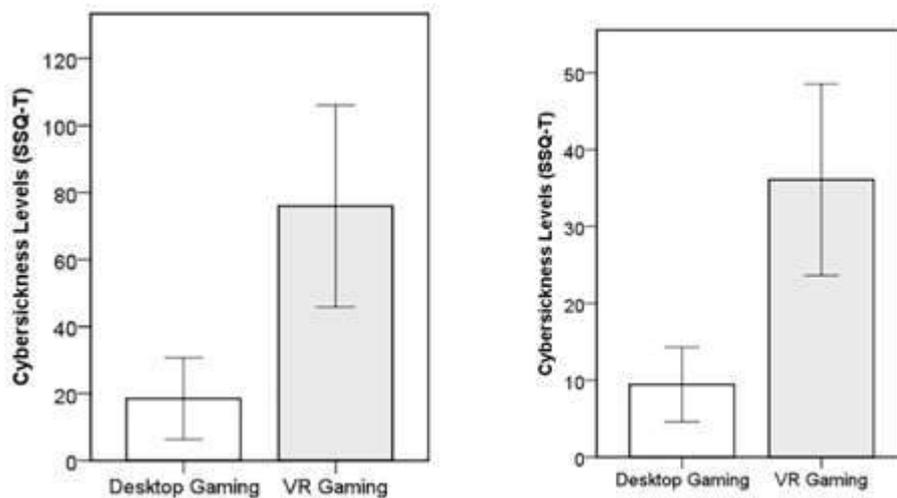


Figure 39 : Score SSQ total selon les différentes sessions de test pour les 3 modes de navigation testés.



**Figure 40 : Scores au SSQ (total) dans les deux conditions de visualisation de l'expérience.**

*Jeux de course à gauche (16 participants pour la condition écran en blanc et 16 participants pour la condition visiocasque en gris) et jeu de tir à droite (40 participants dans chaque condition) (Yildirim, 2019). Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance à 95 %.*

Une tentative d'explication de l'effet visiocasque est proposée par les auteurs : les participants à la condition grand écran portent un masque limitant leur champ de vision à l'identique de celui du visiocasque. Malgré tout, la tête des participants n'est pas fixe et ils peuvent ainsi percevoir visuellement le monde physique réel en tournant la tête. Cette possibilité pourrait réduire les effets adverses de la réalité virtuelle, par le fait de fournir un paysage visuel stable et indépendant, tout comme le fait une grille superposée sur un monde virtuel. Cette hypothèse est néanmoins contradictoire avec les résultats décrits plus haut dans le cadre de la visualisation de vidéo (Keshavarz *et al.*, 2011). Enfin, l'absence de 3D dans la condition grand écran par rapport à la condition visiocasque n'est pas discutée par les auteurs, et pourrait être un facteur contributif à la différence de cybercinétose entre les deux conditions.

À travers deux expériences, l'étude de Yildirim (Yildirim, 2019) a proposé et testé un modèle dans lequel l'effet d'un jeu sur le plaisir de jouer est modulé par le niveau de cybercinétose ressenti pendant le jeu.

La première expérience a utilisé un jeu de course, tandis que la seconde a mobilisé un jeu de tir à la première personne. Dans la première expérience, 32 participants (16 femmes, moyenne d'âge de 22,2 ans) sont répartis au hasard en deux groupes, avec 16 participants dans chaque groupe. Ils jouent à un jeu de simulation de course à la première personne (*Assetto Corsa*) soit sur un écran de bureau de 24 pouces, soit sur un visiocasque (*Oculus Rift commercial version*) et fournissent des évaluations de la gravité des symptômes de la cybercinétose (SSQ) et du plaisir de jouer qu'ils ont éprouvé pendant le jeu (*Game Enjoyment Scale*). Dans la seconde expérience, 40 participants (19 femmes, âge moyen de 20 ans) jouent à « *War Robots: The Skirmish VR* » pendant 6 minutes sur un écran de bureau et pendant 6 minutes sur un visiocasque dans un ordre inversé et fournissent des évaluations de la gravité des symptômes de la cybercinétose et du plaisir de jouer dans chacune des conditions. Sur écran, l'interaction se fait par un *Xbox controller* (manette de jeu) tandis que sur visiocasque elle se fait avec le *VR controller* natif du visiocasque *Oculus Rift*.

Il n'est pas précisé si le visiocasque est utilisé avec une visualisation 3D. Cependant, il n'y a bien sûr pas de mise à jour en fonction des mouvements de la tête sur écran de bureau et l'interaction se limite donc, dans cette condition, à celle fournie par la manette de contrôle du jeu. Le facteur mouvement de la tête n'est ainsi pas pris en compte dans l'effet du visiocasque,

ni celui de la taille du champ visuel. Par ailleurs, les scores du SSQ sont plus élevés dans la première expérience, qui se fait avec un jeu de course automobile. Le contenu du jeu est par conséquent impliqué dans l'étendue des scores observés. Aucun abandon n'est rapporté dans les deux expériences. Malgré tout, cette étude contribue aux résultats suggérant un effet négatif du visiocasque sur la cybercinétose.

Les résultats des deux expériences montrent que l'augmentation des niveaux de cybercinétose avec une visualisation sur visiocasque entraîne une diminution du plaisir de jouer. Cependant, à niveau équivalent de cybercinétose, les jeux sur visiocasque s'avèrent plus agréables.

Une étude (Shafer *et al.*, 2019) a comparé spécifiquement l'utilisation de deux visiocasques de niveaux technologiques différents : *oculus DK2* et *oculus CV1* (meilleure résolution, meilleur taux de rafraîchissement et *tracking* de la tête), sans noter de différence entre les visiocasques sur la cybercinétose (160 sujets, moyenne d'âge de 20,5 ans, 82 dans le groupe DK2, 74 sujets dans le groupe CV1 ; participants jouant à des jeux vidéo commerciaux pendant 20 minutes, mesure de la présence et du SSQ). Les scores rapportés sont bas quel que soit le groupe. Il est cependant à noter que les scores ne sont pas calculés correctement puisque chaque item est coté de 0 à 3 et additionné de sorte que la valeur maximale de l'échelle est ici de 48. Les scores rapportés au SSQ ne sont ainsi pas comparables à ceux de la littérature. Le nombre d'abandon par type de casque utilisé n'est pas rapporté.

En conclusion, malgré la variété des paramètres impliqués dans les études, 5 études sur 6 contribuent à suggérer un effet aggravant de la visualisation *via* visiocasque sur la cybercinétose. D'autres facteurs technologiques devraient être manipulés afin de comprendre la raison pour laquelle la visualisation *via* visiocasque pourrait générer plus de cybercinétose, comme la latence en cas de couplage avec les mouvements actifs de la tête.

Certains facteurs ne reposent pas spécifiquement sur l'implication d'un visiocasque et peuvent être étudiés sans impliquer le rôle potentiel du visiocasque. Parmi ceux-ci, on trouve le réalisme de la scène visuelle, l'angle visuel (dont le rôle n'est pas avéré spécifiquement dans le cadre de la réalité virtuelle), le type d'interaction, la visualisation en 3D.

### Effet de la stéréoscopie visuelle

Le groupe de travail a recensé 3 publications s'intéressant spécifiquement aux liens entre la 3D visuelle en réalité virtuelle et la cybercinétose. L'une d'entre elle se concentre sur une population de seniors, contrairement à la plupart des études. Chacune de ces publications mettent en jeu des situations spécifiques avec des caractéristiques technologiques différentes (visiocasque, écran, type d'environnement, interaction), et deux d'entre elles concluent sur l'existence d'une interaction entre 3D visuelle et cybercinétose, à chaque fois dans le cas particulier de la stéréoscopie visuelle active. D'autres études se concentrent sur les liens entre cinétose et troubles visuels dans le cadre de la visualisation passive de vidéos 3D et ne rentrent pas dans l'objet de ce rapport (voir par exemple Yang *et al.*, 2012; Read & Bohr, 2014).

Une étude (Ling *et al.*, 2012) se penche sur l'effet de la stéréoscopie visuelle sur la présence, l'anxiété et la cybercinétose dans un monde virtuel de prise de parole en public. Dans cette étude, 88 participants (dont 35 femmes, âge moyen  $28,0 \pm 6,3$  ans, étendue 18-70 ans) ont été immergés *via* un visiocasque *eMagin Z800* dans une situation de prise de parole en public à deux reprises : une fois avec et une fois sans rendu stéréoscopique. L'environnement est interactif et mis à jour en fonction des mouvements de la tête, alors que le déplacement est contrôlé *via* un clavier. La cybercinétose est mesurée par le SSQ à 4 reprises : avant l'exposition, après l'exposition à un environnement neutre visualisé en 2D (durée 7 minutes),

après l'exposition à un environnement dans un contexte de prise de parole visualisé en 3D (5 minutes), et après l'exposition à un environnement dans un contexte de prise de parole visualisé en 2D (5 minutes). L'ordre de visualisation en 2D et 3D pour le contexte de prise de parole est pseudo-randomisé pour être équilibré dans la population totale.

Les analyses sont faites sur la différence entre le SSQ avant exposition et après chaque condition de visualisation. Cependant, les scores ne sont pas donnés, et on ne comprend pas comment sont calculées ces différences, ni quel est l'objectif du score après exposition dans l'environnement neutre. Malgré ces limites méthodologiques, aucun abandon n'a eu lieu et les scores ne varient que très peu (condition 2D  $-0,57 \pm 17,95$ , condition 3D  $2,4 \pm 13,04$ , pour rappel, le score total au SSQ peut varier entre 0 et 235). Ainsi, aucun effet significatif de la stéréoscopie visuelle n'est rapporté dans ce contexte de visualisation par un visiocasque, dans lequel l'interaction n'est pas très importante et l'environnement ne contient que peu d'indices de profondeur.

Deux autres publications amènent des conclusions opposées. La première (Keshavarz & Hecht, 2012a) présente deux expériences menées pour analyser les effets de la stéréoscopie visuelle, du son et du réalisme (vidéo vs simulation) sur la cybercinétose et sur les sentiments d'immersion et de vection qui y sont associés. Dans le cadre de la première expérience rapportée, 79 participants ont regardé soit un clip vidéo de 15 minutes pris au cours d'un véritable tour de montagnes russes, soit une simulation graphique précise du même tour. De plus, la moitié des participants ont regardé le film en 2D, et l'autre moitié en 3D. Ainsi, 4 groupes de participants étaient formés (vidéo 2D N = 20, 15 femmes, âge moyen 22,4 ans ; vidéo 3D, 19 participants, 15 femmes, âge moyen 25,8 ans ; simulation 2D 19 participants, 14 femmes, âge moyen 25,6 ans ; simulation 3D 19 participants, 14 femmes, âge moyen 24 ans). Le temps d'exposition était de 14,6 minutes (10 tours de 1 minute et 25 secondes). Les stimuli sont visualisés sur un écran de projection de 300 x 196 cm, offrant un champ de vision de 60° (horizontal) et 43° (vertical), avec ou sans stéréoscopie visuelle, alors que la tête du participant est fixée sur un repose menton.

La cybercinétose a été mesurée à l'aide du questionnaire sur le mal des transports en simulateur (SSQ) et de l'échelle rapide de mal des transports (FMS). Le SSQ a été passé 3 fois : avant l'exposition, juste après, et 5 heures après l'exposition. La FMS a été passée chaque minute pendant l'exposition et chaque heure pendant 5 heures après l'exposition.

Dans cette expérience, 5 participants ont dû interrompre leur participation à cause de la cybercinétose. Les résultats ont montré une interaction significative entre la variable 3D visuelle et la variable réalisme (film ou images de synthèse), indiquant des scores de cybercinétose plus élevés pour la vidéo de montagnes russes présentée en 3D, alors que les 3 autres présentations ont provoqué moins de cybercinétose et ne différaient pas entre elles. Ni le réalisme ni la stéréo visuelle n'ont un effet principal sur la cybercinétose.

Dans la deuxième expérience, 69 participants ont été exposés à une vidéo capturée pendant une randonnée à vélo de 15 minutes, et divisés en 4 groupes selon le mode de visionnement et la présence de son (son et 3D N=19, 9 femmes, âge moyen 22,1 ans; pas de son et 3D, 18 participants, 10 femmes, âge moyen 22,8 ans; son et 2D 16 participants, 7 femmes, âge moyen 23,2 ans; pas de son et 2D 16 participants, 8 femmes, âge moyen 23 ans). Le son est diffusé en stéréo par deux haut-parleurs situés de part et d'autre de l'écran, et correspond à l'enregistrement sonore fait pendant la prise de vue de la randonnée à vélo. Les mesures étaient les mêmes que dans la première expérience, à l'exception des mesures post-exposition qui n'étaient plus faites. À nouveau, 5 participants arrêtent avant la fin de l'expérience (2 dans le groupe 3D sans son, un dans le groupe 2D avec son, deux dans le groupe 2D sans son).

Les résultats ont montré un effet significatif de la stéréoscopie visuelle : la cybercinétose était plus sévère pour la présentation 3D. Le son n'a pas eu d'effet significatif. Dans l'ensemble, la vision stéréoscopique a joué un rôle crucial dans la cybercinétose dans les deux expériences. Dans la première expérience, il est à noter que l'échantillonnage de la vidéo est plus élevé que celui de la simulation réaliste. De plus, le *jitter* est plus important dans la vidéo. Cependant, l'absence d'effet principal ne permet pas d'impliquer ces facteurs. Cette expérience repose sur une situation de visualisation passive, et implique une forte sensation devection. Les résultats ne sont donc pas directement généralisables à toute situation de réalité virtuelle, mais permettent néanmoins de suggérer que la stéréoscopie visuelle peut amplifier la cybercinétose lors de visualisation de vidéo 3D.

Une dernière étude (Liu & Uang, 2016) a été menée afin d'étudier la relation entre vieillissement, stéréoscopie visuelle et cybercinétose, dans une tâche d'achats dans un supermarché virtuel. L'expérience a porté sur les associations entre la présence, la cybercinétose et la performance dans un magasin virtuel 3D avec des affichages auto-stéréoscopique (écran 46 pouces), stéréoscopique (écran 46 pouces et lunettes actives) ou monoculaire (écran 42 pouces), des indices de perception de la profondeur élevés ou faibles, auprès d'un échantillon de personnes âgées. Une population de 60 participants, âge moyen de 65,3 ans, a été distribuée en 6 groupes, selon le niveau d'indices de profondeur (élevé ou faible) et le type d'interface visuelle (autostéréoscopique, stéréoscopique et monoculaire), pour réaliser une tâche d'exploration d'un magasin virtuel afin de trouver une liste de 8 objets.

La cybercinétose est estimée avec le questionnaire SSQ avant l'exposition, afin de contrôler l'état du participant et de l'exclure si le niveau est déjà supérieur à 7,5. Après une phase d'entraînement, le participant a 5 minutes pour trouver la liste d'objets. L'interaction avec l'environnement se fait par la souris et le clavier. La présence est mesurée à l'aide du questionnaire de présence de Witmer et Singer (1998).

Aucun abandon n'est rapporté. Les résultats montrent que le magasin virtuel visualisé avec un affichage auto-stéréoscopique avec des indices de perception de profondeur de haute qualité donne des résultats optimum concernant la présence, la performance et le confort. Cependant, si les indices de perception de la profondeur sont faibles, les affichages 3D, et particulièrement l'affichage stéréoscopique, ne sont pas recommandés : la cybercinétose est plus importante. La stéréoscopie visuelle est le dispositif avec lequel on retrouve le plus de cybercinétose. Ces résultats, bien qu'obtenus auprès d'un petit nombre de participants et d'un âge moyen bien plus élevé que celui de la plupart des études (sans inclusion d'un groupe contrôle pour comprendre le rôle éventuel de l'âge), soulignent le rôle du type de dispositif utilisé pour l'affichage en 3D sur la cybercinétose.

#### Effet d'autres aspects du contenu visuel

Outre l'étude précédemment rapportée (Keshavarz & Hecht, 2012a), indiquant que le réalisme pourrait avoir un rôle sur la cybercinétose quand l'environnement est présenté en 3D, plusieurs publications abordent les différents facteurs technologiques relatifs au contenu visuel de l'environnement.

L'effet du champ visuel a été suggéré par deux études au moins. L'une d'elle (Keshavarz *et al.*, 2011) a été citée plus haut et suggère que la taille du champ de vue est corrélée avec la cybercinétose. Allant dans le même sens, une étude comparant 3 tailles de stimulation de champs de vue (45, 90 et 180°) dans un CAVE (Menshikova *et al.*, 2017) suggère que la cybercinétose telle que mesurée par le SSQ est associée à la stimulation d'un champ visuel plus large (étude sur 90 participants sportifs de haut niveau entre 15 et 24 ans).

L'effet de la complexité de la scène visuelle a été peu étudié, mais une expérience (Kelaiah *et al.*, 2014) a suggéré que ce paramètre, estimé en mesurant la taille des fichiers *gif* compressés de toutes les images de l'environnement, n'est pas corrélé avec la cybercinétose lors d'une visualisation non stéréoscopique et passive (sans interaction). Dans cette étude impliquant 88 participants (45 femmes, âge médian 22 ans) divisés en 4 groupes selon la complexité visuelle de l'environnement virtuel et des humanoïdes, les scores au SSQ sont restés faibles quelle que soit la condition.

À l'opposé de ces résultats, l'étude (Nalivaiko *et al.*, 2015) chez 26 jeunes volontaires (8 femmes, âge moyen de 22,5 ans) portant un visiocasque (*Oculus Rift DK1*) a comparé deux environnements ayant des niveaux de réalismes différents et a observé que les simulations provoquent systématiquement des vections et des nausées, avec une différence significative entre deux versions du logiciel de simulation (voir aussi partie 5.3. 4. Les participants sont répartis aléatoirement dans une des deux conditions (*Parrot Coaster* ou *Helix*), lors de laquelle ils visualisent passivement, pendant 14 minutes, une simulation de tour de montagnes russes. *Helix* est considéré comme étant plus riche visuellement que *Parrot Coaster* (plus de détails et plus grand réalisme), sans donner de mesures technologiques associées à ces estimations. *Helix* est un environnement simulant une scène en extérieur, contenant plus de textures. Les participants visualisant l'environnement le plus réaliste (*Helix*) ont des scores plus élevés de cybercinétose, tels que mesurés par une cotation verbale des malaises réalisée toutes les 2 minutes (de 1 pas de symptôme à 10 proche de l'émésis). Huit participants du groupe *Helix* et 2 du groupe *Parrot* ont dû s'arrêter avant la fin de l'exposition.

Cependant, afin d'incriminer le réalisme dans les résultats sur la cybercinétose, il faudrait pouvoir comparer si les deux simulations proposent le même type de rotations, sur le même nombre d'axes, et avoir plus d'informations sur les caractéristiques du rendu visuel (par exemple niveau de détail, la luminosité...).

La direction du flux visuel a quant à elle été suggérée comme contributive à la cinétose, dans une étude mesurant celle-ci par questionnaires et avec des indices physiologiques (Mazloumi *et al.*, 2017). Dans une expérience auprès de 12 participants (6 femmes, âge moyen 27 ans), un trajet virtuel de 15 minutes sur des montagnes russes a été visualisé *via* un visiocasque *Oculus Rift DK1*, un jour avec un flux visuel vers l'avant et l'autre jour avec un flux visuel vers l'arrière. Les 12 participants ont dû arrêter la visualisation avant la fin du film à cause des nausées, mais sans différence de fréquence entre les déplacements vers l'avant et vers l'arrière. Cependant, le temps moyen de tolérance, tel que mesuré par le *Level on Motion sickness* (LMS) chaque minute de 0 à 10, était significativement plus long pendant le déplacement vers l'arrière que pendant le déplacement vers l'avant, tout comme le score après visualisation au *Motion Sickness Assessment Questionnaire* (MSAQ).

Une étude (Keshavarz & Hecht, 2011a) a porté sur le rôle du nombre d'axes de rotation simulés lors de la sensation de mouvement propre dans la cybercinétose. Dans la même mouvance que leurs travaux déjà rapportés ici, les auteurs proposent à des participants de visualiser des vidéos de 15 minutes de simulation de tours de montagnes russes comprenant un mouvement de translation selon l'axe avant-arrière et un mouvement de rotation supplémentaire soit en tangage seulement, soit le long des axes de tangage et de roulis, soit en tangage, en roulis et en lacet. Ces vidéos sont présentées sur un grand écran, et 61 participants (47 femmes, âge moyen entre 23 et 30 ans selon le groupe) sont assignés à l'un des trois groupes de type de rotation. La cybercinétose est mesurée à l'aide de l'échelle du mal des transports rapide (FMS) à chaque minute pendant l'exposition et du SSQ jusqu'à 5 heures après l'exposition. Les plus faibles scores de cybercinétose sont retrouvés dans la condition de tangage seulement. Les combinaisons de rotations autour de deux ou trois axes sont reliées à des scores plus élevés de cybercinétose mais ne diffèrent pas entre eux. La

cybercinétose s'atténue rapidement après environ une heure de présentation du stimulus, sans différence significative entre les groupes. Ces résultats sont compatibles avec ceux déjà proposés en 2009 (Bonato *et al.*, 2009) avec un autre type de stimulus (le participant est immergé à l'intérieur d'un cube virtuel dont la rotation est le long d'un ou deux axes). Ils proposent que la cybercinétose atteint un plateau avec des simulations sur deux axes de rotation : l'ajout d'un troisième axe ne provoque pas un effet linéaire sur celle-ci.

Une étude (Norman, 2018) s'est penchée spécifiquement sur le contenu des jeux disponibles pour le système de RV de la console de jeu *PlayStation 4*. Un total de 85 participants (36 femmes, âgés de 18 à 45 ans, âge moyen 20 ans) ont été invités à répondre à une enquête sur l'utilisation des jeux vidéo, puis à choisir un jeu parmi une liste de dix jeux différents. Chaque participant a joué au jeu pendant environ 30 minutes. Les participants ont rempli deux questionnaires à la fin de l'expérience : le SSQ et un questionnaire développé pour évaluer un certain nombre de caractéristiques de l'environnement de réalité virtuelle (inconfort du visiocasque, calibration du système, latence visuelle, flou de l'image, qualité de l'audio, contrôle des mouvements, facilité de pointer et de sélectionner, et conscience de l'emplacement du corps). La cybercinétose telle que mesurée par les scores au SSQ était faible pour 58 % des participants, légère pour 33 % et forte pour 9 %. Les scores ont varié selon les jeux. Les notes pour l'emplacement du son et la latence visuelle étaient bonnes, mais celles pour la calibration, le visiocasque, le flou des images étaient moins positives. Un total de 8 participants a dû arrêter de jouer à cause de nausées trop importantes.

Lorsque l'on regroupe les participants par jeu, on remarque que certains jeux entraînent des niveaux de cybercinétose plus élevés que d'autres. *Eve Valkyrie* a provoqué les plus hauts scores, probablement à cause de la désorientation de la rotation dans le vaisseau spatial. Cette étude est donc compatible avec les résultats précédents (Keshavarz & Hecht, 2011a) et suggère que le contenu du jeu a un rôle important dans la survenue de cybercinétose : les jeux proposant un flux visuel rapide et simulant des rotations sur plusieurs axes sont les plus susceptibles de générer des symptômes de cybercinétose.

Une autre étude fournit des observations quant à l'influence du contenu du jeu joué sur la cybercinétose (Shafer *et al.*, 2019). Dans cette étude comparant l'utilisation de deux visiocasques et de 3 jeux (160 sujets au total de 20,5 ans, 51 jouant à *Minecraft*, 58 jouant à *Elite*, 51 jouant à *Lucky*), les participants jouent à un des jeux vidéo commerciaux pendant 20 minutes, à l'issue de quoi sont mesurés la présence et la cybercinétose avec le SSQ. Les trois jeux ont été sélectionnés en fonction du niveau de conflit sensoriel qu'ils génèrent. *Minecraft* est joué avec un avatar et une vue à la première personne, sans fournir de cadre de référence stabilisant entre l'avatar et l'environnement, et est considéré comme générant le plus de conflits sensoriels. *Elite* est un jeu de simulation de conduite de vaisseau spatial et est également joué avec un avatar à la première personne, mais un cadre de référence fixe est fourni par le cockpit du vaisseau spatial. *Lucky's tale* est le jeu générant le moins de conflits : le jeu se joue à la troisième personne en vue allocentrique (personnage vu de haut) mais aucun cadre de référence fixe n'est fourni. Les scores au SSQ ne sont malheureusement pas calculés de façon standard (chaque item est coté de 0 à 3 et additionné de sorte que la valeur maximale de l'échelle est de 48) et ne sont ainsi pas comparables à ceux de la littérature. Des abandons après 20 minutes de jeu sont mentionnés pour 25 participants : 14 pour des problèmes techniques, 11 à cause de la cybercinétose -9 jouant à *Minecraft* et 2 à *Elite*. Les résultats au SSQ indiquent que les participants ayant joué à *Minecraft* indiquent des niveaux de cybercinétose bien plus élevés que ceux ayant joué à *Lucky* et *Elite*, soulignant que le contenu du jeu influence largement la survenue de la cybercinétose, et que la vue à la première personne, sans aucun cadre de référence fixe, est génératrice de cybercinétose. Ce type d'environnement combine en effet rotations sur plusieurs axes, flux visuel potentiellement

rapide, et changements brusques d'accélération, facteurs contribuant à la genèse de conflits sensoriels entre la position stable du joueur et son activité virtuelle.

Une autre étude fait varier la fréquence d'oscillation du mouvement linéaire afin d'en observer le lien avec la cinétose (Diels & Howarth, 2013) et suggère qu'il faut éviter les fréquences d'oscillation avant/arrière entre 0,2 et 0,4 Hz. Des participants ont été exposés passivement, alors qu'ils étaient assis et la tête sur un repose menton, à des flux optiques de points simulant un mouvement oscillant d'avant en arrière dans la gamme de fréquences de 0,025 à 1,6 Hz lors de deux expériences (12 participants, 7 femmes, âge moyen 29,8 ans ; 12 participants, 5 femmes, âge moyen 24,6 ans). Avant et après chaque exposition de 20 minutes, la cinétose était évaluée avec le SSQ. De plus, une échelle standard de mal des transports était utilisée pour évaluer les symptômes chaque minute au cours de chaque essai. Les auteurs concluent que dans des conditions où des observateurs immobiles sont exposés à un flux optique qui simule un mouvement oscillant d'avant en arrière, les fréquences autour de 0,2 à 0,4 Hz devraient être évitées.

Lorsque l'on se déplace dans un environnement virtuel immersif avec *tracking*, il est parfois utile de s'écarter de la congruence naturelle entre les informations sensorielles, en appliquant une transformation entre le mouvement dans l'environnement réel et le mouvement résultant dans l'environnement virtuel. Une option est l'application d'un gain de rotation, où la rotation virtuelle d'un utilisateur autour de l'axe vertical est amplifiée ou réduite par un facteur constant. Cette possibilité est exploitée dans les techniques de marche redirigée ou pour augmenter le champ de vision effectif dans les systèmes de projection.

L'effet d'un gain en rotation a été observé dans un CAVE auprès de 87 participants (17 femmes, âge moyen 25,7 ans) (Freitag *et al.*, 2016). Les résultats ne montrent aucun effet significatif du gain de rotation sur la cybercinétose mesurée par le SSQ, la présence ou la performance de l'utilisateur du simulateur dans une tâche cognitive, mais indiquent qu'il y a une influence négative sur la connaissance spatiale, surtout pour les utilisateurs inexpérimentés.

Une étude récente investiguant l'efficacité perceptive des techniques de compression a fait varier les gains de rotation lors de l'immersion dans un espace virtuel *via* visiocasque *Samsung GearVR* (Schmitz *et al.*, 2018). Les participants étaient dans un espace de *tracking* de 3 m x 4 m dans lequel ils se déplaçaient activement. Cette étude indique, à l'opposé de la précédente, que l'utilisation d'un gain de rotation accroît la cybercinétose.

Une récente méta-analyse portant sur 55 études réalisées dans des conditions de visualisation par visiocasque (Saredakis *et al.*, 2020) conclut que la cybercinétose est influencée entre autre par le contenu de l'exposition, les jeux générant de plus hauts scores au SSQ et un plus haut taux d'abandon, suivi des contenus utilisant des vidéos à 360° puis des contenus minimalistes et scéniques. Cependant, les scores au SSQ ne correspondent pas toujours aux taux d'abandon (par exemple, des taux d'abandon plus élevés ont été trouvés dans le contenu scénique que dans les vidéos 360).

En conclusion de cette section : beaucoup d'études consacrées à la cybercinétose ne correspondent pas aux conditions de la réalité virtuelle (e.g. visualisation de vidéos) et n'incluent que des stimulations passives, faisant varier certaines caractéristiques du mouvement visuel. Ces études suggèrent le rôle de plusieurs facteurs mais dans des conditions parfois tellement éloignées de la réalité virtuelle qu'on pourrait avoir tendance à les considérer comme anecdotiques. Cependant, on retiendra que plusieurs facteurs technologiques ont été étudiés pour leur potentielle contribution à la cybercinétose. Les études des effets du dispositif visuel suggèrent que l'utilisation du visiocasque est liée à une présence plus importante de symptômes de cybercinétose (5 études sur 6). Le rendu visuel en stéréoscopie pourrait également contribuer à la cybercinétose (2 études sur 3 au moins quand l'utilisation de la stéréoscopie est précisée). Concernant la contribution du contenu de la scène visuelle, sa complexité en matière de richesse a été suggérée (1 étude critiquable par rapport aux paramètres impliqués pour déterminer la complexité et à la méthodologie). La contribution du nombre d'axes de rotation et de la vitesse du flux visuel semble plus évidente et unanime. L'utilisation de techniques dites de redirection, dans lesquelles le rapport naturel entre les rotations de la tête et les rotations visuelles sont manipulées, de sorte à permettre des déplacements virtuels plus importants, n'est pas étudiée dans le but de conclure sur leur effet. Les études donnent des résultats opposés quant à leur lien avec la cybercinétose, lorsque cette technique est utilisée avec un visiocasque (plus de cybercinétose, 1 étude) ou un CAVE (pas de différence, 1 étude).

#### 5.3.3.1.1 Rôle du rendu auditif

Les aspects technologiques étudiés pour leur contribution à la cybercinétose relèvent majoritairement des aspects liés au rendu de la modalité visuelle. De rares études s'intéressent également au rôle du rendu auditif, et suggèrent que celui-ci peut contribuer à la survenue de symptômes relevant de la cybercinétose. Le nombre de ces études augmente depuis ces deux dernières années, à la faveur de la généralisation de l'utilisation de stimulations auditives 3D.

Il a été décrit depuis longtemps que des stimuli auditifs peuvent induire un sentiment devection (Dodge, 1923), mais c'est plus récemment que l'on a commencé à s'intéresser aux liens entre la cinétose et le rendu auditif d'un mouvement. Une première étude (Dicke *et al.*, 2009) s'est penchée sur le lien entre la cybercinétose et le sentiment devection induit par des stimuli auditifs rendus en binaural sur casque auprès de 82 participants (33 femmes, âge moyen de 33 ans et variant entre 15 et 54 ans). Les participants étaient assignés à l'une des trois conditions : mouvements prédictibles de la gauche vers la droite, mouvements aléatoires et imprédictibles, pas de mouvement. Les stimuli pouvaient contenir de la musique, de la parole, ou du bruit environnant. Les participants remplissaient le SSQ avant et après l'écoute des stimuli. Les scores sont restés très bas pendant les écoutes, et les variations étaient moindres. La comparaison des scores a indiqué une augmentation dans la condition de mouvements prédictibles, sans pour autant atteindre la significativité.

Afin de savoir si le son accompagnant un jeu vidéo a une influence sur la cybercinétose, une étude a utilisé le jeu « *Mirror Edge* » (console de jeu PS3) avec et sans son (Keshavarz & Hecht, 2012b). Il a été proposé à 32 participants (dont 20 femmes, âge moyen 23 ans), de visualiser passivement pendant 15 minutes une séquence pré-enregistrée, réalisée par un joueur expérimenté, avant de jouer activement pendant 15 minutes.

Le jeu était projeté sur un écran de 218 cm x 123 cm, alors que les sujets étaient assis, équipés d'un casque audio, leur tête stabilisée sur un repose menton. La moitié des participants seulement pouvait entendre l'environnement sonore du jeu. La cybercinétose était mesurée

avec le SSQ et la FMS, chaque minute pendant la séquence vidéo et la séquence de jeu actif. Neuf des participants ont dû arrêter l'expérience à cause de la sévérité de la cybercinétose. Les scores de cybercinétose dans le groupe avec son sont en moyenne légèrement au-dessus de ceux du groupe sans son, mais là encore, la différence n'est pas significative, que ce soit dans la condition active ou passive. Dans une autre étude (voir section 5.3.2.1.1), le même groupe (Keshavarz & Hecht, 2012a) avait déjà conclu à l'absence d'effet du son sur la cybercinétose lors de la visualisation d'une vidéo de 15 minutes prise au cours d'un trajet à vélo. Si les différentes études du groupe vont toutes dans le sens d'un rôle neutre du son sur la cybercinétose, voire d'une contre-mesure (Keshavarz & Hecht, 2014), le son utilisé dans ces études n'est pas spatialisé et ne peut donc qu'éventuellement contribuer au réalisme ou à la distraction.

Dans une autre publication (Keshavarz *et al.*, 2014), le même groupe a utilisé un système de rendu sonore permettant la restitution en 3D. L'étude s'est intéressée à la façon dont les indices auditifs contribuent au mal des transports lorsqu'ils sont ajoutés à des stimuli visuels en mouvement. Vingt participants (13 femmes, âge moyen 24 ans) étaient assis devant un écran de projection courbé et étaient exposés à une scène virtuelle qui tournait constamment autour de l'axe vertical du participant. La scène virtuelle contenait soit des signaux visuels uniquement, soit des signaux auditifs uniquement, soit une combinaison de signaux visuels et auditifs correspondants (3 stimuli : cloche d'église, moteur de voiture immobile, sonnette d'un tram immobile). Les stimuli auditifs étaient rendus sur un dispositif de 7 haut-parleurs (7.1) situés derrière l'écran. Tous les participants ont rempli les trois conditions dans un ordre contrebalancé. Les participants inclinaient leur tête alternativement vers l'épaule droite ou gauche dans toutes les conditions pendant l'exposition aux stimuli afin de créer des effets de pseudo-Coriolis et de maximiser la probabilité du mal des transports. Les mesures du mal des transports (FMS toutes les 30 secondes, SSQ passé avant l'expérience et après chaque condition), de la vection (latence, force, durée) et de la stabilité posturale (centre de pression) ont été enregistrées. Les résultats ont montré que l'ajout d'indices auditifs aux stimuli visuels n'affectait pas, en moyenne, le mal des transports et la stabilité posturale, mais qu'il réduisait le temps d'apparition de la vection et augmentait l'intensité de la vection par rapport à une stimulation visuelle ou auditive pure. Dix-huit des 20 participants ont déclaré avoir au moins un léger mal des transports dans les deux conditions incluant les stimuli visuels. Six participants ont également signalé un mal des transports pendant la stimulation auditive pure et deux des six participants ont interrompu la condition auditive pure en raison du mal des transports.

Dans le même sens, une étude très récente indique que le sentiment de vection induit par des stimuli auditifs reposant sur une illusion acoustique (glissando de Shepard-Risset) peut induire des scores élevés au SSQ (Mursic & Palmisano, 2020).

Au niveau technologique, l'intégration du rendu auditif au rendu visuel de sorte à mettre à jour simultanément les environnements auditifs et visuels limitera les conflits sensoriels pouvant être générés par le décalage temporel entre les deux types de rendu, auxquels certaines populations sont sans doute plus sensibles que d'autres (Viaud-Delmon *et al.*, 2006).

Le rôle des stimulations auditives spatialisées sur la cybercinétose reste à investiguer. Les résultats décrits indiquent en effet que les stimulations auditives peuvent contribuer à la survenue de symptômes relevant de la cybercinétose, même si leur implication est bien moins évidente que celle des stimulations visuelles. De nombreux paramètres mériteraient d'être investigués, comme le rôle de la simulation d'un mouvement auditif, la cohérence entre le rendu visuel et le rendu auditif au niveau spatial mais également temporel, et le réalisme du rendu auditif.

### 5.3.3.2 Facteurs de risques individuels potentiellement en jeu dans la prévalence de la cybercinétose

#### 5.3.3.2.1 **Etudes de différentes caractéristiques individuelles**

Nous décrivons ici les données de la littérature permettant d'analyser la cybercinétose sur la base de ses liens avec différentes caractéristiques individuelles. La cinétose ayant une prévalence bien plus élevée chez les femmes que chez les hommes, il a souvent été estimé par défaut que cette prévalence devrait se retrouver dans la cybercinétose, ce qui n'est pas systématiquement le cas. Ceci souligne le rôle potentiel d'autres variations individuelles, comme le niveau d'anxiété, la présence dans l'environnement virtuel, l'âge et l'expérience de la personne qui utilise la réalité virtuelle.

Quelques études se sont penchées sur le rôle spécifique de l'appartenance ethnique dans la cybercinétose, sans obtenir de consensus. Les résultats récents de (Weech *et al.*, 2018) n'ont pas apporté la preuve que la cybercinétose diffère en fonction de l'appartenance ethnique, ce qui avait précédemment été suggéré concernant le mal des transports (Klosterhalfen *et al.*, 2005 ; Stern *et al.*, 1996).

Une étude (Rosa *et al.*, 2016) a tenté d'examiner les caractéristiques de l'utilisateur associées à une moindre cybercinétose en réalité virtuelle par une analyse des correspondances multiples combinée à la technique d'analyse de clusters. Soixante et onze étudiants de l'Université de Lisbonne ont participé à l'étude (dont 47 femmes, âge moyen de 24 ans). Les participants répondaient d'abord à un questionnaire sociodémographique, à des questions sur les pratiques de jeux vidéo et à un questionnaire de prédisposition à l'immersion. La tâche dans l'environnement virtuel était ensuite de trouver un chemin pour atteindre un aéroport, en utilisant les différents objets rencontrés. Les participants étaient immergés *via* un visiocasque (*eMagin Z800* avec système de suivi) et interagissaient avec une souris optique. Des sons étaient diffusés par des haut-parleurs de bureau devant le participant. Après la tâche, les participants remplissaient le SSQ. La durée de l'immersion n'est pas précisée mais la durée totale de l'expérience était de 40 minutes environ. Les résultats suggèrent qu'il existe trois profils distincts dans la population de l'étude (joueur sur console, joueur sur ordinateur et non joueur), et que le profil du joueur sur ordinateur est associé à une plus grande prédisposition à être immergé et à subir moins de symptômes de cybercinétose que les joueurs sur console et les non joueurs.

Trois études au moins se sont penchées sur les liens entre les compétences individuelles dans une modalité sensorielle donnée et la cybercinétose, en reprenant la théorie du conflit sensoriel pour expliquer la survenue de la cinétose. L'interprétation de cette théorie a conduit une de ces études (Allen *et al.*, 2016) à proposer l'hypothèse que les individus qui possèdent de meilleures capacités sensorielles seront plus enclins au mal des transports parce que leurs systèmes seront mieux à même de reconnaître les situations dans lesquelles les estimations sensorielles sont conflictuelles. Pour tester cette hypothèse, 73 participants (dont 45 femmes, âgés de 18 à 51 ans, moyenne 20,47 ans) ont d'abord passé une batterie de tests pour évaluer la sensibilité aux indices de profondeur visuelle ainsi qu'à un certain nombre d'autres fonctions visuelles de base. Ils ont ensuite visionné une série de films en 3D à l'aide d'un visiocasque *Oculus Rift 3D* pendant 20 minutes. Les participants ont regardé les vidéos dans le même ordre : (1) une vidéo de 4 minutes à la première personne d'une voiture circulant dans un trafic léger, (2) une vidéo de 3 minutes à la première personne générée par ordinateur d'un avion de chasse volant dans un canyon, (3) une vidéo de 5 minutes à la première personne d'un drone volant autour d'un pont, et (4) une vidéo de 6 minutes à la première personne d'un drone volant dans un parking.

Pendant et après la visualisation des vidéos, les participants ont répondu au questionnaire multidimensionnel MSAQ (Gianaros *et al.*, 2001) et aux 14 items sur les symptômes visuels et physiques tirés de l'étude de Yang *et al.*, 2012 (par exemple « Sensation de tiraillement dans les yeux », « Vision floue », « Douleur au dos/cou/épaule », etc.). Les participants remplissent

également un questionnaire sur leur sensibilité au mal des transports et sur leur expérience des environnements stéréoscopiques en réalité virtuelle. Globalement, 63 % des participants (75 % des femmes et 41,4 % des hommes) ont stoppé prématurément la session. L'âge ne diffère pas de façon significative entre ceux qui ont arrêté et ceux qui ont continué, mais les femmes sont plus susceptibles d'arrêter que les hommes.

Les différences individuelles, en particulier la sensibilité aux repères visuels dynamiques de profondeur, sont corrélées aux niveaux de cybercinétose rapportés. Conformément aux prédictions tirées de la théorie du conflit sensoriel, les participants qui ont montré des niveaux élevés de performance dans des tâches difficiles de mouvement en 3D sont moins susceptibles de tolérer 20 minutes d'expérience de vidéo stéréoscopique en 3D que les participants dont les performances sont médiocres. Ces résultats conduisent à un paradoxe : ceux qui ont une meilleure vision en 3D, et qui seraient donc en mesure de tirer le meilleur parti de la technologie 3D, sont également ceux qui sont le moins capables de la tolérer. Ces effets semblent être spécifiquement liés aux capacités stéréo-visuelles, car aucune différence significative entre les participants ayant arrêté et ceux ayant pu visualiser toutes les vidéos n'a été retrouvée dans les autres tâches visuelles (par exemple vision 3D statique, acuité visuelle ou vitesse de traitement visuel).

À l'opposé de cette interprétation de la théorie, une étude propose que les individus ayant une maîtrise importante du contrôle de leur système vestibulaire sont moins sensibles à la cybercinétose (Menshikova *et al.*, 2017). Le contrôle du système vestibulaire est ici apprécié par la maîtrise des mouvements oculaires, nécessaires à des degrés variables selon le sport pratiqué (allant du patinage artistique au football, dans l'étude). Cette étude, déjà analysée en section 5.3.3.1, compare 3 tailles de stimulation de champs de vue (45, 90 et 180°) dans un CAVE. La capacité à résister à la cybercinétose a été testée dans 3 groupes expérimentaux composés d'athlètes professionnels dans trois sports : le patinage artistique (18 femmes, et 12 hommes âgés de 15 à 24 ans) ; le *wushu* (arts martiaux chinois traditionnels) (11 femmes et 19 hommes, tranche d'âge 16-21 ans) et le football (30 hommes, âgés de 15 à 20 ans). Un groupe contrôle de 20 étudiants (11 femmes, tranche d'âge 18-24 ans) a participé également à l'étude. Des scènes virtuelles avec trois conditions de champ visuel leur étaient proposées : stimulations visuelles en champ visuel central uniquement (45°) ; en large champ visuel de 90° (tout l'écran frontal) ; couvrant le champ visuel (180°). À la fin de chaque présentation de 2 minutes (ordre aléatoire), le participant remplissait une version modifiée du questionnaire SSQ. Les mouvements oculaires générés par la visualisation des stimulations visuelles ont été enregistrés tout au long de l'expérience.

La capacité des patineurs à résister à la cybercinétose, telle que mesurée par le SSQ, est la plus développée. Les auteurs expliquent la capacité des patineurs par la compétence des patineurs à utiliser leur fonction vestibulaire, qui est considérée comme la qualité professionnelle la plus importante pour ce sport. Le nystagmus optocinétique est bien plus développé et actif chez les patineurs, et l'amplitude des saccades est plus faible. D'une façon générale, tous les athlètes testés démontrent une augmentation du clignement des yeux, de la fixation et du nombre de saccades par rapport aux participants qui ne pratiquent pas de sport professionnel.

Cette étude n'inclut cependant pas des groupes équilibrés en terme de sexe, et les scores étudiés du SSQ sont modifiés par rapport au questionnaire historique : les scores varient de 200 à 900, avec 200 représentant un score faible selon les auteurs.

Alors que des différences individuelles dans le fonctionnement vestibulaire ont été signalées comme étant associées à une sensibilité accrue à diverses cinétoses (mal des transports, mal de l'espace, par exemple Quarck *et al.*, 1998, Diamond et Markham 1991), la sensibilité vestibulaire, telle que mesurée auprès de 30 participants (19 femmes, âge moyen 23 ans) dans l'étude de Weech (Weech *et al.*, 2018) n'a pas joué de rôle dans la variabilité des scores

au SSQ après immersion, *via* un visiocasque *Oculus Rift CV1*, dans un environnement demandant l'exécution d'une tâche intense (durée 7 minutes) et après immersion dans un environnement demandant l'exécution d'une tâche confortable (durée 7 minutes). Cependant, la sensibilité vestibulaire n'est pas une mesure clairement définie et plusieurs types de mesures peuvent être utilisées pour la quantifier (seuil de perception à plusieurs types de mouvement, mesure du gain du reflexe vestibulo-oculaire...), invalidant la comparaison entre les différentes études et affaiblissant la possibilité d'un lien entre sensibilité vestibulaire et cybercinétose.

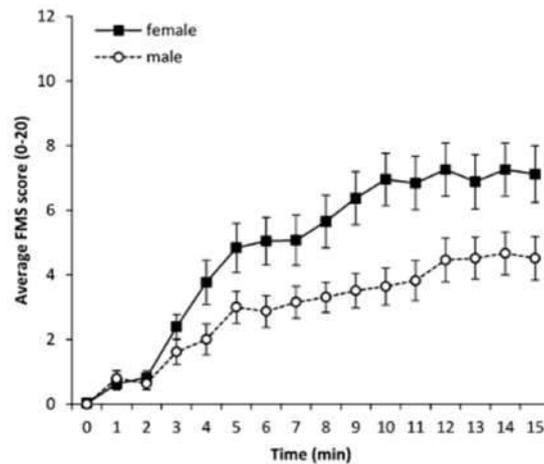
#### 5.3.3.2.2 Sexe

Plusieurs recherches indiquent que les femmes ont tendance à éprouver plus de mal des transports que les hommes (*e.g.* Flanagan *et al.*, 2005) et l'inclusion de la phase du cycle menstruel d'une participante dans un modèle de régression peut également ajouter une valeur prédictive (Golding *et al.*, 2005). Dans cette continuité, les études rapportant une prévalence de la cybercinétose chez les femmes ont été nombreuses avant 2010. Cependant, comme suggéré dans l'étude analysée plus haut (Allen *et al.*, 2016), certains facteurs sont probablement confondants. Cette précédente étude suggère ainsi que ce sont les différences individuelles dans la sensibilité aux repères visuels qui corrélerent avec la cybercinétose ; dans le cas de l'étude, les femmes sont plus sensibles car ce sont également celles qui démontrent la plus grande sensibilité visuelle.

Concernant l'implication des différences individuelles dans l'utilisation de la modalité visuelle, les études sur les liens entre le facteur de dépendance visuelle pour le maintien de la posture et le genre ne sont pas toutes convergentes. Par exemple, l'étude d'Alharbi (Alharbi *et al.*, 2017) se penchant sur les liens entre stabilité posturale, sensibilité aux indices visuels et mal des transports dans un dispositif de posturographie dynamique (*Bertec's Computerized Dynamic Posturography CDP/IVR*, système commercial pour la rééducation vestibulaire) dans lequel les informations visuelles sont soit couplées aux informations posturales et vestibulaires, soit conflictuelles, suggèrent que les adultes sensibles au mal des transports sont plus dépendants des informations visuelles pour maintenir la stabilité posturale, mais que la dépendance visuelle ne dépend pas du genre.

De même, une étude plus ancienne (Larson *et al.*, 1999) examinant les similitudes entre les performances avec un test de rotation mentale (mesure papier-crayon favorisant systématiquement les hommes) et un test de rotation spatiale en réalité virtuelle ne montrent aucune différence entre les sexes. Les femmes n'ont pas non plus développé plus d'effets de cybercinétose que les hommes (17 femmes, 13 hommes, âge moyen 28 ans, dispositif de retroprojection sur grand écran, stéréoscopique, mouvement de la tête traqué et interaction avec les objets à tourner par une sphère dans la main des participants).

Plus récemment, les études sont moins concluantes sur les liens entre sexe et cybercinétose, ou s'attachent à étudier les facteurs entrant en jeu dans ce possible lien. L'étude (D'Amour *et al.*, 2017) déjà rapportée en section 2.3.1.1, incluant 82 sujets (43 femmes) divisés en 4 groupes, testant chacun une condition d'équipement, utilisait l'échelle FMS pour mesurer l'incidence de la cybercinétose à chaque minute, ainsi que le SSQ en pré et post exposition. Les résultats suggéraient que l'ajout d'un flux d'air est un moyen efficace pour réduire la cybercinétose, mais concluaient également sur une différence marquée entre les hommes et les femmes au niveau de la cybercinétose (*cf.* Figure 41). Plus de femmes ont dû interrompre l'expérience (21 femmes, 7 hommes), et les symptômes rapportés étaient significativement plus intenses, mais uniquement sur les mesures de la FMS et non celles du SSQ. Ces résultats suggèrent que les femmes seraient particulièrement sensibles à la nausée puisque le SSQ regroupe plusieurs catégories de symptômes.



**Figure 41 : Scores FMS selon le sexe, toutes conditions confondues.**

Scores FMS selon le sexe, toutes conditions confondues (barres d'erreurs : SEM ; N hommes = 39, N femmes = 43) (D'Amour *et al.*, 2017).

L'étude de (Munafo *et al.*, 2017) dont les détails sont rapportés dans la section 5.3.5 sur les liens entre les mesures posturales et la cybercinétose (sévérité mesurée par le SSQ en pré et post, incidence mesurée par question binaire oui/non), inclue des groupes équilibrés d'hommes et de femmes, qui sont exposés *via* un visiocasque *Oculus Rift DK2* au jeu *Balancer Rift* (manipulation d'un plateau par l'intermédiaire des mouvements de la tête pour déplacer une bille dans un labyrinthe) pour l'expérience 1, et au jeu *Affected* (recherche d'un objectif en se déplaçant avec une manette dans un ensemble de couloirs et pièces) pour l'expérience 2, pendant une durée maximale de 15 minutes. Six des 36 participants (18 femmes, âge moyen 21 ans) ont abandonné dans la première expérience (1 homme et 5 femmes), au bout de 6 minutes de jeu. Dans la deuxième expérience, 16 (6 hommes et 10 femmes) des 36 participants (18 femmes, âge moyen 23 ans) ont abandonné, au bout de 7 min de jeu. Au cours de cette expérience, l'incidence de la cybercinétose est significativement plus élevée chez les femmes que chez les hommes, alors que cette différence n'est pas trouvée dans l'expérience 1. Cependant, dans aucune des deux études la sévérité de la cybercinétose telle que mesurée par le SSQ (en pré et post) ne diffère entre les hommes et les femmes. Cette observation vient corroborer l'observation que les femmes seraient plus sensibles à la nausée dans la cybercinétose (D'Amour *et al.*, 2017), et que celle-ci n'est pas reflétée par le SSQ.

Une étude plus récente du groupe de Stoffregen (Curry *et al.*, 2020) échoue également à reproduire la différence entre les sexes pour la cybercinétose : aucune preuve d'une plus grande susceptibilité à la cybercinétose chez les femmes que chez les hommes n'est retrouvée, ni que la gravité des symptômes est plus élevée chez les femmes que chez les hommes. Ils proposent ainsi, en relation avec les résultats de l'étude précédente (Munafo *et al.*, 2017), que la différence observée entre les sexes dans l'incidence de la cybercinétose lors de la deuxième expérience soit principalement liée à l'implication d'un déplacement dans l'environnement virtuel, puisque c'est le facteur principal différenciant les expériences 1 et 2.

L'étude de (Pot-Kolder *et al.*, 2018) visant, entre autre, à reproduire les différences de cybercinétose entre les sexes rapportées dans la littérature, a inclus un échantillon (N = 170) de participants âgés de 18 à 25 ans souffrant de psychose (N = 55), à risque de trouble mental (N = 20) et des participants contrôles (N = 95), et les a exposés à un café virtuel *via* un visiocasque *Sony HMZ-T1* équipé d'un tracker de tête. La cybercinétose était évaluée avant

et après l'exposition par le SSQ. L'exposition comprenait 5 conditions de population du café virtuel, durant chacune 4 minutes.

Lors du premier SSQ, 90 % des femmes et 86 % des hommes ont signalé au moins un symptôme de cybercinétose, confirmant ainsi le doute sur la fiabilité de l'utilisation d'auto-questionnaire. Les femmes ont signalé plus de symptômes que les hommes, tant globalement que pour chaque sous-échelle. Ces différences étaient présentes à la fois avant et après l'exposition à la RV, aucune différence significative entre les sexes n'est constatée dans l'augmentation de l'ensemble des symptômes après exposition, ou pour l'oculomoteur et la désorientation séparément. Les femmes ont signalé une plus forte augmentation des nausées que les hommes. Les résultats pour la cybercinétose globale et pour chacune des trois catégories de symptômes séparément sont présentés dans la Figure 42. Cette étude reproduit donc les différences entre les sexes dans les symptômes de cybercinétose.

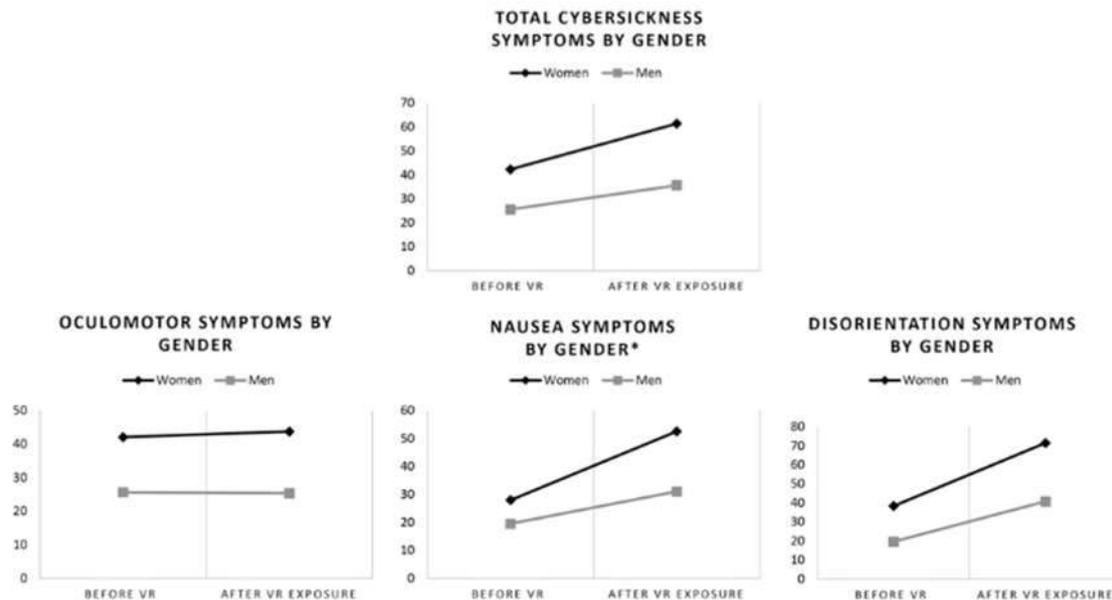


Figure 42 : Scores au SSQ avant et après exposition chez les femmes (N = 73) et chez les hommes (N = 97).

Source : Pot-Kolder *et al.*, 2018.

Une autre étude (Melo *et al.*, 2018) se penchant sur les facteurs pouvant contribuer à une meilleure expérience de l'utilisateur examine, entre autre, l'impact du sexe sur la cybercinétose lorsque les participants visualisent un contenu à 360° (vidéo capturée et environnement virtuel) à l'aide d'un visiocasque (*Oculus Rift DK2*). L'étude a porté sur 128 participants (64 femmes) entre 18 et 43 ans (âge moyen 22 ans), répartis en plusieurs groupes selon le contenu et la durée de l'exposition (1, 3, 5 ou 7 minutes). L'interaction était limitée aux mouvements de la tête, mais l'environnement visuel était accompagné d'un paysage sonore mis à jour en temps réel selon les mouvements de la tête. La cybercinétose était mesurée par le SSQ à la fin de l'exposition. En ce qui concerne la cybercinétose, aucun résultat statistiquement significatif n'a été trouvé pour aucune des variables indépendantes. La durée de l'exposition, les contenus et les conditions d'interaction utilisés étant très peu générateurs de cybercinétose, aucun abandon n'a été constaté.

L'étude (Shafer *et al.*, 2019) examinant l'influence du modèle de visiocasques et du contenu de l'environnement virtuel sur la cybercinétose (160 sujets au total, 66 femmes, âge moyen de 20,5 ans; participants jouant à des jeux vidéo commerciaux pendant 20 minutes, mesure de la présence et du SSQ en post exposition), observe un lien significatif entre sexe et

cybercinétose, quel que soit le type de jeu joué (générant plus ou moins de conflits sensoriels). Malheureusement, les scores ne sont pas calculés de façon standard (la valeur maximale de l'échelle est ici de 48) et les clusters ne sont pas analysés par sexe, ni le nombre d'abandons.

Dans le reste des études rapportées, le SSQ est systématiquement utilisé avant et après l'exposition, contrairement aux recommandations des auteurs, et cette utilisation répétée pourrait biaiser les résultats puisque, dès le premier SSQ, des scores non neutres sont systématiquement observés. Pour autant, la variation entre les deux échelles est rarement étudiée. Ces études convergent toutes sur l'importance des symptômes reliés à la nausée chez la femme. Cette symptomatologie est à mettre en relation avec l'influence du cycle hormonal sur la cinétose en général, qui a déjà été observée pour le mal de mer notamment (Grunfeld & Gresty, 1998). Concernant plus spécifiquement la cybercinétose, une étude particulièrement intéressante a investigué l'influence du cycle menstruel (Clemes & Howarth, 2005), en comparant les symptômes de 16 femmes à cycle naturel (âge moyen 28 ans) avec les symptômes de groupes témoins composés de 16 femmes prenant un contraceptif oral (âge moyen 28 ans) et de 16 hommes (âge moyen 23 ans). Les participants étaient immergés via un visiocasque *Dynovisor* (non stéréo) connecté à une *PlayStation 2*, sur laquelle ils jouaient au jeu de course « *Wipeout Fusion* » générant des mouvements selon tous les axes de rotation. Chaque session de jeu durait 20 minutes maximum ou était interrompue dès que les participants souffraient de nausées. Ces sessions ont été répétées aux jours 5, 12, 19 et 26 du cycle menstruel, correspondant aux pics et aux creux des niveaux d'hormones ovariennes (confirmés par taux salivaires). Pour 7 des participantes chez lesquelles les analyses salivaires ont confirmé les niveaux hormonaux prévus, une augmentation significative de la cybercinétose a été observée au 12<sup>ème</sup> jour du cycle. Aucune variation constante de la cybercinétose n'a été observée au cours du cycle de la pilule dans le groupe sous contraceptif oral ni au cours du pseudo-cycle attribué au groupe contrôle masculin. On constate toutefois dans le groupe des hommes une baisse de la cybercinétose au cours des 3 premières sessions, ce qui indique qu'un certain degré d'accoutumance s'est produit avec les immersions répétées chez ces participants. Les symptômes avaient tendance à se développer plus tôt au cours de la période d'immersion lors de la première session expérimentale pour ces participants, et les différences dans les délais d'apparition entre les sessions étaient statistiquement significatives. Malgré le peu de participantes contribuant aux résultats (7), l'étude permet de consolider la proposition que la susceptibilité à la cybercinétose varie au cours du cycle menstruel en raison de la variation hormonale.

En conclusion, la cybercinétose pourrait être soumise à l'influence hormonale comme la cinétose en général : influence lors de la maternité (plus grande sensibilité), lors de la ménopause (baisse de sensibilité), etc... (voir Matchock *et al.*, 2008). Il est donc vraisemblable que la différence entre les sexes soit étroitement liée aux variations cycliques des hormones de reproduction pendant le cycle menstruel, qui modulent la réactivité autonome et cardiovasculaire, la motilité gastro-intestinale et la perception viscérale.

### 5.3.3.2.3 Présence

La possibilité d'un lien entre présence et cybercinétose est souvent investiguée dans les études en RV. Il existe des différences individuelles encore incomprises dans l'aptitude à la présence dans les mondes virtuels, comme dans la sensibilité à la cybercinétose. Lors de l'immersion dans un même environnement virtuel, des individus seront présents, d'autres non, certains souffriront de cybercinétose et d'autres non. Tout comme pour la cybercinétose, pouvoir prédire qui va être présent dans un environnement virtuel serait utile : la présence est nécessaire dans les applications thérapeutiques, par exemple pour que la rééducation soit un succès. On pourrait penser que les individus souffrant de cybercinétose sont difficilement présents dans un monde virtuel, à cause de l'inconfort des symptômes. Ce n'est pas toujours

le cas, comme le soulignent plusieurs études. Inversement, une grande aptitude à la présence n'éliminera pas la possibilité de souffrir de cybercinétose pendant l'immersion. Mais les liens entre les deux phénomènes sont loin d'être clairs (De Leo *et al.*, 2014).

Dans une étude sur 88 participants (de 18 à 65 ans, âge moyen 28 ans, 35 femmes) immergés *via* un visiocasque Z800 dans un environnement neutre non stéréoscopique, puis dans un monde de prise de parole en public (une fois avec rendu stéréoscopique et une fois sans rendu stéréoscopique, ordre contrebalancé), les auteurs (Ling *et al.*, 2012) ont tenté de comprendre comment les différentes caractéristiques individuelles pouvaient être liées au niveau de présence. Une batterie de questionnaire a été utilisée, incluant la tendance immersive, la présence mesurée par l'IPQ (*Igroup Presence Questionnaire*) (Schubert *et al.*, 2001) et le SUS (questionnaire développé par Slater, Usoh et Steed), (Slater *et al.*, 1994), ainsi que le SSQ en post immersion. Les tendances immersives et leur sous-échelle « implication » se sont avérées être significativement corrélées avec la cybercinétose dans les trois environnements. Cependant, selon les auteurs, les symptômes de cybercinétose décrits étaient faibles (ils sont pourtant entre 23,76 et 24,78 dans les trois environnements) et il n'y a eu aucun abandon pendant l'expérience. Les résultats indiquent que la présence ne peut pas prédire si les participants vont souffrir de symptômes de cybercinétose. L'étude (Rosa *et al.*, 2016) analysée plus haut présente des résultats qui s'opposent à la précédente, puisqu'ils suggèrent au contraire une association entre prédisposition à l'immersion et résistance à la cybercinétose pour les joueurs sur console. Ces résultats vont dans le sens d'une association négative entre présence et cybercinétose : plus on est présent moins on est malade, plus on est malade moins on est présent. C'est également ce que les auteurs (Riches *et al.*, 2019) relèvent de façon anecdotique lors de l'observation de 76 participants (18-65 ans, âge moyen 31 ans, 49 femmes) immergés *via* un visiocasque *Oculus Rift Developer version 2* dans un environnement social (bar) où ils interagissaient avec des humanoïdes : les niveaux de présence baissent avec l'apparition de symptômes de cybercinétose.

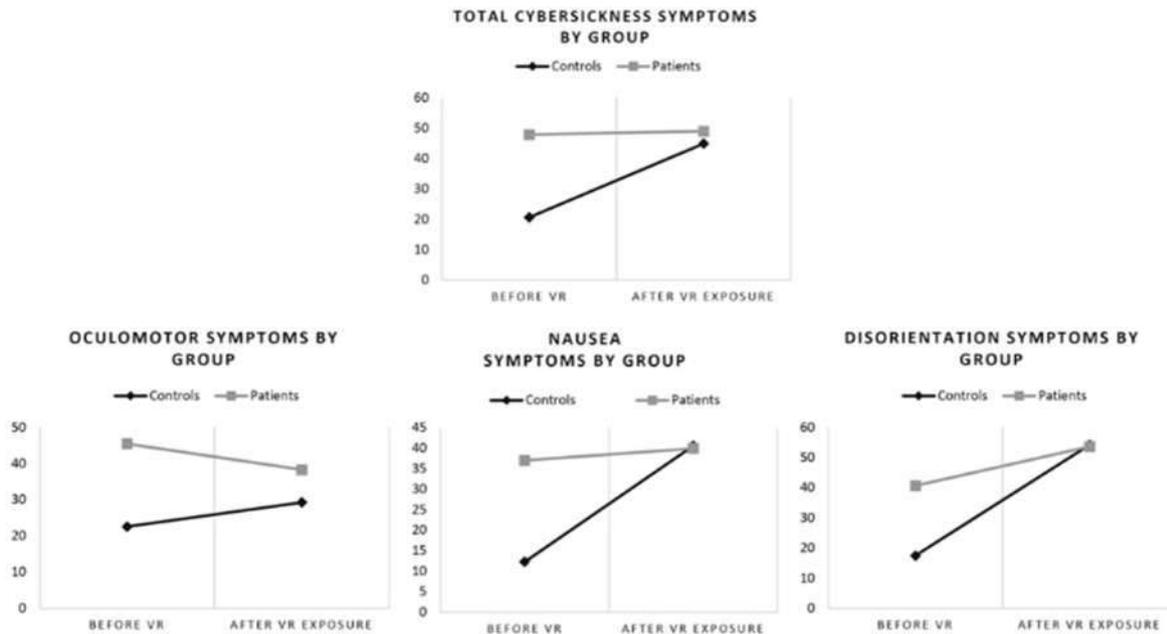
Une méta-analyse récente conclue en effet que la présence et la cybercinétose ont en règle générale un lien négatif (Weech *et al.*, 2019). Sur 20 études incluses, 10 présentent une corrélation négative entre la présence (mesurée avec l'ITQ, le SUS, ou le PQ (*Presence questionnaire* développé par Wittmer et Singer (1998)) et la cybercinétose (mesurée avec le SSQ). Six de ces études présentent une corrélation positive, et 4 ne présentent aucun lien entre les deux mesures. Les études utilisent différents systèmes de visualisation (visiocasques ou écran de projection) ainsi que des tâches variées (navigation, simulation de conduite, prise de parole en public...). Selon les auteurs, alors qu'une corrélation positive entre présence et cybercinétose a été supposée par certaines équipes (par exemple, McCauley et Sharkey, 1992 ; Slater *et al.*, 1996), il est probable que des associations positives apparaissent du fait qu'un bon niveau d'immersion (lié aux facteurs technologiques) soit lié à la survenue de cybercinétose. La visualisation de la même scène sur un écran de bureau et dans un visiocasque n'ont pas la même probabilité de générer de la cybercinétose. De même, le sentiment de présence est renforcé par l'utilisation de systèmes immersifs. Ainsi, l'immersion en réalité virtuelle conduirait à la possibilité de voir émerger à la fois la cybercinétose et la présence. Il a été supposé que le sentiment de présence supprime la cybercinétose, puisque l'attention est détournée des facteurs intrusifs tels que les conflits sensoriels (par exemple, Busscher *et al.*, 2011 ; Cooper *et al.*, 2016). Alternativement, la distraction provoquée par la cybercinétose peut empêcher l'attention sur l'environnement virtuel qui est nécessaire pour s'y sentir présent (par exemple, Wilson *et al.*, 1997 ; Witmer et Singer, 1998 ; Usoh *et al.*, 1999 ; Nichols *et al.*, 2000). Ces deux hypothèses ne s'excluent pas mutuellement. La relation est aussi clairement modulée par d'autres facteurs qui semblent affecter la cybercinétose et la présence de manière inversement proportionnelle, comme le mode de contrôle de l'interaction, le mode de visualisation, ou le sexe. S'il semble que l'ajout de la stéréoscopie visuelle, la taille

du champ visuel et la stimulation de la vection augmentent à la fois la présence et la cybercinétose, rien ne permet encore de conclure sur le pouvoir de prédiction d'une mesure sur l'autre.

#### 5.3.3.2.4 Anxiété

L'anxiété pourrait être un facteur additionnel modulant la cybercinétose, ainsi que le lien entre cybercinétose et présence. Il existe un lien entre anxiété et sensibilité au mal des transports (par exemple Collins & Lentz, 1977). Les personnes anxieuses, ainsi que les patients anxieux, sont plus sensibles au mal des transports tel que mesuré par le MSQ. Pourtant, on ne retrouve pas d'effet de l'anxiété sur le contrôle postural (Owen *et al.*, 1998), ce qui rend complexe l'interprétation du lien entre les différentes variables et mesures. On retrouve également cette relation entre cybercinétose et anxiété en réalité virtuelle (Viaud-Delmon *et al.*, 2006) : dans cette étude, les patients anxieux (N = 10) présentent plus de symptômes de cybercinétose que les participants contrôles (N = 9) dans la condition générant les plus hauts scores de présence. Les participants sont exposés à 2 environnements de façon contrebalancée : un environnement uniquement visuel et un environnement visuel et auditif. Les patients anxieux ont des scores de présence plus élevés dans l'environnement visuo-auditif, qui est également celui générant plus de cybercinétose dans ce groupe. Cet environnement est considéré comme très immersif par les participants car la mise à jour de l'environnement visuel est couplé à une mise à jour de l'environnement auditif délivré en 3D par un rendu binaural sur casque.

L'étude (Pot-Kolder *et al.*, 2018) déjà analysée plus haut pour les différences de sexe a également examiné l'influence de l'anxiété sur la cybercinétose. Rappelons qu'un total de 170 participants a été exposé selon 5 conditions à un environnement virtuel représentant un café, via un visiocasque *Sony HMZ-T1*, mis à jour selon les mouvements de la tête. Cinq conditions de stress sont générées par la variation de la densité de la population d'humanoïdes, de l'ethnicité et de l'hostilité dans l'environnement. L'environnement est visuel et auditif. Les niveaux d'anxiétés sont mesurés (cotation de 0 à 100 de l'anxiété ressentie au début de l'expérience et à l'issue de chaque immersion durant 4 minutes), et la cybercinétose par le SSQ, passé avant l'expérience et à l'issue de l'expérience. La population est jeune (25 ans en moyenne, 18-35 ans, 73 femmes), et est composée de 95 sujets sains et de 75 patients psychotiques (N = 55) ou à risque de présenter un trouble psychiatrique (N = 20). Il existe une différence significative entre les scores SSQ pré-immersion entre les patients et les contrôles (*cf.* Figure 43), et la corrélation entre anxiété et cybercinétose n'est présente que pour les score pré-immersion du SSQ. Chez les sujets contrôles, les clusters désorientation et nausée du SSQ sont partiellement modulés par l'anxiété, mais pas les symptômes oculomoteurs.



**Figure 43 : Symptômes de cybercinétose avant et après exposition à la RV.**

Selon le groupe : patients  $N = 75$  ; contrôles  $N = 95$ . Source : Pot-Kolder *et al.*, 2018.

Une corrélation significative entre l'anxiété et la cybercinétose peut donc être trouvée chez des individus en bonne santé, mais pas chez les patients. Une explication peut être le chevauchement partiel entre certains symptômes de la cybercinétose et les réponses physiologiques à l'anxiété. Il est à noter que dans cette étude les déplacements dans l'environnement sont contrôlés par le clinicien (navigation passive). Aucun abandon n'est décrit et les scores de cybercinétose sont considérés par les auteurs comme étant particulièrement bas (malheureusement, les scores aux différentes variables ne sont pas présentés, seules les corrélations le sont), ce qui viendrait amoindrir la puissance des liens suggérés entre les variables étudiées.

En conclusion, les liens entre anxiété et cybercinétose ne sont pas encore complètement élucidés, mais il est clair que la nature du lien est différente dans une population de patients psychiatriques et dans une population de participants sans pathologie psychiatrique, comme cela a déjà été suggéré dans d'autres études publiées avant 2010. Ces liens ont également été décrits dans (Mittelstädt *et al.*, 2019). Le recouvrement de la symptomatologie de la cybercinétose et de l'anxiété rend difficile l'étude de ce lien, mais suggère qu'une thérapie pour un trouble anxieux en réalité virtuelle a d'autant plus d'intérêt qu'elle va susciter une adaptation à la cybercinétose au cours des sessions.

### 5.3.3.2.5 Sensibilité au mal des transports

Le lien entre la sensibilité au mal des transports et la cybercinétose a été suggéré par de nombreuses études avant 2010, dans le cadre d'interprétation de la cinétose intervenant suite à un conflit sensoriel. Depuis, le lien n'a pas été démenti.

Les résultats de l'étude de Nalivaiko (Nalivaiko *et al.*, 2015), réalisée chez 26 jeunes volontaires (8 femmes, âge moyen de 22,5 ans) visualisant deux environnements (*Parrot Coaster et Helix*) provocateurs de cybercinétose *via* un visiocasque (*Oculus Rift*), indiquent que le score au MSSQ (questionnaire d'historique du mal des transports) est prédicteur des cotations des symptômes relevant de la nausée.

L'étude de Dennison (Dennison *et al.*, 2016) comparant les effets des conditions de visualisation (écran et visiocasque *Oculus Rift DK2*) sur la cybercinétose et des variables physiologiques (voir section 5.3.4) et incluant 20 participants adultes (dont 6 femmes) avec une expérience antérieure des jeux vidéo, a mesuré, avant la navigation, l'historique du mal des transports avec le MSSQ (composantes A et B). La sévérité de la cybercinétose est évaluée avec le SSQ après la navigation, dans chaque condition de visualisation. Là encore, un lien entre cybercinétose et MSSQ est suggéré.

Une autre étude déjà analysée elle aussi (Mittelstaedt *et al.*, 2018), proposant de mettre à jour des prédicteurs de la cybercinétose, retrouve un lien entre la sensibilité au mal des transports et au mal de mer et le score total maximal au SSQ obtenu au décours des différentes conditions (vélo ou *gamepad*, visiocasque ou grand écran), mais seulement pour la condition de navigation avec le vélo. Le niveau de cybercinétose dans la condition manette/visiocasque ne corrélait pas avec l'historique du mal des transports, mais était relié négativement à la fréquence d'utilisation de jeux vidéo : plus on joue, moins on est sensible à la cybercinétose dans la condition manette/visiocasque.

Une publication du même groupe (Mittelstädt *et al.*, 2019) confirme le lien entre scores au MSSQ et au SSQ. L'étude a de plus examiné les liens entre la cybercinétose et l'interprétation excessive de la douleur (attitude mentale exagérément négative par rapport à la douleur) d'une part, et les liens entre cybercinétose et conscience corporelle d'autre part, en faisant l'hypothèse que la focalisation sur les effets indésirables d'une situation en augmente l'intensité, et qu'une conscience corporelle élevée permettrait au contraire de limiter les effets de la cybercinétose. Les auteurs ont conduit deux études. Dans la première, 115 participants (dont 72 femmes, âge moyen 29 ans) ont rempli le questionnaire sur l'historique du mal des transports (MSSQ), le questionnaire de conscience du corps (*Body Awareness Questionnaire*, BAQ, Shields *et al.*, 1989) et le questionnaire d'interprétation catastrophique de la douleur (*Pain Catastrophizing Scale*, PCS, Sullivan *et al.*, 1995). Seuls les scores au MSSQ et à l'« interprétation catastrophique de la douleur » étaient significativement reliés. Dans la deuxième étude, 40 participants (dont 21 femmes, âge moyen 23 ans) ont été immergés dans un environnement virtuel *via* un visiocasque (*Oculus Rift Consumer Edition 1*) et ont navigué avec une manette sur un vélo virtuel dans une île, avec une vitesse constante. Deux sessions d'exploration de l'environnement de 5 minutes étaient proposées et le SSQ rempli après chaque session. Sept participants ont abandonné pendant ou après la première session, 6 participants ont abandonné lors de la deuxième session, et 27 ont complété les deux sessions. Dix des 21 participantes ont abandonné, et seulement 3 participants ont abandonné. Pourtant, les scores au SSQ dans la première session n'étaient pas différents entre les hommes et les femmes. À nouveau, les scores au MSSQ étaient significativement corrélés avec l'échelle d'« interprétation catastrophique de la douleur », mais également avec les scores du SSQ. Les résultats suggèrent également que les individus présentant une tendance à l'« interprétation catastrophique de la douleur » et une faible conscience corporelle subissent plus de cybercinétose.

Au niveau développemental, on sait que la sensibilité au mal des transports évolue pendant la croissance. Une large étude a inclus 831 enfants âgés de 7 à 12 ans (âge moyen de 9,3 ans ; 54,7 % de filles), et a documenté l'évolution des scores à la version courte du MSSQ. Les scores étaient significativement plus élevés chez les filles que chez les garçons (6,6 vs 4,2), et les pics étaient atteints à l'âge de 9 ans (Henriques *et al.*, 2014). Le mal des transports est rare chez les enfants de moins de 2 ans, mais après cette période, il devient fréquent. Une précédente étude auprès de 90 enfants âgés de 4 à 15 ans (Takahashi *et al.*, 1994) a constaté une augmentation progressive de la fréquence et de la gravité des symptômes de cinétose liés au port de prismes (inversant la vision en horizontal et en vertical) pendant la croissance. Selon plusieurs auteurs, le mal des transports se stabilise à l'âge de 10 ans, ce qui s'expliquerait par la maturation de l'intégration multisensorielle permettant de coordonner les

réponses posturales au système vestibulaire. Il ne serait donc pas étonnant de retrouver un lien entre l'âge et la cybercinétose, modulé par la sensibilité au mal des transports. Cependant, à notre connaissance, cet aspect n'a encore pas été décrit.

Les études sont donc concluantes sur le lien entre sensibilité au mal des transports et la cybercinétose. La sensibilité au mal des transports est par conséquent un facteur permettant d'écartier des participants qui pourraient être plus propices à développer des symptômes de cybercinétose.

#### 5.3.3.2.6 Âge et expérience d'utilisation

Dans les facteurs influençant la cybercinétose, il est important de prendre en compte l'âge, afin de cerner les populations pour lesquelles l'exposition à la réalité virtuelle pourrait présenter plus de risques d'inconfort.

Concernant l'expérience d'utilisation, celle-ci a été unanimement décrite comme modulant la cybercinétose dans un sens positif : plus on est exposé, moins on est sensible à la cybercinétose. Il est probable que les expositions répétées permettent de mettre en œuvre des stratégies d'adaptation aux nouvelles congruences sensorielles proposées par les dispositifs de réalité virtuelle, et que la multiplication de la confrontation à de nouvelles congruences convoque une forme de plasticité dans la perception.

Rappelons que dans l'étude de Mittelstaedt (Mittelstaedt *et al.*, 2018), la cybercinétose est négativement reliée à la fréquence d'utilisation de jeux vidéo dans la condition *gamepad/visiocasque* : plus on joue, moins on est sensible à la cybercinétose. L'étude de (Rosa *et al.*, 2016) examinant les caractéristiques de l'utilisateur associées à une moindre cybercinétose en réalité virtuelle (71 participants, dont 47 femmes, âge moyen de 24 ans) suggère qu'il existe trois profils distincts dans la population de l'étude (joueur sur console, joueur sur ordinateur et non joueur), et que le profil du joueur sur ordinateur est associé à une plus grande prédisposition à être immergé et à subir moins de symptômes de cybercinétose que les joueurs sur console et les non joueurs.

Concernant le facteur âge, on pourrait penser que l'élargissement de la fenêtre d'intégration multisensorielle apparaissant au cours de l'âge rend une population de seniors moins sensibles à la cybercinétose qu'une jeune population. Par exemple, l'étude de Benoit (Benoit *et al.*, 2015) sur 18 participants (âge moyen 68 ans) présentant une plainte mnésique ne retrouve aucun symptôme de cybercinétose dans les différentes conditions testées pour comparer l'efficacité d'un dispositif de RV (écran de projection 320 cm x 240 cm, stéréo visuelle passive) à générer des souvenirs autobiographiques. Pourtant, une étude (Liu, 2014) a suggéré que les personnes de plus de 65 ans sont également sensibles à la cybercinétose, et que celle-ci est liée entre autre à la vitesse de rotation de l'environnement et à la durée de l'exposition.

Dans une autre étude déjà décrite, (Liu & Uang, 2016) l'observation d'un groupe de participants âgés de plus de 65 ans suggèrent que la cybercinétose est liée à un mode de visualisation stéréoscopique plutôt que monoscopique. Cependant, ces études n'incluent pas de groupes de participants de différents âges et ont par conséquent un faible pouvoir prédictif des effets spécifiquement liés à l'âge. Enfin, il a été décrit avant 2010 que les simulateurs de conduites génèrent plus de cybercinétose chez les seniors (voir Brooks *et al.*, 2010 et Classen *et al.*, 2011, cités dans Keshavarz *et al.*, 2017).

Plusieurs études incluant un groupe contrôle ne trouvent pas de différence dans les niveaux de cybercinétose entre les âges. L'étude de (Corriveau Lecavalier *et al.*, 2018) observe un groupe de 57 adultes âgés de 67 ans en moyenne (dont 47 femmes) et un groupe de 20

adultes âgés de 21 ans en moyenne (dont 13 femmes) dans une tâche de mémorisation d'objets dans une boutique virtuelle visualisée *via* un casque *Nvisor ST50* permettant de coupler les mouvements de la tête. Aucune différence dans les scores au SSQ avant et après immersion n'est retrouvée entre les deux groupes.

Trente-trois participants (11 jeunes en bonne santé, âge moyen 28 ans, dont 6 femmes ; 11 adultes âgés en bonne santé, âge moyen 66 ans, dont 8 femmes ; 11 personnes atteintes de la maladie de Parkinson, âge moyen 65 ans ; dont 8 femmes) ont été recrutés pour l'étude de Kim (Kim *et al.*, 2017). Les participants ont marché pendant 20 minutes tout en regardant une scène de ville virtuelle *via* un visiocasque *Oculus Rift DK2*. Plusieurs mesures sont effectuées, dont des mesures posturographiques et le SSQ passé en pré et post exposition. Les scores ne diffèrent pas en pré et post exposition, quel que soit le groupe de participants. Ainsi, 20 minutes de marche dans un environnement immersif *via* un visiocasque n'a pas induit de cybercinétose ni d'altération du contrôle postural statique ou dynamique.

Enfin, une étude a examiné l'intrication des facteurs âge et expérience de jeu (Keshavarz *et al.*, 2017) sur la cybercinétose, pendant deux sessions de simulation de conduite (jeux *Gran Turismo* projeté sur un grand écran de 3 m x 1,96 m), avec ou sans dispositif de restriction de mouvements (fixation de la tête et du dos sur le siège). Quarante-deux adultes en bonne santé (23 plus jeunes, 19 plus âgés) y ont participé. Cinq participants (2 plus jeunes, 3 plus âgés) n'ont pas terminé les deux séances de conduite en raison des symptômes de cybercinétose lors de la première séance (3 conduites avec dispositif de retenue, 2 sans dispositif de retenue) et ont donc été exclus des analyses de données. La taille de l'échantillon final est de 37 participants, dont 21 jeunes adultes en bonne santé (dont 14 femmes ; âge moyen 25 ans) et 16 personnes âgées en bonne santé (dont 11 femmes ; âge moyen 71 ans). La cybercinétose, telle que mesurée par la FMS et le SSQ, augmente avec la durée d'exposition, et est plus forte lors de la première session par rapport à la seconde, spécifiquement pour les seniors.

Deux groupes sont formés selon l'expérience en jeux : un groupe de 23 participants non joueurs (15 du groupe plus âgés), et un groupe de 14 joueurs (1 du groupe plus âgés). Il est observé que dans les deux conditions, les non joueurs s'arrêtent plus rapidement. Dans la condition sans restriction de mouvement, on observe également une différence au score total SSQ. Malheureusement, cette comparaison concerne principalement les jeunes participants (*cf.* Figure 44).

Les conclusions de l'étude soulignent que les seniors seraient plus sensibles à la cybercinétose dans un environnement virtuel de type simulation de conduite. Les seniors qui souffrent de cybercinétose dans la condition sans restriction de mouvement sont moins malades quand ils sont restreints. La contention pourrait être particulièrement utile pour réduire la cinétose chez les seniors, dans l'hypothèse où limiter les oscillations posturales lors de l'exposition pourrait réduire la cybercinétose dans cette population.

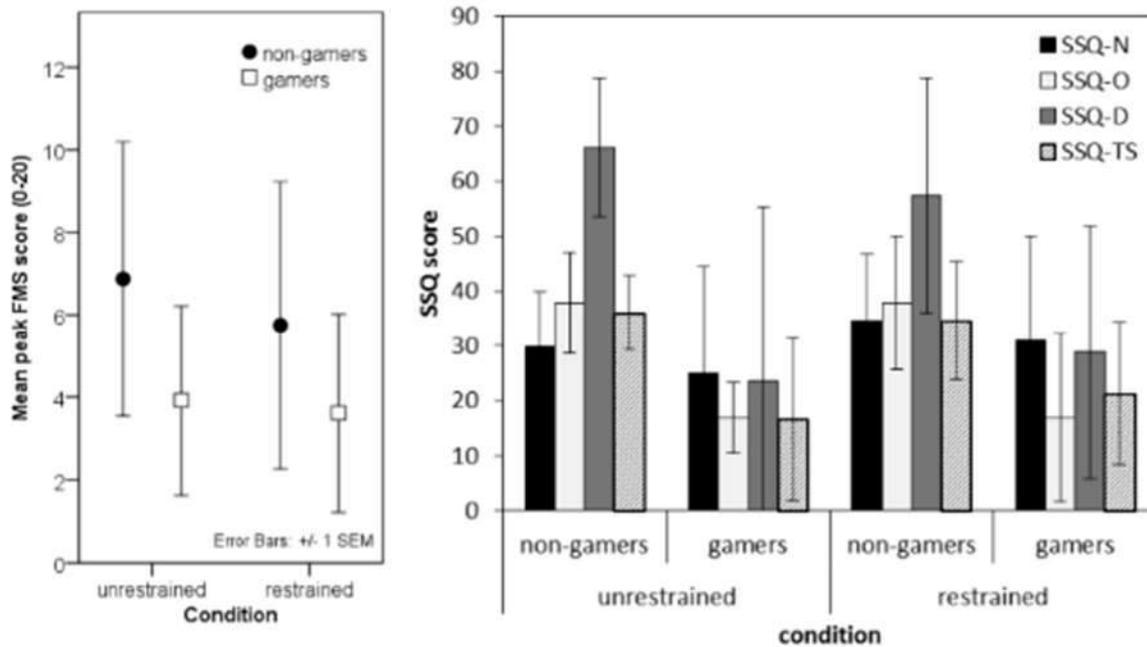


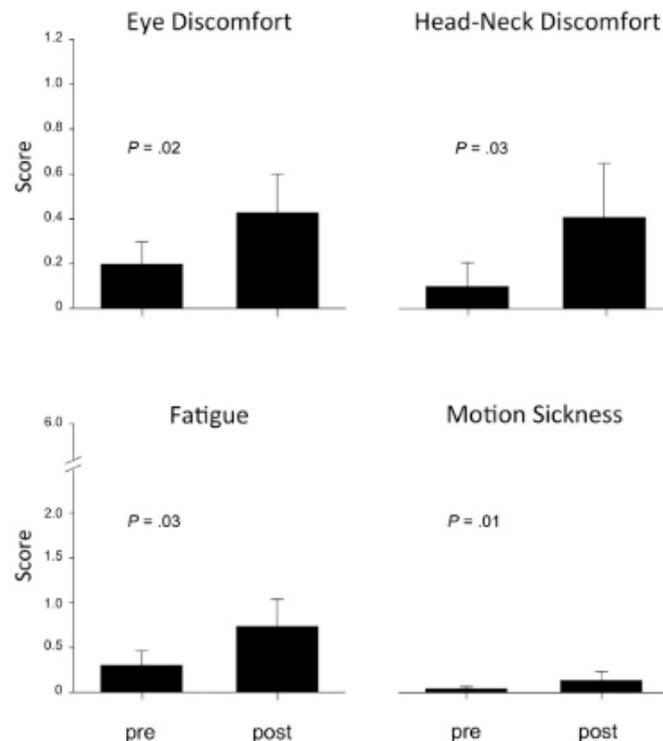
Figure 44 : Scores au FMS (à gauche) et au SSQ (à droite) selon l'expérience de pratique de jeu vidéo et la condition expérimentale (sans ou avec fixation sur le siège).

Source : Keshavarz *et al.*, 2017.

Au niveau développemental, les variations de cybercinétose n'ont été que peu ou anecdotiquement décrites. Les études incluant des groupes d'enfants sont le plus souvent des études d'usage, validant l'utilisation d'une application, majoritairement à visée thérapeutique. Les risques de la réalité virtuelle liés à l'utilisation de visiocasques chez les enfants (Tychsen & Foeller, 2020) ont été estimés en comparant les mesures faites avant et après deux sessions de jeu (*Eagle Flight* : vol d'oiseau à la première personne) de 30 minutes sur une *playstation VR Sony*. Cinquante enfants âgés entre 3 et 10 ans ont été recrutés (dont 21 filles). Tous les enfants avaient déjà été exposés à des jeux vidéo en 2D sur des écrans d'ordinateur ou des appareils mobiles, mais aucun n'avait encore utilisé de visiocasque pour jouer à des jeux en 3D. Les mesures s'axent sur les fonctions visuomotrices (réflexe vestibulo-oculaire, posturographie, fonctions visuelles) mais comprennent également une estimation de la cybercinétose menée avec une version du SSQ adaptée par les auteurs pour l'utilisation en pédiatrie. Le jeu *Eagle Flight* nécessite de bouger la tête pour contrôler l'orientation de ses déplacements. La vitesse est contrôlée *via* un *gamepad* (manette de jeu). Quarante-sept des 50 enfants (94 %) ont complété les deux séances de RV successives de 30 minutes.

Sur la version pédiatrique du SSQ, les items sont cotés de 0 à 6 et analysés en 4 clusters de symptômes (fatigue visuelle ; inconfort au niveau du cou et de la tête ; fatigue ; vertiges ou nausées). Le score moyen avant exposition pour les 4 clusters était de 0,15 et passait à 0,43 après exposition. L'augmentation moyenne du score pour chacun des 4 clusters de symptômes était significative (voir Figure 45). Les enfants ayant terminé les deux essais (94 % des participants) étaient déçus de devoir s'arrêter de jouer. Trois enfants (6 % des participants) ont interrompu l'essai pendant les 10 premières minutes de la première session : 2 filles (âgées de 5 et 6 ans) et 1 garçon (âgé de 7 ans). Les deux filles ont rapporté des symptômes correspondant à une légère cybercinétose ; le garçon a dit qu'il s'ennuyait et que le casque n'était pas confortable. Aucun post-effet n'a été rapporté par les parents dans la semaine qui a suivi l'exposition. Les mesures physiologiques n'ont par ailleurs révélé aucune modification biologiquement significative suite à l'exposition. Ces résultats sont rassurants par rapport à l'utilisation de la RV à visée thérapeutique auprès des enfants, mais il est étonnant que ceux-

ci soient autant homogènes et qu'aucune différence interindividuelle ne soit mentionnée, la sensibilité au mal des transports évoluant entre 4 et 10 ans.

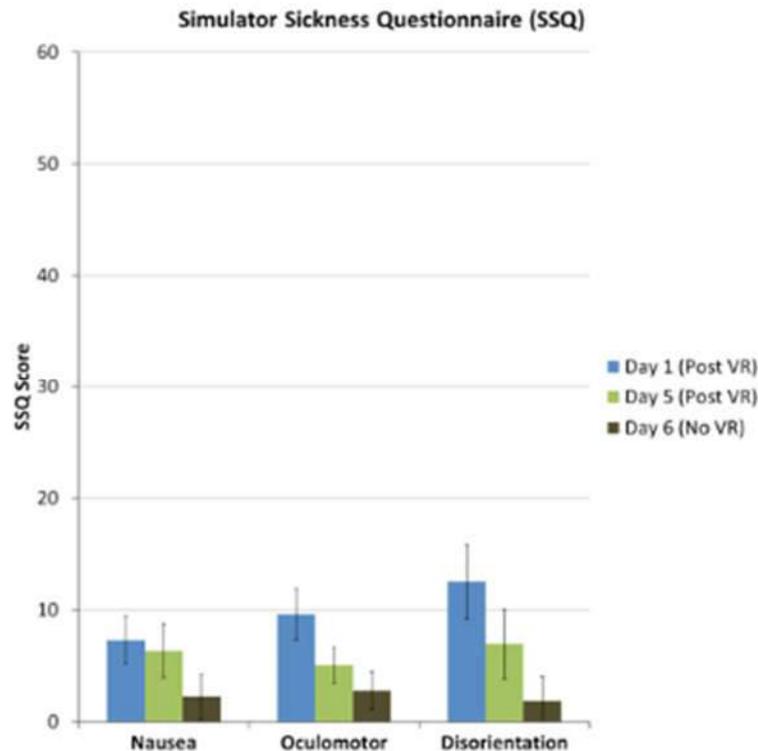


**Figure 45 : Scores par cluster au SSQ (version pédiatrique) avant et après exposition à la réalité virtuelle.**

Groupe de 47 enfants (entre 4 et 10 ans), la cotation maximale est de 6 (Tychsen & Foeller, 2020).

Une autre étude récente (Rauschenberger & Barakat, 2020) va dans le sens d'effets négatifs limités de la réalité virtuelle chez les enfants. Les auteurs ont examiné les effets potentiels sur la santé d'enfants entre 10 et 12 ans de l'utilisation de la réalité virtuelle dans le cadre d'un usage impliquant des épisodes d'utilisation relativement brefs sur un nombre limité de jours séquentiels. Divers types d'effets ont été évalués (ophtalmologique, vestibulaire, visuo-moteur, confort subjectif ...) à l'aide de mesures optométriques, psychophysiques et d'auto-évaluation. Trente enfants (âgés de 10 à 12 ans, dont 15 filles) ont été immergés avec un des 5 modèles de visiocasque disponibles pour l'étude (*Lenovo Mirage Solo avec Google Daydream, HTC Vive, Oculus Rift, Sony PlayStation VR, Samsung Gear VR*) pendant 30 minutes par jour pendant cinq jours d'utilisation consécutifs. L'enfant pouvait choisir le contenu des expositions dans un catalogue en contenant une grande variété, allant de visualisations passives aux jeux interactifs. Les enfants restaient assis pendant les expositions.

Les mesures subjectives (SSQ) ont été prises après la première exposition à la réalité virtuelle (1<sup>er</sup> jour), après l'exposition à la RV du cinquième jour, et 24 heures après le cinquième jour d'exposition. Le SSQ n'a pas été passé en test/re-test avant et après chaque utilisation afin d'éviter d'influencer négativement les scores. Les scores rapportés au SSQ se sont avérés assez bas et diminuaient au fur et à mesure des expositions, soulignant les possibles effets d'adaptation avec la répétition des utilisations (cf. Figure 46).



**Figure 46 : Moyenne des scores aux 3 clusters du SSQ dans un groupe d'enfants de 10-12 ans (N=30) pendant et à l'issue de 5 jours d'exposition à la RV avec un visiocasque.**

Source : Rauschenberger & Barakat, 2020.

Toutefois, les scores sont plus élevés après l'utilisation de la RV les jours 1 et 5 que 24h après la dernière utilisation, mais pas au point de suggérer que les participants ont eu des nausées, de l'inconfort visuel ou de la désorientation. Aucun autre effet négatif statistiquement significatif n'a été constaté. En d'autres termes, cette étude n'a trouvé aucune preuve que l'utilisation à court terme de la RV dans un cadre éducatif par des enfants de 10 à 12 ans est associée à des effets secondaires néfastes. La présente étude n'aborde pas l'utilisation à long terme ou les effets psychologiques potentiels de différents contenus de RV. Elle ne permet pas non plus d'apprécier les éventuelles différences entre les différents modèles de visiocasque ou les différents contenus utilisés.

En conclusion, les liens entre âge et cybercinétose sont encore trop peu étudiés, surtout dans la dimension développementale (comparaison enfants/adultes). Les études laissent entendre que le vieillissement n'influencerait pas la survenue de cybercinétose, au moins dans des environnements autres que de la simulation de conduite (dans lesquels la rapidité du flux visuel et des rotations de celui-ci sont sans doute en jeu), et que la pratique de jeux vidéo a un effet bénéfique sur la cybercinétose en diminuant l'apparition de celle-ci.

### 5.3.4 Évaluation de la cybercinétose avec des mesures physiologiques

L'exposition à des situations de réalité virtuelle impacte l'être humain dans son ensemble, et donc sa physiologie. Pour comprendre le lien qui peut exister entre cybercinétose et physiologie, la littérature scientifique qui aborde conjointement ces deux thèmes, en mesurant la cybercinétose et des variables physiologiques, a été recherchée sur la période 2010 à 2019. Onze publications ont été identifiées, mais trois ont été écartées : soit elles analysaient la cybercinétose et la physiologie indépendamment, sans examiner les interactions entre elles,

ou bien aucun descriptif de l'expérimentation en réalité virtuelle n'était donné, constituant ainsi une limite méthodologique majeure. Constatant qu'il était souvent fait référence à une publication de 2005 (Kim *et al.*, 2005) traitant de ce sujet, cette étude a été intégrée à l'analyse. Par conséquent, la présente synthèse s'appuie sur 9 études dont les limites méthodologiques ont été considérées comme acceptables (Kim *et al.*, 2005 ; Ling *et al.*, 2012 ; Russell *et al.*, 2014 ; Nalivaiko *et al.*, 2015 ; Dennison *et al.*, 2016 ; Gavgani *et al.*, 2016 ; Gavgani *et al.*, 2017 ; Gavgani *et al.*, 2018 ; Gallagher *et al.*, 2019).

De façon générale, les études recueillies :

- proposent aux participants une exposition dans des expériences de réalité virtuelle soit neutres (contenu non générateur de cybercinétose) pour la mesure de données de référence (*baselines*), soit provocantes (contenu pouvant générer de la cybercinétose) identifiées comme situations de test ;
- s'appuient sur le fait qu'il est notable que la réalité virtuelle génère de la cybercinétose, et leur but va être d'analyser l'évolution de variables physiologiques pour mieux la comprendre, déceler son apparition, étudier son évolution et ses effets à court terme, suivre des techniques de respiration pour y faire face ou encore développer un modèle de prédiction ;
- s'intéressent à l'analyse de différents paramètres sur la survenue des effets, comme le dispositif d'affichage, le temps, le flux visuel, la stéréoscopie, ou encore des techniques respiratoires ;
- proposent des mesures subjectives de la cybercinétose (questionnaires ou évaluation verbale ponctuelle) et des mesures des variables physiologiques à différents moments de la procédure, en général : avant immersion, pendant immersion, juste après immersion, et pour certaines, l'exploration peut être faite une ou deux heures après la fin de l'exposition.

#### 5.3.4.1.1 Évaluation des composantes de la cybercinétose et physiologie

Dans les études retenues, les outils utilisés pour mesurer la cybercinétose et certains états (anxiété, malaise, implication) se répartissent en deux catégories.

Tout d'abord, on dénombre des questionnaires qui sont délivrés préalablement (*Pré*) ou postérieurement (*Post*) à l'exposition dans la réalité virtuelle, et dont on peut retrouver la description dans le chapitre 5.3.2.1 : le *Motion Sickness Susceptibility Questionnaire* (MSSQ) (Golding, 1998) (délivré *Pré*) avec ses deux composantes MSSQA (pendant l'enfance) et MSSQB (pendant les dix dernières années) ; le *Simulation Sickness Questionnaire* (SSQ) (Kennedy *et al.*, 1993) (délivré *Pré* ou *Post*) ; le *Motion Sickness Assessment Questionnaire* (MSAQ) (Gianaros *et al.*, 2001) (délivré *Pré* ou *Post*) ; l'*Immersive Tendency Questionnaire* (ITQ) (Witmer & Singer, 1996) (délivré *Pré*) ; ou encore l'*Anxiety scale*, une échelle de l'anxiété allant de 0 à 6 (délivrée *Post*).

On note également des questionnements verbaux, souvent propres à l'équipe de recherche, délivrés pendant l'exposition, toutes les 1 ou 2 minutes comme le *Level on Motion Sickness* (LMS) (de 0 : pas d'effet à 10 : effet sévère) ; le *Verbal Rating of Nausea* (VRN) (de 0 : pas d'effet à 9 : sur le point de vomir) ; le *Verbal Rating of Cybersickness* (CSV) (de 1 : rien à 4 : nausée modérée) ; le *Self Efficacy Score* (SES) (de 1 : rien à 6 : mal de mer) ; le *Self Reporting Sickness* (SRS) (de 1 à 4) ; ou encore le *Malaise scale* (Regan & Ramsey, 1996) (de 0 : rien à 3 : nausée modérée).

Pour explorer l'état physiologique du participant, un certain nombre de tests peuvent être pratiqués, qui reflètent notamment l'activation du système nerveux parasympathique (SNP). Ceux rencontrés dans les études analysées sont décrits dans le paragraphe qui suit.

D'autres tests du fonctionnement humain ont été utilisés, soit pour recruter les participants en examinant leurs capacités par rapport à la stéréoscopie, soit pour évaluer leur vitesse de

réaction. Il s'agit respectivement du Test de la vision stéréoscopique (TNO) (Walvaren, 1973) et du *Deary-Liewald Reaction Test* (DLRT) (Deary & Liewald, 2010).

#### 5.3.4.1.2 Techniques de mesures rencontrées en physiologie

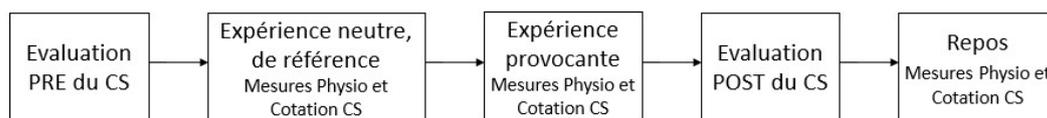
Différentes variables physiologiques décrivent l'activation du SNP. Elles peuvent être mesurées à partir de techniques variées listées dans l'Annexe 2; celles utilisées dans les publications retenues sont précisées, ainsi que les conditions dans lesquelles elles sont mesurées.

#### 5.3.4.1.3 Expériences virtuelles et participants

Les participants (femmes et hommes) des neuf études retenues sont tous des sujets sains et jeunes, les moyennes d'âge allant de 19 à 29 ans. Ils ont été choisis sans expérience de la réalité virtuelle pour 3 études (Kim *et al.*, 2005 ; Gavgani *et al.*, 2016 ; Gavgani *et al.*, 2017), et dans une autre, leur susceptibilité à la cybercinétose a été testée pour les recruter (Russell *et al.*, 2014). Les effectifs sont très variables, puisque pour 6 études ils vont de 12 à 30 (Nalivaiko *et al.*, 2015 ; Dennison *et al.*, 2016 ; Gavgani *et al.*, 2016 ; Gavgani *et al.*, 2017 ; Gavgani *et al.*, 2018 ; Gallagher *et al.*, 2019), tandis que pour 3 autres ils sont de 60, 61 et 88 (Kim *et al.*, 2005 ; Ling *et al.*, 2012 ; Russell *et al.*, 2014).

En ce qui concerne les dispositifs de visualisation utilisés, les informations sont en général peu précisées. Il ressort que 8 études ont été réalisées avec un visiocasque (4 avec un *Oculus Rift DK1*, 2 avec un *Oculus Rift DK2*, 1 avec un *eMagin Z800*) (Ling *et al.*, 2012 ; Russell *et al.*, 2014 ; Nalivaiko *et al.*, 2015 ; Gavgani *et al.*, 2016 ; Gavgani *et al.*, 2017 ; Gavgani *et al.*, 2018 ; Gallagher *et al.*, 2019). Une seule d'entre elles précise les caractéristiques de l'*Oculus Rift DK2* (FOV : 100° Hor et 100° Ver ; résolution 960x1080 pixels ; 75 Hz). Dans le cadre d'une étude, l'effet dispositif visuel a été exploré et la condition visiocasque a été comparée à la condition écran (FOV : 60° Hor et 40° Ver ; résolution 1920x1280 pixels ; 60 Hz) (Dennison *et al.*, 2016). Enfin, dans une étude, le dispositif est un écran concave type théâtre (FOV : 150° Hor et 45° Ver ; résolution 3840x1024 pixels) (Kim *et al.*, 2005).

Globalement, la procédure mise en place dans les études contient le déroulé suivant (*cf.* Figure 47) :



**Figure 47 : Exemple de déroulé de la procédure ou d'une séquence de la procédure.**

Les expériences de réalité virtuelle considérées comme « neutres » ou de référence, dédiées à mesurer et à comprendre l'état de référence du patient sur le plan psychophysiologique, figurent au démarrage de presque toutes les procédures (8 études sur 9). Les participants portent le casque, ou sont devant l'écran, et regardent un environnement dit « neutre » qui est souvent une image fixe de l'environnement virtuel auquel ils vont être exposés plus tard. Le temps d'exposition dans cette situation de référence varie de 2 à 10 minutes. Les mesures physiologiques de référence sont réalisées ainsi que les évaluations de cybercinétose initiales.

Puis, dans la majorité des études (7 sur 9), les participants sont exposés, sans interaction, à des stimuli virtuels souvent provocants (c'est-à-dire au contenu générateur de cybercinétose, comme un tour sur des montagnes russes). Les durées d'exposition envisagées dans la procédure varient de 1 à 20 minutes, et dans ce dernier cas deux expositions de 10 minutes sont séparées par une pause de 5 minutes. Mais souvent dans des situations provocantes et/ou avec casque, les participants ne tiennent pas le temps imparti *a priori*, et abandonnent l'expérience en raison de nausées (dans 6 études sur 9) (Kim *et al.*, 2005 ; Nalivaiko *et al.*, 2015 ; Dennison *et al.*, 2016 ; Gavgani *et al.*, 2016 ; Gavgani *et al.*, 2017 ; Gavgani *et al.*,

2018). Deux études seulement ont permis la navigation dans l'univers virtuel, soit grâce à un volant accompagné de freins et d'accélérateur (Kim *et al.*, 2005), soit grâce au contrôleur de la console de jeu Xbox (Dennison *et al.*, 2016). Une étude s'est intéressée à l'utilisation d'une méthode active pour limiter la cybercinétose (Russell *et al.*, 2014).

#### 5.3.4.1.4 Effets des expériences virtuelles

Dans toutes les études retenues, il est montré que les expériences virtuelles ont un impact sur certaines des variables physiologiques humaines et que des symptômes de cybercinétose apparaissent. La présentation des résultats est organisée notamment en fonction d'effets visés, pouvant être liés aux dispositifs visuels utilisés (écrans ou visiocasques), aux activités proposées et par conséquent aux contenus, ou encore à certains paramètres (comme la stéréoscopie). La synthèse des études est proposée dans le Tableau 29 (Annexe 3). Dans chacune des études il était indiqué aux participants qu'ils pouvaient s'arrêter dès qu'ils le souhaitaient.

#### Changements physiologiques induits par la réalité virtuelle

La publication de Kim (Kim *et al.*, 2005) fait office de référence, car elle relève les changements physiologiques qui apparaissent quand des sujets sont exposés à une expérience virtuelle. Soixante-et-un jeunes participants (31 hommes et 30 femmes), moyenne d'âge 23 ans), sains et sans expérience de la réalité virtuelle, ont été impliqués. Après une période préliminaire de référence (5 minutes), pendant laquelle ils regardaient une image fixe de l'environnement virtuel, les sujets étaient engagés dans un voyage dans la campagne ou en ville (9,5 minutes) qu'ils regardaient sur un écran concave type « théâtre » (FOV : 150°H 45°V, 3840 x 1024 pixels). Il leur était demandé de détecter des objets virtuels spécifiques. Afin de se déplacer, ils utilisaient un volant, et disposaient d'un frein et d'un accélérateur. Des haut-parleurs leur permettaient de percevoir l'ambiance sonore.

La susceptibilité des participants aux malaises a été questionnée avant la navigation *via* le MSSQ, et la sévérité de la cybercinétose ressentie a été évaluée *via* le SSQ après la navigation. Par ailleurs, 16 signaux physiologiques ont été enregistrés avant (référence), pendant et après la navigation (repos de 1 minute) par un polygraphe *Biopac* incluant : ECG (électrocardiogramme), EOG (électro-oculogramme), EGG (électrogastrogramme), PPG (photoplethysmographie<sup>17</sup>), conductance et température de la peau, pneumogramme respiratoire et EEG.

Quatre participants (2 hommes et 2 femmes) ont dû abandonner avant la fin de l'expérience en raison de vomissements. La moyenne du score SSQ chez les 57 participants restants (29 hommes et 28 femmes) était de 39, avec une prépondérance des sous scores comme suit : Désorientation > Nausée > Oculomoteur. Par rapport à la situation de référence, les auteurs notent une augmentation significative de certains paramètres physiologiques (tachyarythmie gastrique, conductance de la peau du doigt, variabilité de la fréquence cardiaque, puissance delta relative des sites T3 et F3) ; tandis que d'autres diminuent significativement (période cardiaque, température de la peau, amplitude maximale du photopléthysmogramme, puissance bêta relative des sites F3 et T3). Ils rapportent une corrélation positive significative entre les scores de SSQ et des variables physiologiques : tachyarythmie gastrique, fréquence du clignement des yeux, fréquence respiratoire, variabilité de la fréquence cardiaque et période cardiaque. Plus ces variables physiologiques changent par rapport à la situation de référence, plus les personnes rapportent de cybercinétose pendant l'expérience virtuelle. De

---

<sup>17</sup> La photoplethysmographie (PPG) est une technique optique simple employée pour trouver les changements volumétriques du sang dans la circulation périphérique.

plus, ils notent une corrélation positive significative avec l'onde delta de l'EEG, et négative avec l'onde bêta de l'EEG.

Leurs résultats suggèrent qu'une expérience de réalité virtuelle, pendant laquelle les sujets sont actifs (navigation), avec un champ de vision relativement large (150° H et 45° V), avec projection sur plusieurs écrans, peut provoquer de la cybercinétose dans une courte période d'exposition (9,5 minutes). Le SSQ post exposition de 39 est comparable à celui obtenu dans des expositions avec visiocasque sur une durée de 20 minutes. Ces résultats suggèrent également que la cybercinétose accompagne les changements de modèle dans les activités des systèmes nerveux central et autonome, et que pour prédire la cybercinétose, il faut examiner une variable autonome (période cardiaque), des paramètres EEG (T3 puissances delta et beta), et une variable subjective (MSSQ). Dans cette étude, cela a permis de prédire 46 % de la variance de la sévérité de la cybercinétose.

### **Effets du contenu et du réalisme visuel**

S'appuyant sur les travaux précédents et sur ceux s'intéressant aux perturbations de la température de la peau dans la pathogénèse de la *Motion Sickness* (MS), Nalivaiko *et al.* (Nalivaiko *et al.*, 2015) ont émis deux hypothèses : *i*) des stimuli visuels provocateurs conduiront à un réchauffement cutané dû à la vasodilatation, et ces changements seront plus importants dans les zones cutanées avec des anastomoses artério-veineuses bien développées ; *ii*) les changements de température des doigts seront en corrélation avec une évaluation subjective de la nausée et pourraient donc être utilisés comme marqueur physiologique de cybercinétose.

Vingt-six jeunes participants (18 hommes et 8 femmes, moyenne d'âge 22,5 ans) ont été recrutés. Après une période préliminaire de référence (10 minutes) pendant laquelle ils regardaient, *via* le visiocasque *Oculus Rift DK1*, une image neutre stationnaire, ils ont été exposés, sans interaction, à un tour virtuel sur des montagnes russes (14 minutes), ce qui représente une situation très provocante de malaises. Les participants étaient répartis aléatoirement en 2 groupes homogènes de 13 personnes (9 hommes et 4 femmes), chaque groupe expérimentant le tour virtuel généré par un système différent : *Parrot Coaster* (*ArchiVision, Wierden, Netherlands*) ou *Helix* (*Psychic Parrot Games, USA*). Les différences entre les deux systèmes se situaient au niveau des détails visuels, la simulation *Helix* paraissant plus réaliste que la simulation *Parrot* (*cf.* Figure 48).



**Figure 48 : Exemples de captures d'écran des simulations *Parrot* (A) et *Helix* (B).**

Source : Nalivaiko *et al.*, 2015.

La susceptibilité des participants aux malaises a été questionnée avant la navigation *via* le MSSQ, alors que pendant le tour virtuel leur niveau de nausée était évalué toutes les 2 minutes sur une échelle de 0 (pas d'effet) à 10 (sur le point de vomir). Avant l'exposition à la situation de référence, les participants ont exécuté les 40 essais du *Deary-Liewald Reaction Test* : le

participant doit appuyer sur une touche du clavier dès qu'il voit une croix sur l'écran. Ce test a été renouvelé immédiatement à la fin du tour virtuel. Au niveau physiologique, les mesures ont été réalisées depuis la situation de référence jusqu'à 5 minutes après le second test de réaction : température de la peau (index et avant-bras, à gauche), pouls (pouce gauche) et fréquence cardiaque déduite des pics d'impulsions de pression.

67 % des participants du groupe *Helix* et 17 % du groupe *Parrot* n'ont pas réussi à tenir les 14 minutes prévues pour l'exposition au tour virtuel. Ils se sont arrêtés en raison de la nausée, celle-ci étant supérieure avec le système *Helix*. Les auteurs montrent que le « MSSQ pre » prédit l'apparition des nausées dans le groupe *Parrot* et l'abandon précoce de la session dans le groupe *Helix*.

Au niveau physiologique, l'exposition dans les montagnes russes augmente le temps de réaction de 20 à 50 ms. Cette augmentation est étroitement corrélée à l'évaluation subjective des nausées. L'exposition impacte également la fréquence cardiaque, selon l'état nauséeux des sujets : sujets nauséeux (score nausée > 5), la fréquence cardiaque augmente ; sujets moyennement nauséeux (score nausée < 5), elle augmente pour certains et diminue pour d'autres.

L'exposition dans le tour virtuel a impacté la température de la peau de façon variée selon les sujets qui ont été classés en *low-T* (n = 8, 23-29°C) et *high-T* (n = 18, 32-36°C), selon les références mesurées au niveau du doigt. Chez les sujets du premier groupe, elle a augmenté de 3 à 4°C, tandis que chez la plupart des sujets du second groupe, elle n'a pas changé ou a diminué temporairement de 1,5 à 2°C. Les auteurs n'ont pas trouvé de corrélation entre l'amplitude des changements de température des doigts et le score de nausée à la fin du tour virtuel. Dans la majorité des cas (15/26), la température au niveau de l'avant-bras n'a pas changé par rapport à la situation de référence.

En conclusion, la cybercinétose est associée à des changements dans la thermorégulation cutanée ; cela soutient l'idée d'un lien étroit entre le mal des transports et la thermorégulation. La cybercinétose induit un allongement des temps de réaction, ce qui peut être problématique d'un point de vue sécuritaire. L'identification des éléments visuels générateurs de cybercinétose est indispensable pour le bon développement d'applications de RV.

### **Effets du contenu et des protocoles expérimentaux**

Dans la suite des travaux de Nalivaiko *et al.* (Nalivaiko *et al.*, 2015), Gavgani *et al.*, ont publié trois études (Gavgani *et al.*, 2016 ; Gavgani *et al.*, 2017 ; Gavgani *et al.*, 2018) examinant les interactions entre cybercinétose et signaux physiologiques avec des protocoles expérimentaux spécifiques, mais s'appuyant sur la même procédure d'exposition en réalité virtuelle qui est décrite une fois pour toutes, et qui reprend celle de Nalivaiko *et al.* Les variantes seront explicitées ultérieurement. Quelques résultats communs sont également mis en avant.

#### Procédure globale :

Pendant la session, les participants, assis, portaient un visiocasque *Oculus Rift DK1* et démarraient par une situation de référence (5 minutes) pendant laquelle ils visualisaient une image statique. Puis ils étaient exposés, sans interaction, à un tour virtuel sur des montagnes russes (15 minutes).

La susceptibilité des participants aux malaises était questionnée avant la navigation *via* le MSSQ (MSSQ pre). Pendant le tour virtuel, leur niveau de cybercinétose était évalué toutes les minutes sur une échelle de 1 (pas d'effet) à 10 (sur le point de vomir). Et juste après la navigation, les participants complétaient le MSAQ (MSAQ post), les symptômes étant catégorisés en : gastrointestinal, central, périphérique et sopite. Au niveau physiologique, différentes variables étaient enregistrées sur différents temps (avant, pendant, après), *via* le

système d'acquisition *PowerLab-8s* ou le *Equivital LifeMonitor* : selon les études ECG, fréquence respiratoire, ou conductance de la peau (doigt et front).

### Résultats communs :

La situation de référence choisie n'induit pas de cybercinétose chez les participants, par contre le tour en montagnes russes est, lui, une situation très provocante de cybercinétose, ce qui sera décrit dans toutes les études qui utilisent ce type d'environnement virtuel, et donc de flux visuel.

### Effets du contenu et de la répétition d'expériences (Gavvani *et al.*, 2016) :

Dans leur première étude, les objectifs des auteurs étaient de mieux connaître les symptômes profilant la cybercinétose puis d'établir des marqueurs biologiques objectifs qui pourraient être utilisés pour évaluer et surveiller les nausées pendant la cybercinétose, et enfin d'examiner la question de l'habituation *via* des sessions répétées.

14 participants (6 hommes et 8 femmes, moyenne d'âge 29 ans), sains et sans expérience de la réalité virtuelle, ont été exposés sur 3 jours consécutifs dans des tours dans des montagnes russes, chaque session se déroulant comme décrit dans la procédure globale. Chaque jour, le questionnaire MSAQ était également rempli 1, 2 et 3 h après la session. Les temps de comparaison des variables physiologiques (ECG, fréquence respiratoire et conductance de la peau (doigt et front)) étaient : référence (avant la navigation), première et dernière minutes dans l'expérience virtuelle.

Un seul participant a réussi à tenir les 15 minutes d'exposition pendant les 3 jours. Les autres ont tous abandonné avant les 15 minutes pour cause de cybercinétose, la prédominance des symptômes apparaissant dans l'ordre qui suit : gastrointestinal, sopite, central et enfin périphérique. Les symptômes subjectifs de cybercinétose durent et sont encore présents au bout de 3 heures. Les nausées rapportées diminuent le 3<sup>ème</sup> jour, suggérant que des expositions répétées à la réalité virtuelle peuvent mener à la désensibilisation (*cf.* Figure 49). En parallèle, le temps d'exposition au tour a augmenté significativement le 3<sup>ème</sup> jour, passant d'environ 7 minutes les 2 premiers jours à 12 minutes le dernier jour (*cf.* Figure 50).

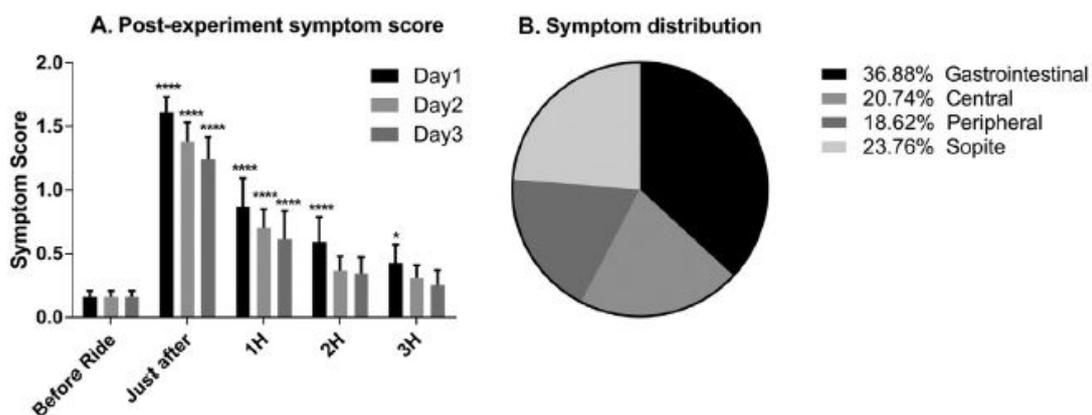
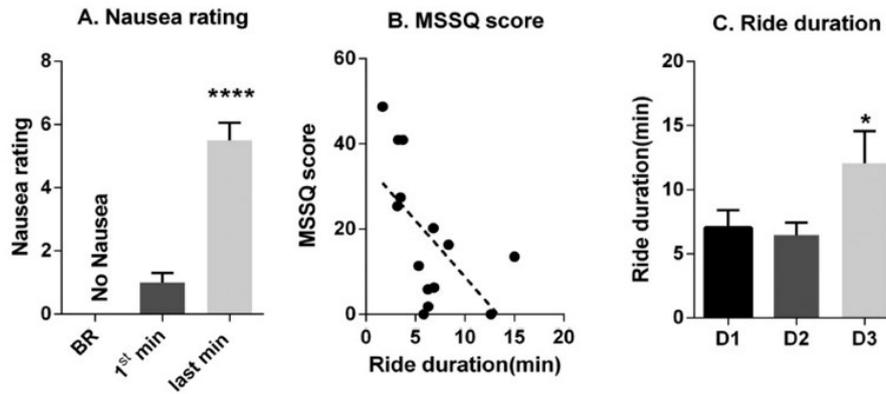


Figure 49 : Symptômes subjectifs de cybercinétose.

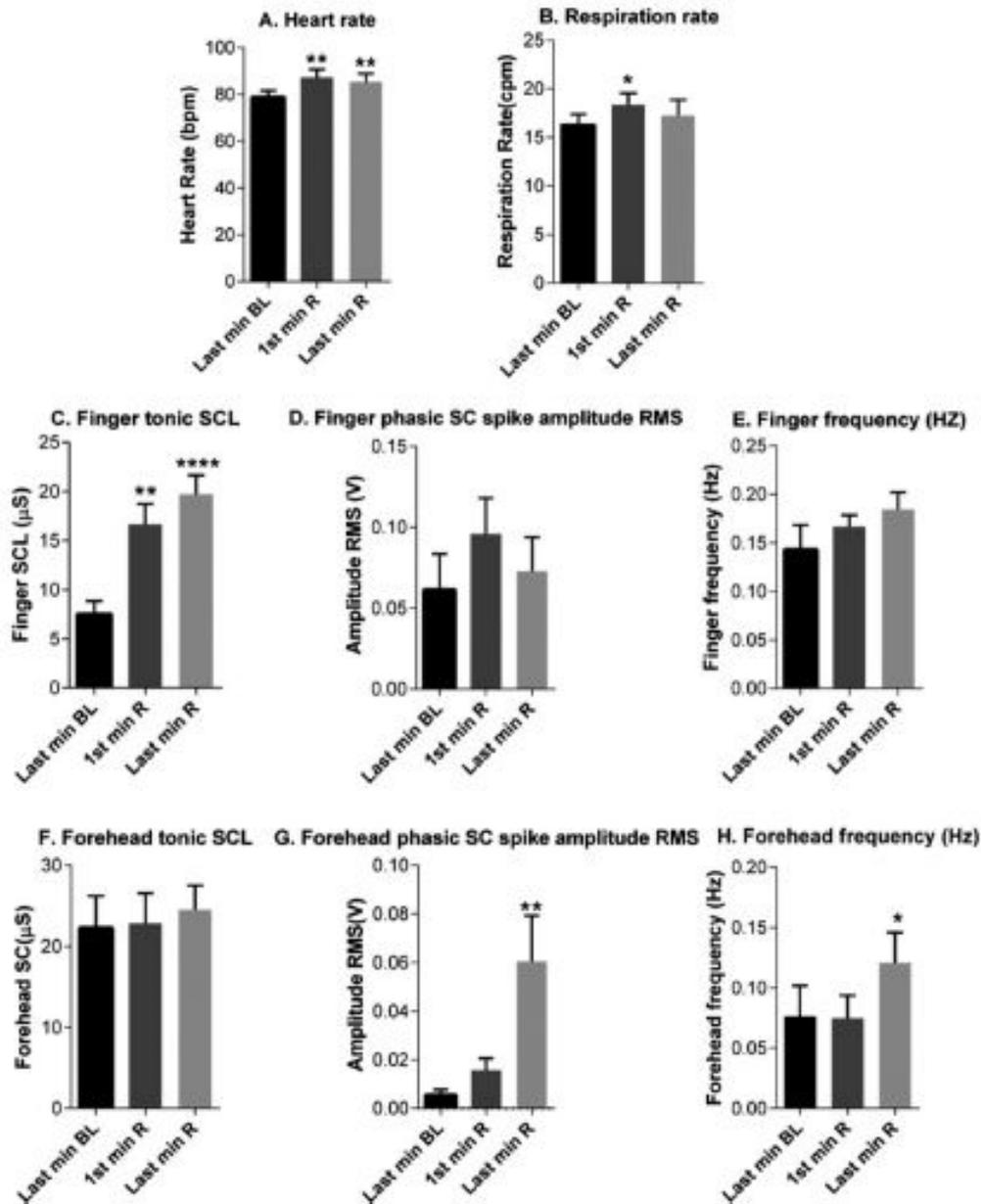
A- Scores pre et post expérimentaux sur 3 jours consécutifs, B- Distribution des symptômes selon 4 catégories le 1<sup>er</sup> jour après le tour en RV (n=14). Source : Gavvani *et al.*, 2016.



**Figure 50 : Taux de nausées, score MSSQ et durée de session.**

A- Taux de nausée moyen pendant l'expérience le jour 1 (BR - avant le trajet), B- Relation entre le score MSSQ et la durée tolérée le jour 1, C- Durée tolérée chaque jour d'expérience; D1, D2 et D3 - 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> jours, respectivement (n=14). Source : Gavgani *et al.*, 2016.

En ce qui concerne les réponses physiologiques, le schéma des effets induits par la réalité virtuelle est complexe, comme en témoigne la Figure 51 ci-dessous. D'une part, l'augmentation de la fréquence cardiaque, de la fréquence respiratoire et de la conductance de la peau du doigt est apparue très peu de temps après le début du tour alors qu'il n'y avait pas de nausée. D'autre part, l'augmentation de la conductance de la peau du front est apparue avec un délai très variable selon les individus, et comme liée à la nausée.



**Figure 51 : Changements des paramètres physiologiques enregistrés au cours de la session de réalité virtuelle le premier jour (n=14).**

Sur chaque graphique, les 3 barres représentent les valeurs des données pour la dernière minute de la période de référence et pour les premières et dernières minutes du tour virtuel. A - Fréquence cardiaque ; B - Fréquence respiratoire ; C - Niveau de conductance cutanée tonique du doigt ; D - Amplitude du pic de conductance cutanée phasique du doigt ; E - Fréquence de pointe de conductance cutanée phasique du doigt ; F - Niveau de conductance cutanée tonique du front ; G - Amplitude du pic de conductance cutanée phasique du front RMS ; H - Fréquence des pics de conductance cutanée phasique du front. Source : Gavvani *et al.*, 2016.

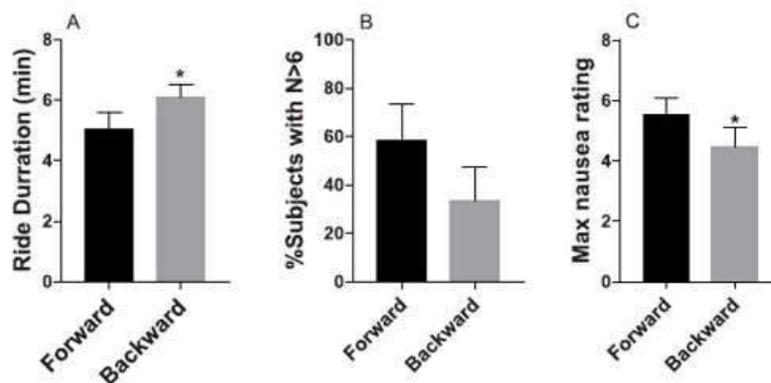
En conclusion, les changements de phase de la conductance cutanée sur le front pourraient être utilisés pour quantifier objectivement les nausées (biomarqueur le plus sensible et le plus spécifique de la nausée dans cette étude). Par ailleurs, l'exposition répétée à un contenu de réalité virtuelle provoquant entraîne une habitude et une diminution des symptômes de cybercinétose. Enfin, une expérience virtuelle avec un visiocasque est capable d'induire des effets indésirables qui perdurent au-delà de 3 heures.

### Effets du flux visuel lié au sens de déplacement (Gavvani *et al.*, 2017) :

Dans la poursuite des travaux précédents, l'objectif des auteurs était ici d'examiner l'impact de la direction du flux visuel (déplacement vers l'avant ou vers l'arrière dans l'univers virtuel) sur les changements physiologiques et la survenue de symptômes de cybercinétose.

Douze participants (6 hommes et 6 femmes, moyenne d'âge 27 ans), sains et sans expérience de la réalité virtuelle, ont été exposés pendant 2 jours consécutifs dans des tours dans des montagnes russes, chaque session se déroulant globalement comme décrit précédemment, si ce n'est que, dans une des sessions, les participants avaient la sensation d'aller vers l'arrière et dans l'autre vers l'avant (comme usuellement), l'ordre des conditions étant contrebalancé entre les participants. Les temps de comparaison des variables physiologiques (ECG et conductance de la peau du front) étaient : référence (avant la navigation) et dernière minute dans l'expérience virtuelle.

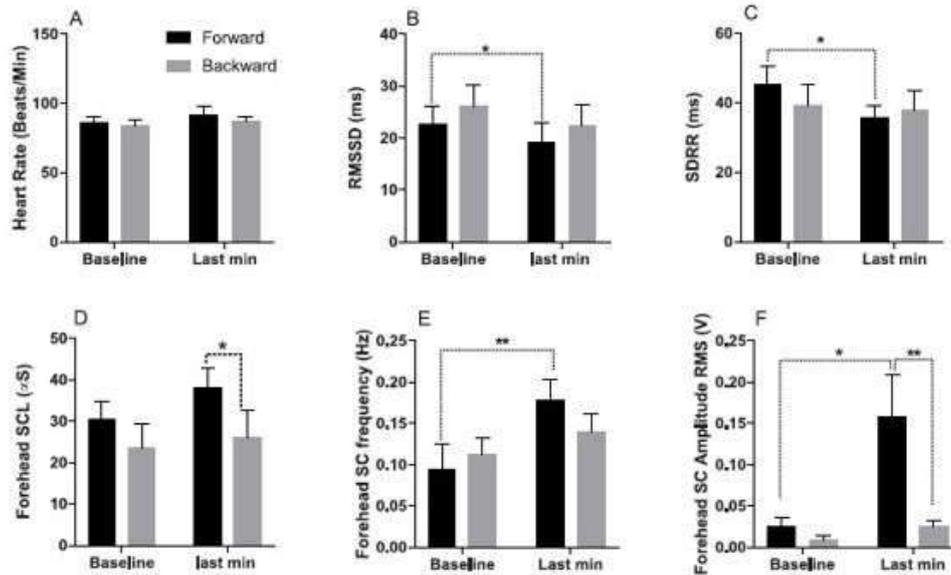
Tous les participants ont dû abandonner avant les 15 minutes pour cause de cybercinétose. En fin d'expérimentation le niveau de nausée était le même quel que soit le sens du mouvement. Par contre, dans la condition « en arrière », les participants ont expérimenté plus longtemps (6,1 minutes *versus* 5,0 minutes), ont ressenti moins de nausées et ont rapporté moins de symptômes de cybercinétose dans le MSAQ post, par rapport à la condition « en avant » (*cf.* Figure 52).



**Figure 52 : Inverser la direction du trajet virtuel prolonge le temps de tolérance et réduit les scores temps réel des nausées.**

A - Durée moyenne des trajets en avant et en arrière ; B - Nombre de sujets rapportant un niveau élevé de nausée ; C - Nausées maximales signalées pendant le trajet (n=12). Source : Gavvani *et al.*, 2017.

L'analyse des indices vagues (SDDR et RMSSD) montre leur diminution significative dans la situation « en avant », alors qu'aucun effet n'est trouvé dans la situation « en arrière ». La situation « en avant » est donc associée à une suppression de la tonalité cardiaque vagale et une augmentation de la nausée. Par ailleurs, l'amplitude des changements phasiques de la conductance cutanée du front augmente significativement dans les deux conditions (avant, arrière), avec une augmentation plus importante dans la situation « en avant ». Les auteurs constatent une augmentation significative avec la nausée de l'amplitude de la conductance cutanée du front et de la fréquence, dans la situation « en avant » (*cf.* Figure 53).



**Figure 53 : Modifications des paramètres physiologiques pendant les trajets virtuels en avant et en arrière.**

Entre la dernière minute de la période de référence et la dernière minute du trajet simulé (n=12).

Source : Gavgani *et al.*, 2017.

En conclusion, la direction du flux visuel dans une expérience virtuelle a un effet significatif sur les effets rapportés de cybercinétose et sur les modifications physiologiques pendant la cybercinétose : se déplacer « en avant » dans un contexte virtuel riche en déplacements est plus provoquant que se déplacer « en arrière ».

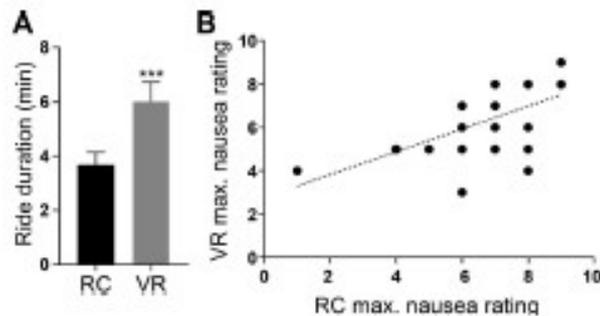
#### Comparaison entre cybercinétose et *Motion Sickness* (Gavgani *et al.*, 2018) :

Dans la littérature scientifique, les travaux qui ont étudié la cybercinétose (induite par le contenu virtuel) et la *Motion Sickness* (MS) (induite par le mouvement physique) sont distincts et ont, par conséquent, concerné des participants différents. Pour éclaircir le lien qui peut exister entre ces deux types de malaises et leur impact sur les signaux physiologiques, Gavgani *et al.* (Gavgani *et al.*, 2018) ont mené cette étude comparative dans laquelle les participants ont été soumis à la fois aux effets des mouvements d'une chaise tournante (force de Coriolis) et à ceux d'une exposition dans un tour virtuel de montagnes russes. Leurs hypothèses de travail étaient que 1) les deux méthodes de provocation susciteront des profils de symptômes similaires et 2) la sensibilité à un type de provocation sera corrélée avec la sensibilité à l'autre.

Trente participants sains (14 hommes et 16 femmes, moyenne d'âge 30 ans) ont été exposés, alternativement et de façon contrebalancée, sur 2 jours séparés au moins d'une semaine, aux deux conditions (chaise tournante et tour virtuel), ce dernier se déroulant comme décrit dans la procédure globale. Dans la condition chaise tournante, les participants, assis sur la chaise, démarraient par une situation de référence (5 minutes), chaise immobile et yeux fermés. Puis ils étaient exposés, yeux bandés, aux mouvements de la chaise tournante (15 minutes).

Dans cette étude, le MSAQ a été délivré à deux temps : *Pré* (en tout début de séance, juste après le MSSQ) et *Post* (après l'expérimentation chaque jour). Par ailleurs, l'évaluation verbale des nausées (VRN) a été réalisée toutes les 30 secondes, pendant les expérimentations. La variable physiologique (conductance de la peau du front) était mesurée avant et pendant l'expérience virtuelle, puis analysée selon ses deux composantes phasique et tonique.

Un seul participant a été capable de terminer les deux tests (VR et RC). Tous les autres ont abandonné en raison de nausées. Celles-ci sont apparues en moins d'une minute dans les 2 conditions, avec une corrélation significative. Par ailleurs, ceux qui ont développé le plus tôt la nausée ont montré des niveaux maximum de nausée dans les 2 conditions. Le temps de tolérance s'est avéré significativement plus long dans la condition VR (6 minutes) que dans la condition RC (3,6 minutes), les maxima de nausée en VR étant significativement corrélés aux maxima de nausée en RC (*cf.* Figure 54).

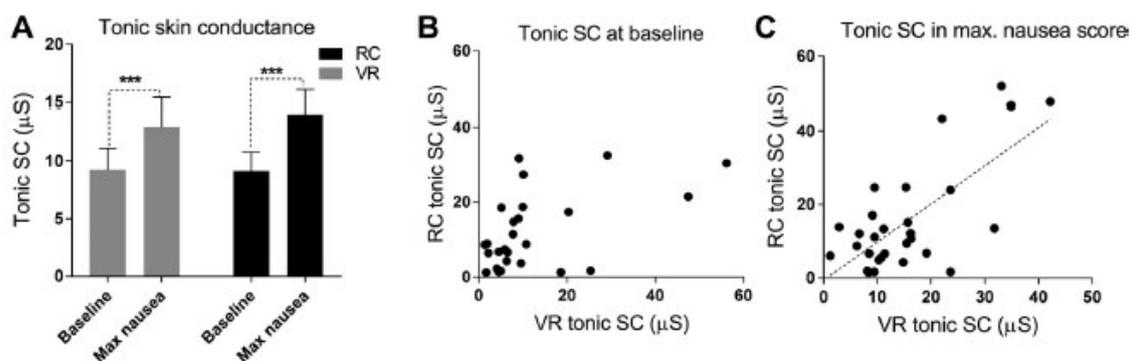


**Figure 54 : temps de tolérance et indice de nausée**

A) Temps de tolérance en réalité virtuelle (VR) par rapport à la chaise rotative (RC). B) Indice de nausée subjectif maximal dans 2 conditions (n = 30). Source : Gavvani *et al.*, 2018.

Le MSAQ *Post* est supérieur au MSAQ *Pré* dans les deux conditions, avec une forte corrélation significative entre les MSAQ *Post* des conditions RC et VR, ainsi que dans les sous catégories.

Au niveau de la variable physiologique, 4 sujets ont été éliminés de l'analyse en raison d'artefacts. La tendance à la hausse de la conductance (tonique et phasique) devient significative au maximum des nausées en comparaison avec la situation de référence. Enfin, il n'y a pas de différence significative entre les 2 conditions aux points : pas de nausée ou nausée maximale (*cf.* Figure 55).



**Figure 55 : Conductance cutanée tonique (SCL) dans la situation de référence (*baseline*) et au point de nausée maximale.**

A) SCL tonique, B) Corrélation de la SCL tonique à la *baseline*, C) Corrélation de la SCL tonique au point de nausée maximale (n = 26). Source : Gavvani *et al.*, 2018.

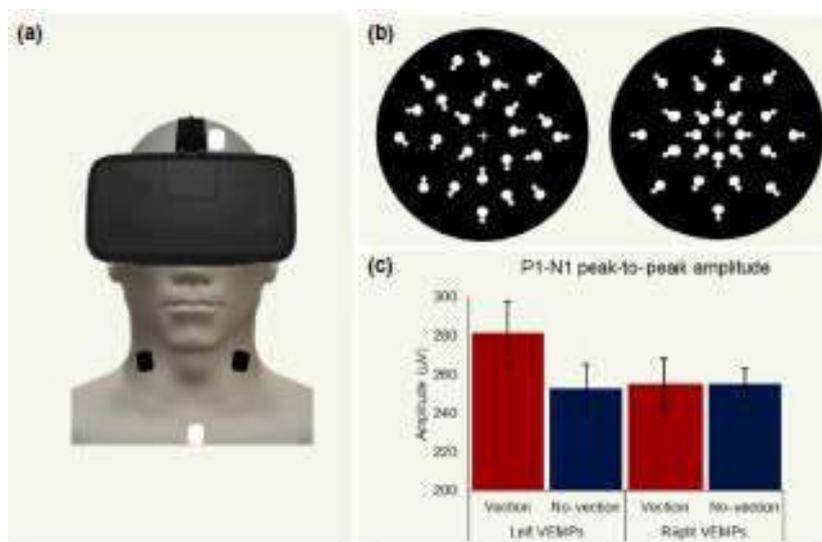
En conclusion, cette étude a mis en lumière trois points principaux. Tout d'abord, les sensibilités aux deux stimulations (mesurées par le délai d'apparition de la nausée) sont corrélées entre les conditions RC et VR. Puis, les deux stimulations ont abouti à l'élaboration de profils de symptômes similaires qui étaient étroitement corrélés au sein des individus. Enfin, l'augmentation de la conductance cutanée du front s'est faite en parallèle de la progression des nausées dans les deux conditions. Par conséquent, les auteurs concluent que les

symptômes et les changements physiologiques survenant au cours de la cybercinétose et du *Motion Sickness* sont assez similaires, au moins aux stades avancés de ces malaises.

### Effets de la vection (flux visuel)

Notre perception de notre propre mouvement dépend d'un ensemble de signaux visuels, proprioceptifs et vestibulaires. En réalité virtuelle, l'utilisateur peut se retrouver dans une situation de conflit sensoriel du fait, par exemple, que la vision lui signale qu'il se déplace dans une certaine direction avec une certaine accélération, alors que le système vestibulaire ne lui fournit aucune information corroborante, puisqu'il n'y a pas de mouvement physique. Pour résoudre ces conflits, les signaux vestibulaires peuvent être pondérés, entraînant une modification de la façon dont le cerveau interprète les informations vestibulaires réelles, et c'est ainsi que des études ont permis de réduire le conflit visuo-vestibulaire en réalité virtuelle.

Dans ce contexte, (Gallagher *et al.*, 2019) ont examiné si les signaux vestibulaires sont modulés par une brève exposition à la vection plein champ en réalité virtuelle. Leur démarche a été de mesurer les réponses réflexes à la stimulation vestibulaire évoquée par le son, après une exposition dans un environnement virtuel suscitant une illusion de vection linéaire. Ces réponses sont les « potentiels évoqués vestibulaires myogéniques » (VEMP en anglais), qui sont mesurés grâce à des électrodes placées sur les muscles sterno-cléido-mastoïdien droite et gauche (*cf.* Figure 56a). L'amplitude des VEMP dépend de l'activation des muscles. Les ratios d'asymétrie ont été calculés : une valeur négative indique des amplitudes plus grandes sur le muscle gauche, alors qu'une valeur positive indique des amplitudes plus grandes sur le muscle droit.



**Figure 56 : Système expérimental et résultats.**

a) Système VEMP. b) Stimuli RV. c) Amplitudes VEMP selon les conditions de vection (n = 24).

Source : Gallagher *et al.*, 2019.

Vingt-quatre jeunes participants sains (7 hommes et 17 femmes, moyenne d'âge 21 ans) ont été exposés, *via* le visiocasque *Oculus Rift DK2*, à l'observation plein champ d'un motif de points blancs en mouvement sur un fond noir (*cf.* Figure 56b) selon deux conditions : sans vection (à gauche, les points bougeaient de façon aléatoire) et vection (à droite, les points

formaient un flux en expansion, provoquant une sensation d'accélération linéaire). Les stimuli sonores étaient délivrés par un casque audio *Sennheiser HDA 280*.

Le protocole, inédit, s'est déroulé comme suit : 1) après un MSSQ *Pré* ; 2) exposition aux stimuli visuels en décubitus dorsal détendu (1 minute) avec randomisation des conditions (vection ou sans vection) ; 3) rotation de la tête pour mesurer les VEMP avec randomisation du côté pour mesure (gauche ou droite). Un repos de 3 minutes était assuré entre chaque condition d'exposition (pour repos des muscles) et la collecte des réponses verbales sur les sensations de mouvement a été réalisée pendant exposition RV.

L'effet vection a été ressenti par 22 participants sur 24 qui ont rapporté une expérience de mouvement propre dans la condition avec vection (3 sur 24 ont parlé de sensations de mouvement dans la condition sans vection). Les résultats montrent des changements dans le ratio d'asymétrie : une augmentation significative de l'amplitude du VEMP gauche apparaît après une minute d'exposition dans la condition avec vection en comparaison à la condition sans vection (cf. Figure 56c). Aucune corrélation significative n'a été retrouvée entre l'amplitude des VEMP et la susceptibilité à la MS, évaluée par le MSSQ.

En conclusion, les auteurs indiquent que le processus vestibulaire est rapidement altéré pendant la vection en réalité virtuelle. Il y a repondération dynamique des indices vestibulaires, seulement après une exposition d'1 minute, et sans la perception consciente de l'utilisateur. Tout ceci peut expliquer l'adaptation et les post-effets de l'exposition à la réalité virtuelle.

### **Effets de la stéréoscopie**

Ling *et al.* (Ling *et al.*, 2012) ont monté leur étude dans le contexte du traitement des troubles de l'anxiété par la thérapie d'exposition assistée par la réalité virtuelle, *VRET* en anglais, et plus particulièrement de la peur de parler en public, qui est une des composantes de la phobie sociale. Dans ce type de thérapie, dans un souci d'efficacité, un compromis doit être trouvé entre présence, anxiété et cybercinétose. Etant donné que la *VRET* est majoritairement délivrée *via* un visiocasque, les auteurs se sont interrogés sur l'impact de la stéréoscopie sur ces trois composantes.

Quatre-vingt-six participants sains (probablement 52 hommes et 34 femmes, âgés de 18 à 70 ans, moyenne d'âge 28 ans) ont été recrutés dans l'université technologique de Delft. Ils ont porté un visiocasque *eMagin Z800* (FOV : 40° Diag, 800 x 600 pixels, 60 Hz) ; les mouvements de leur tête ont été suivis (60 Hz) et des sons leur ont été fournis par des hauts parleurs. Alors que la situation de référence était un environnement neutre, sans stéréoscopie, la situation d'exposition était une prise de parole devant un public virtuel avec attitude variable (positive, neutre, négative) dans deux conditions (avec ou sans stéréoscopie). Les participants avaient la possibilité de naviguer avec les flèches du clavier.

En début de séance, il leur était délivré notamment le SSQ et le test de la vision stéréoscopique (TNO). Ils étaient ensuite exposés à la situation neutre (7 minutes), puis aux situations d'exposition avec stéréoscopie (5 minutes) et sans stéréoscopie (5 minutes), l'ordre étant déterminé de façon aléatoire. Le SSQ a été délivré après chacune de ces trois situations.

Au niveau physiologique, la fréquence cardiaque a été mesurée depuis la situation de référence jusqu'à la fin de la session (*via* *Mobi8 system TMSi*). En raison des problèmes techniques la fréquence cardiaque n'a été récoltée que sur 60 sujets. Les auteurs notent son augmentation significative dans les situations « parler en public », mais pas de différence significative entre les deux conditions (avec et sans stéréoscopie). Ils ne notent pas non plus d'effet de la stéréoscopie sur l'évaluation de la cybercinétose *via* le SSQ. Ayant également évalué l'anxiété et la présence, ils ne rapportent pas non plus d'importance de la stéréoscopie dans la *VRET*. Ils n'ont pas étudié le lien entre cybercinétose et fréquence cardiaque.

Cette étude a été conservée pour l'analyse, car elle concernait un nombre intéressant de participants et qu'elle étudiait à la fois fréquence cardiaque, cybercinétose et stéréoscopie. Toutefois, elle présente un certain nombre de limites : l'échantillon est décalé par rapport à la VRET et à la phobie sociale, puisqu'il s'agit de sujets sains ; la tâche est peu interactive ; la population et les données sont peu décrites. Il n'est pas certain non plus que le rendu stéréoscopique ait été adapté pour la perception de la profondeur : selon les auteurs, les disparités binoculaires étaient trop faibles pour être vues comme une profondeur stéréoscopique. Son intérêt est de remettre en question la pertinence pratique du rendu stéréoscopique dans les visiocasques à suivi de mouvement pour la VRET dans le domaine de la prise de parole en public.

### **Comparaison des effets entre écran et visiocasque**

Les objectifs de Dennison *et al.* (Dennison *et al.*, 2016) étaient multiples : comparer les effets des conditions de visualisation sur la cybercinétose et les variables physiologiques ; étudier la prédiction de la cybercinétose à partir de variables physiologiques. Vingt participants sains de plus de 18 ans (14 hommes et 6 femmes), avec une expérience antérieure des jeux vidéo, ont été recrutés. L'expérience virtuelle consistait à naviguer librement dans un jeu, *Half Life*, avec le contrôleur de la console Xbox, tout en le visualisant tout d'abord sur un écran (FOV : 60°H 40°V, 1920 x 1280 pixels, 60 Hz) et ensuite, après une pause de 5 minutes, *via* un visiocasque *Oculus Rift DK2* (FOV : 100°H 100°V, 960 x 1080 pixels, 75 Hz). Chaque exposition dans le jeu (prévue pour durer 10 minutes) était précédée d'une situation de référence (2 minutes) pendant laquelle une image statique de l'environnement virtuel était visualisée.

La susceptibilité des participants aux malaises a été questionnée avant la navigation *via* le MSSQ (composantes A et B), et la sévérité de la cybercinétose ressentie a été évaluée *via* le SSQ après la navigation dans chaque condition de visualisation. Une cotation verbale des malaises était réalisée toutes les 2 minutes (de 1 : pas de symptôme à 4 : nausée modérée). Par ailleurs, les signaux physiologiques ont été enregistrés au repos pendant la période de référence (2 minutes), pendant la navigation (10 minutes) puis après pendant un temps de repos (2 minutes) avec le *Biopac MP150* : ECG, EGG, EOG, oxymétrie, fréquence respiratoire, conductance de la peau des doigts.

Onze participants ont dû abandonner (55 %) avant la fin de l'expérience de navigation dans la condition visiocasque : un avant 4 minutes, 5 sur l'intervalle 4 à 6 minutes, puis 5 autres sur l'intervalle 6 à 8 minutes. Les analyses rapportées concernent donc les 9 participants qui ont réussi à tenir pendant les 10 minutes. Il n'y a pas eu d'abandon dans la condition écran.

Un effet significatif de la condition de visualisation et du temps a été rapporté au niveau de la cotation verbale des malaises : plus élevée dans la condition visiocasque que dans la condition écran, augmentant sévèrement avec le temps d'exposition dans la condition visiocasque, mais baissant pendant la période de repos. Par ailleurs, l'évaluation du SSQ *post* était supérieure dans la condition casque (moyenne : 71,81) comparée à la condition écran (moyenne : 8).

En ce qui concerne les variables physiologiques, il est noté un effet de la condition de visualisation. En comparaison avec la condition écran, le visiocasque induit : une tachygastrie supérieure et une bradygastrie inférieure, plus de clignements des yeux, une conductance de la peau plus faible, une fréquence cardiaque plus élevée et une fréquence respiratoire plus faible. Par ailleurs, il existe également un effet temps sur la plupart des variables physiologiques. Plus le temps augmente et plus ces paramètres augmentent : clignement des yeux, conductance de la peau, fréquence cardiaque et fréquence respiratoire. Par contre l'EGC est très variable. Dans cette étude, étaient aussi mesurées les rotations de la tête (*yaw*, *pitch*) qui s'avèrent plus importantes dans la condition visiocasque.

Les auteurs rapportent des corrélations significatives entre certaines variables physiologiques (bradygastrie, clignement des yeux) et des sous scores du SSQ (désorientation, oculomoteur),

mais également entre le MSSQA (subjectivité aux malaises liée à l'enfance) et le score SSQ oculomoteur, ainsi que la sortie précoce de l'expérience virtuelle. En accord avec leur second objectif, ils ont trouvé que les changements dans l'activité gastrique, les clignements des yeux et la respiration pouvaient être utilisés pour estimer les scores du SSQ post-exposition. Enfin, grâce à une analyse discriminante linéaire incluant certaines variables physiologiques ils ont pu prédire le groupe d'appartenance (écran ou visiocasque) des participants avec une précision de 78 %, ce qui illustre la différence d'impact au niveau physiologique de ces deux conditions de visualisation.

En conclusion de cette étude pendant laquelle les participants étaient actifs, les mesures physiologiques diffèrent significativement entre les deux conditions (écran vs visiocasque) et peuvent être utilisées pour estimer la sévérité de la cybercinétose. Mais il est suggéré de les combiner à des mesures non-physiologiques pour évaluer la cybercinétose pendant l'exposition dans une expérience virtuelle. L'activation du système nerveux autonome est une réponse aux situations inconfortables, notamment causées par le visiocasque.

### **Effets de méthodes respiratoires**

La littérature scientifique montre qu'une augmentation de l'activité du SNP va avoir tendance à diminuer les symptômes de *Motion Sickness* (MS). Par ailleurs, pour augmenter l'activité du SNP, une des techniques est de diminuer la fréquence respiratoire. Des recherches ont ainsi montré que, pour atteindre une activation maximale du SNP, il fallait utiliser la respiration diaphragmatique à un rythme de 3 à 7 respirations par minute. S'appuyant sur les études publiées, Russell *et al.* (Russell *et al.*, 2014) ont ainsi monté un protocole pour étudier, dans une situation d'exposition à la réalité virtuelle, l'impact de la respiration diaphragmatique sur les réponses physiologiques, cognitives et comportementales, ainsi que sur les symptômes de cybercinétose.

Soixante jeunes participants (12 hommes et 48 femmes, moyenne d'âge 19 ans), sains et présentant une sensibilité à la cybercinétose (MMSQ > 15), ont été sélectionnés (le MSSQ moyen de l'échantillon était de 24,37). Ils ont été répartis en deux groupes équivalents en âge : les 31 membres du groupe DBC (6 hommes et 25 femmes) ont été entraînés à pratiquer la respiration diaphragmatique, tandis que les 29 membres de la condition contrôle CC (6 hommes et 23 femmes) avaient pour consigne de rester dans une condition calme. Au début de la séance, le *Self Efficacy Score* (SES) était délivré afin de mesurer leur capacité à reconnaître le mal de mer. Puis une évaluation des valeurs de référence de mesures physiologiques était réalisée (situation de référence *pré*) : fréquence respiratoire (FR), fréquence cardiaque (FC) et variabilité de la fréquence cardiaque (VFC). Après que les explications relatives à chacune des conditions leur aient été données, les participants étaient enfin exposés pendant 10 minutes, *via* un visiocasque (non précisé), à une vidéo présentant une mer très agitée avec des vagues (0,063 Hz). Le MSAQ leur était délivré avant et après la période d'exposition à la réalité virtuelle. Pendant l'exposition, ils ont auto évalué leurs malaises avec le questionnaire *Self Reporting Sickness* (SRS). Enfin, la séance se terminait par un repos de 5 minutes pendant lequel les variables physiologiques continuaient d'être mesurées (situation de référence *post*).

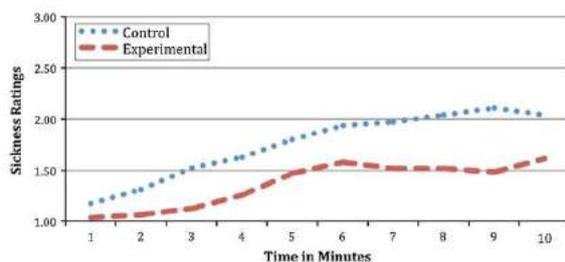
Au niveau des données de la situation de référence *pré*, aucune différence significative n'a été trouvée entre les deux groupes sur les variables âge, MSSQ et SES, et il en a été de même sur les variables physiologiques (par exemple, moyenne FR = 14,9 (DBC) et 13,8 (CC) respirations par minute). Par contre, pendant et après l'expérience en réalité virtuelle, le groupe DBC a montré moins de symptômes de cybercinétose que le groupe CC (*cf.* Figure 57), une fréquence respiratoire significativement plus faible (11,38 versus 16,21) (*cf.* Tableau

10 et Figure 58). Dans le groupe DBC, une corrélation positive significative a été trouvée entre la fréquence respiratoire et l'évaluation des malaises.

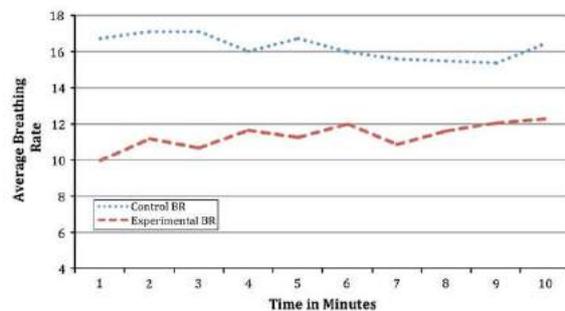
**Tableau 10 : Mesures effectuées (n=60). Self Report Sickness Ratings (SS). Diaphragmatic Breathing (DB).**

Measure	Control condition	DB condition	p value	Mean difference
Respiration rate	16.21 ± 2.77	11.38 ± 3.49	<.001	4.84
RSA <sub>H</sub>	6.38 ± .86	7.46 ± 1.05	<.001	1.08
SS	1.78 ± .63	1.37 ± .44	.005	0.41
MSAQ <sup>a</sup> <sub>post</sub>	2.85 ± 1.72	2.1 ± .91	.043	0.75

Source : Russel *et al.*, 2014.



**Figure 57 : Moyenne des Self Efficacy Scores (de 1 à 4) en fonction des 2 conditions.**



**Figure 58 : Moyenne de la fréquence respiratoire pendant l'expérience RV selon les conditions.**

N=60. Source : Russel *et al.*, 2014

En conclusion, le protocole de respiration diaphragmatique a augmenté le tonus du système nerveux parasympathique, diminué la fréquence de respiration et diminué le développement des symptômes de « *Motion Sickness* » comparé à la condition contrôle. Une respiration diaphragmatique lente offre un moyen de protection contre le « *Motion Sickness* », sans toutefois éliminer la mise en place des symptômes. Ils ne sont que réduits.

Une fréquence de respiration autour de 3 à 7 respirations par minutes semble à préconiser. Un apprentissage des techniques de respiration paraît nécessaire avant d'être soumis à l'expérience virtuelle.

## Conclusion

Les conclusions rapportées ci-dessous se basent sur les résultats de 9 publications étudiées. À noter que dans la majorité des cas les dispositifs utilisés sont peu décrits, notamment concernant le champ visuel. Souvent, seul le nom du dispositif est mentionné. Quel que soit le dispositif visuel utilisé, il n'a pas été rapporté d'inconfort dans les situations de référence choisies (souvent observation d'une image statique sur un temps court, 2 à 10 minutes). La susceptibilité à la cybercinétose est très dépendante du contenu (tour de montagnes russes, flux visuel, ...), du champ visuel sollicité (théâtre, visiocasque). La cybercinétose peut apparaître très rapidement (en moins de 5 minutes).

Au vu des études considérées, certaines variables physiologiques méritent qu'on s'y intéresse :

- en considérant une variable autonome (période cardiaque), des paramètres EEG (T3 puissances delta et beta), et une variable subjective (MSSQ), il est possible de prédire la cybercinétose (Kim *et al.*, 2005) ;
- la cybercinétose est associée à des changements dans la fréquence cardiaque et dans la thermorégulation cutanée ainsi qu'à une augmentation des temps de réaction, ce qui peut être problématique d'un point de vue sécuritaire (Nalivaiko *et al.*, 2015) ;
- les changements de phase de la conductance cutanée sur le front pourraient être utilisés pour quantifier objectivement les nausées (biomarqueur le plus sensible et le plus spécifique de la nausée dans cette étude) (Gavgani *et al.*, 2016). L'augmentation de la conductance cutanée du front se fait en parallèle de la progression des nausées, que l'on soit dans une situation provocante en réalité virtuelle (montagnes russes) ou dans une situation de mouvement réel (chaise tournante) (Gavgani *et al.*, 2018) ;
- la tonalité cardiaque vagale est impactée (tendance à être supprimée) par la navigation « en avant » dans un univers virtuel. L'amplitude des changements phasiques de la conductance cutanée du front augmente significativement quel que soit le sens de déplacement (avant, arrière), avec une augmentation plus importante dans la situation « en avant » (Gavgani *et al.*, 2017) ;
- le processus vestibulaire est rapidement altéré pendant la vection en réalité virtuelle. Il y a repondération dynamique des indices vestibulaires, seulement après une exposition d'1 minute, et sans la perception consciente de l'utilisateur (Gallagher *et al.*, 2019) ;
- les mesures physiologiques diffèrent significativement entre les conditions écran et visiocasque (Dennison *et al.*, 2016). Finalement, sur 9 participants, le visiocasque induit une tachygastrie supérieure et une bradygastrie inférieure, plus de clignements des yeux, une conductance de la peau plus faible, une fréquence cardiaque plus élevée et une fréquence respiratoire plus faible. Plus le temps passe et plus ces effets augmentent ;
- l'ajout de la stéréoscopie dans une situation « parler en public » n'a pas d'impact sur la fréquence cardiaque (Ling *et al.*, 2012) ;
- la pratique de la respiration diaphragmatique augmente le tonus du système nerveux parasymphatique et diminue la fréquence de respiration (Russell *et al.*, 2014).

En ce qui concerne le lien entre cybercinétose et physiologie, voici ce qu'il est possible de conclure :

- les expériences de réalité virtuelle induisent des effets sur les systèmes nerveux central et autonome, dans des schémas encore complexes ;
- la combinaison de mesures subjectives et mesures physiologiques permet de prédire la sévérité des symptômes de cybercinétose ressentis lors d'une expérience en réalité virtuelle ;
- les symptômes et les changements physiologiques survenant au cours de la cybercinétose et du MS sont assez similaires, au moins aux stades avancés de ces malaises ;
- une respiration diaphragmatique lente offre un moyen de protection contre le MS, sans toutefois éliminer la mise en place des symptômes. Ils ne sont que réduits. Une fréquence de respiration autour de 3 à 7 respirations par minutes semble à préconiser. Un apprentissage des techniques de respiration paraît nécessaire avant d'être soumis à l'expérience virtuelle.

Ces études indiquent également que :

- l'identification des éléments visuels générateurs de cybercinétose est indispensable pour le bon développement d'applications de réalité virtuelle ;

- se déplacer « en avant » dans un contexte virtuel riche en déplacements est plus provoquant que se déplacer « en arrière » ;
- une expérience virtuelle avec un visiocasque est capable d'induire des effets indésirables qui perdurent au-delà de 3 heures ;
- l'exposition répétée à un contenu de réalité virtuelle provoquant entraîne une habitude et une diminution des symptômes de cybercinétose ;
- la repondération dynamique rapide des indices vestibulaires peut expliquer l'adaptation et les after-effects de l'exposition à la réalité virtuelle ;
- l'activation du système nerveux autonome est une réponse aux situations inconfortables, notamment causées par le visiocasque.

Finalement, en ce qui concerne les variables physiologiques, on constate que leurs conditions de mesure sont souvent éloignées des règles de l'art, c'est-à-dire des conditions de l'examen médical classique, voir l'Annexe 3 pour plus d'informations. Les mesures sont réalisées lorsque la personne est dans la position de son exposition en RV soit au repos (*pré, post*), soit pendant l'exposition. Il en découle qu'elles ne sont pas conduites de manière suffisamment sensible pour comprendre précisément le fonctionnement du système nerveux autonome. Néanmoins, les résultats décrits sont en accord avec les effets antinomiques des systèmes.

### 5.3.5 Effets sur la stabilité posturale

#### 5.3.5.1 Introduction

Les effets de l'exposition à la réalité virtuelle ont été étudiés également au plan de la stabilité posturale. Ces effets ont été mesurés sur les mouvements de tête, de torse ou du centre des pressions, par différents indicateurs (amplitude et/ou variabilité des ajustements posturaux, dynamique des mouvements posturaux, dans l'axe antéropostérieur ou médial-latéral), selon différentes conditions (yeux ouverts ou yeux fermés, avec ou sans le casque, avec ou sans retour visuel – statique –, avec ou sans tâche visuelle « secondaire ») et enfin différents moments par rapport à l'exposition à la réalité virtuelle.

En référence aux deux théories majeures explicatives de la cybercinétose (théorie du conflit sensoriel et théorie de l'instabilité posturale), les indicateurs posturaux ont été mesurés selon deux approches principales :

- des mesures de comparaison avant/pendant ou avant/après l'exposition ; l'objectif de ces comparaisons est de mesurer les conséquences de l'exposition à la réalité virtuelle sur le contrôle postural (complétées d'une mesure de l'intensité de la cybercinétose *via* le questionnaire du SSQ). L'augmentation de l'instabilité posturale n'est ici pas vue comme un facteur explicatif de la survenue de la cybercinétose mais comme un effet délétère en soi de l'exposition à la réalité virtuelle lié à l'existence d'un conflit sensoriel. Les études relevant de cette inscription théorique ont, en règle générale, recherché des corrélations entre les indicateurs du contrôle postural et l'intensité de la cybercinétose (score au SSQ). Ces analyses de corrélation ont pour objectif de tester l'hypothèse selon laquelle les participants ayant les scores les plus élevés au SSQ sont aussi ceux qui sont les plus instables.

- des mesures avant ou au cours de l'exposition à la réalité virtuelle dans le but de mettre en évidence des modifications chez certains participants ou des différences entre participants qui seraient explicatives de la survenue de la cybercinétose. Le recours à cette approche s'inscrit systématiquement dans le courant théorique de l'instabilité posturale : la cybercinétose est vue, non pas comme la conséquence d'un conflit sensoriel, mais comme la conséquence de l'incapacité de certains sujets à s'adapter aux nouvelles congruences sensorielles propres à l'expérience en réalité virtuelle. Cela se traduit par le fait que les sujets qui se déclarent malades au cours de l'expérience (réponse « oui » ou « non » à la question : Êtes-vous malade ?) témoignent soit d'un changement de régime dans les *patterns* d'ajustements posturaux au cours de l'exposition (augmentation voire réduction de l'instabilité posturale), soit de différences au plan de la stabilité posturale spontanée mesurée avant

exposition comparativement aux personnes qui ne se déclarent pas malades. Les études relevant de ce courant théorique ont ainsi cherché à démontrer l'existence d'un lien entre le fait de se déclarer malade ou non et les indicateurs posturaux. Elles se sont également attachées à distinguer le fait d'être malade ou non et l'intensité de la cybercinétose mesurée par questionnaire, certains participants qui ne se déclarent pas malades pouvant avoir des scores élevés au SSQ après exposition.

Du corpus d'études jugées pertinentes pour rendre compte des effets de la RV au plan des cybercinétoses, 15 études rapportant des mesures posturales ont été identifiées. Dix ont été retenues pour intégration dans cette partie. Cinq ont été exclues pour des raisons de faiblesse méthodologique (effet d'ordre) ou de manque d'information concernant soit le dispositif expérimental utilisé, soit la procédure expérimentale. À ce corpus initial, deux études publiées récemment ont été jugées pertinentes et de qualité suffisante pour être intégrées au corpus. Un total de 12 références bibliographiques (mais il sera fait mention dans la suite de cette partie de 13 études, une des publications rapportant les résultats de deux expériences différentes) a donc servi de support à la synthèse qui suit.

Selon une approche strictement comptable, 9 études sur 13 montrent un effet de la réalité virtuelle sur le niveau de cybercinétose (1 étude n'a pas réalisé de mesures de la cybercinétose). Neuf études sur 13 montrent un effet de la réalité virtuelle sur le contrôle postural (que ce soit les mouvements du centre de pression, du torse ou de la tête). Huit études montrent un effet de la réalité virtuelle sur le niveau de cybercinétose ainsi que sur le contrôle postural. Une étude montre un effet de la réalité virtuelle sur le niveau de cybercinétose mais pas sur la posture (Dennison & D'Zurma, 2018). Une étude montre un effet de la réalité virtuelle sur la posture mais pas sur la cybercinétose (Sinitski *et al.*, 2018). Deux études ne montrent d'effet significatif de la réalité virtuelle ni sur la cybercinétose ni sur la posture (Aldaba *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2017).



**Figure 59 : Illustration d'un écran semi-cylindrique offrant 180° de champ visuel horizontal placé face à un tapis roulant.**

Repris de Sinitski *et al.*, 2018.

Au plan des dispositifs utilisés, 4 études ont été réalisées avec écran (plasma ou CRT, pour un champ visuel horizontal allant de 60 à 180°) et 9 avec casque de réalité virtuelle (7 avec un casque *Oculus*). Ces études impliquaient également différentes modalités d'interaction, allant de la simple observation d'un flux visuel à la marche sur tapis (*cf.* Figure 59). Lorsque les participants avaient à interagir, il s'agissait de navigation « à pied » dans un environnement plus ou moins ouvert (à l'aide d'une manette de jeu ou sur tapis roulant), de course automobile (contrôle du déplacement par manette), ou encore de mouvements volontaires de la tête. Les études recensées ont d'autre part fait appel à des volontaires sains dont l'âge était en règle générale compris entre 18 et 30 ans, et seulement 4 études ont équilibré leur échantillon entre

hommes et femmes. Deux études en particulier se sont intéressées aux effets de la réalité virtuelle en fonction de l'âge, l'une chez les enfants (Chang *et al.*, 2012) et l'autre chez les personnes âgées (Kim *et al.*, 2017). Enfin, les temps d'exposition à la réalité virtuelle étaient extrêmement variables d'une étude à l'autre : de 30 secondes (répétées plusieurs fois selon le nombre de conditions expérimentales) à 50 minutes consécutives. Ce constat sur les temps d'exposition – qui pourrait fragiliser les conclusions quant au niveau de preuve – est néanmoins à nuancer par le fait que la cybercinétose est observée pour les temps d'exposition les plus courts (quelques secondes).

Compte tenu des deux modes d'usage majoritaires connus de la RV pour des applications domestiques ou ludiques (écran de télévision ou d'ordinateur et casque de réalité virtuelle), il est proposé de présenter une synthèse séparant ces deux formes d'exposition à la réalité virtuelle. Pour chacune, le taux d'abandon, la survenue et l'intensité de la cybercinétose et enfin les indicateurs de la stabilité posturale sont présentés. Le détail des conditions de ces deux formes d'exposition à la réalité virtuelle est donné dans l'Annexe 4.

### 5.3.5.2 Contrôle postural et exposition à la réalité virtuelle au moyen d'écrans

Avec un écran, lorsqu'il s'agit de jouer en continu à un jeu de course sur console (avec manette de jeu), plus d'un participant sur 3 abandonne (Chang *et al.*, 2012 ; Dong *et al.*, 2011). Ce taux dépend néanmoins du fait d'être joueur ou observateur : 9 observateurs sur 13 (69 %) ont arrêté le jeu au bout de 15 min, alors que seulement 2 joueurs sur 13 (15 %) ont arrêté après 26 min (Dong *et al.*, 2011). En ce qui concerne les effets de l'âge, 11 enfants sur 25 (44 %) et 3 adultes sur 24 (12 %) ont interrompu le jeu après 31 minutes en moyenne pour cause de cinétose (Chang *et al.*, 2012). À l'opposé de ces résultats, aucun participant n'abandonne lorsqu'il s'agit d'observer passivement un flux visuel (Palmisano *et al.*, 2018) ou lorsqu'il s'agit de marcher sur un tapis roulant (Sinitski *et al.*, 2018). Ces 4 études ont fait appel à un total de 128 participants, dont 25 ont abandonné (soit 19,5 %).

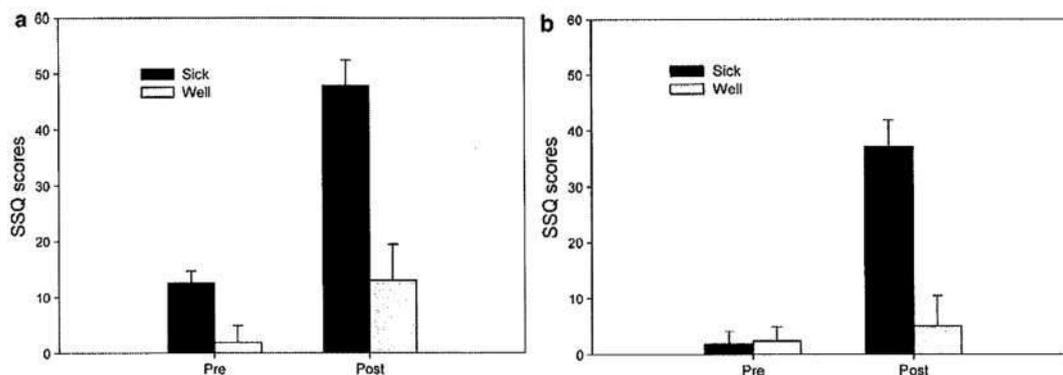
La combinaison de plusieurs facteurs peut être avancée pour expliquer ces résultats diamétralement opposés au plan des abandons, tels que :

- les dimensions de l'écran : les écrans de plus petites dimensions occasionnent des distances à l'écran plus faibles pour un champ visuel donné (60° au minimum dans ces 4 études). Dans les études de Chang *et al.*, (2012) et Dong *et al.*, (2011), les participants se situent respectivement à 43 cm et 1,80 m de l'écran (diagonale de 66 et 165 cm). Dans les études de Palmisano *et al.*, (2018) et Sinitski *et al.*, (2018), ils se situent à 3,50 et 2,50 m des écrans (4 m de largeur et écran semi-cylindrique de 5 m de diamètre).
- la dynamique des images : dans les études de Chang *et al.*, (2012) et Dong *et al.*, (2011), les participants jouaient à un jeu de voiture dans un mode course. On peut donc imaginer, bien qu'aucune indication ne soit donnée à ce sujet, que la dynamique des images était élevée. Dans les études de Palmisano *et al.*, (2018) et Sinitski *et al.*, (2018), les participants avaient respectivement à observer un flux visuel figurant le déplacement propre fixé à 1,1 m/s et à déambuler sur un sentier forestier en marchant sur un tapis roulant dont la vitesse était fixée à 1,02 m/s. Si Dong *et al.*, (2011) avancent, sur la base de résultats antérieurs (Mehri *et al.*, 2007 ; Stoffregen *et al.*, 2008), que les jeux de course de voiture sont moins nauséogènes que les jeux impliquant de se déplacer à pied, l'absence d'abandon dans les études de Palmisano *et al.*, (2018) et Sinitski *et al.*, (2018) va à l'encontre de cette supposition. Cependant, i) aucune comparaison contrôlée entre ces deux modalités d'exposition n'a encore été réalisée, et ii) les mouvements de tête dans les deux études citées ci-dessus n'ont pas été pris en compte, condition pouvant réduire le niveau d'inconfort (dans les jeux impliquant la locomotion, les joueurs contrôlent l'orientation du point de vue, que l'on peut assimiler à l'orientation de la tête).

Les données disponibles quant à la survenue et l'intensité de la cybercinétose amènent néanmoins à moduler la lecture des taux d'abandon.

Dans l'étude de Dong *et al.*, (2011), 11 participants sur 26 se sont déclarés malades (42 %), dont 9 observateurs et 2 joueurs. Les participants qui se sont déclarés malades ont donc tous abandonné la session de jeu. Le fait de se déclarer malade s'accompagne d'autre part de scores particulièrement élevés au SSQ (score moyen de 175, le score maximum étant 235), qui diffèrent significativement des scores des participants qui ne sont pas malades.

Dans l'étude de Chang *et al.*, (2012), si davantage d'enfants stoppent leur participation, la probabilité d'apparition de la cybercinétose ne diffère pas entre enfants et adultes (14 enfants sur 25, soit 56 %, et 16 adultes sur 24, soit 67 %). À noter que, chez les enfants seulement, la probabilité d'apparition de la cybercinétose est plus élevée chez les filles (77 %) que chez les garçons (33 %). Ici également, le fait de se déclarer malade s'accompagne de scores élevés au SSQ (score moyen de 45) et ces scores ne sont pas statistiquement différents entre enfants et adultes (*cf.* Figure 60 ci-dessous pour illustration).

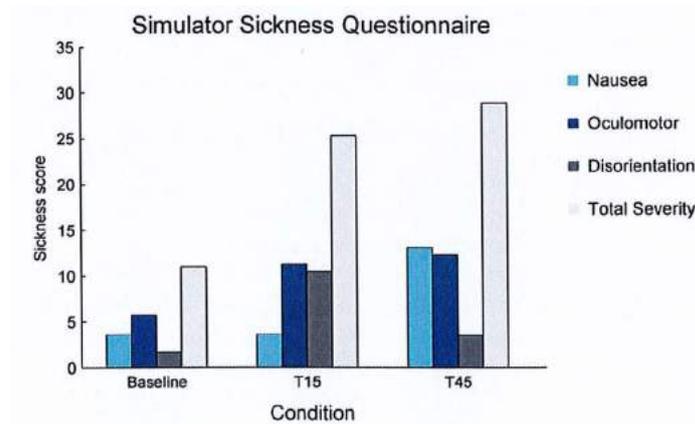


**Figure 60 : Scores au SSQ pour les adultes (à gauche) et les enfants de 11 ans (à droite).**

Avant et après exposition à un jeu de course sur console, selon que les participants se déclarent malades (« sick ») ou non (« well »). Illustration tirée de Chang *et al.*, 2012.

Dans l'étude de Palmisano *et al.*, (2018), 12 participants sur 23 (52 %) se sont déclarés malades, pour des intensités globalement modestes (score de 7 au maximum à la *Fast Motion Sickness Scale* de Keshavarz & Hecht, 2011, allant de 0 à 20). Aucune indication n'est donnée quant à la répartition de cet effectif selon les conditions expérimentales (observation d'un flux visuel radial ou oscillant). Les auteurs ont cependant rapporté une augmentation de l'intensité de la cybercinétose avec la répétition des essais, quelle que soit la nature du flux visuel.

Alors que ces trois études rapportent une probabilité élevée de survenue de la cybercinétose (42, 61 et 52 %, respectivement) ainsi que des intensités allant de modestes à élevées, l'étude de Sinitski *et al.*, (2018) – qui a mesuré l'intensité de la cybercinétose au moyen du questionnaire SSQ à T0, T+15 et T+45 – révèle quant à elle que l'intensité de la cybercinétose augmente avec le temps d'exposition (*cf.* Figure 61), mais que cette augmentation n'est pas statistiquement significative. Le score moyen était de 11 avant exposition (max = 80), 25 à 15 min (max = 225) et 29 à 45 min (max = 120). Les auteurs ont de plus montré que le score au SSQ était ramené à 13 à T+45 après contrôle des items fatigue et sudation, suggérant ainsi que l'augmentation du score au SSQ serait liée à la tâche de marche elle-même plutôt qu'à l'exposition au dispositif.



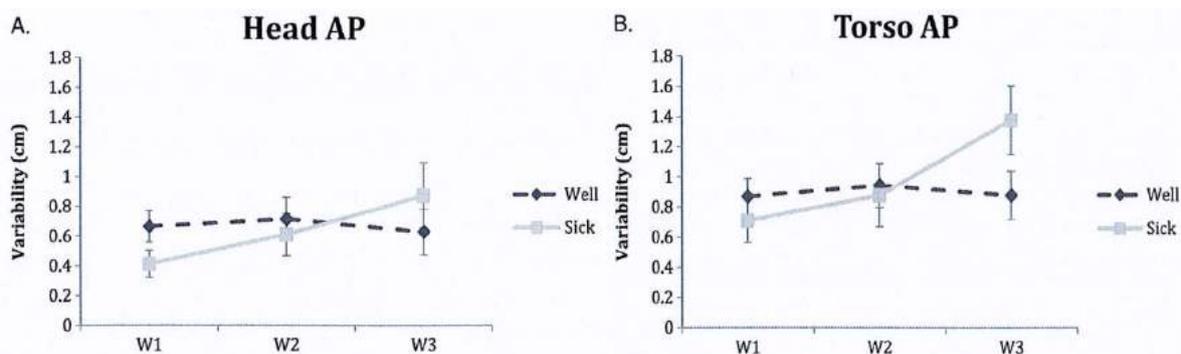
**Figure 61 : Score moyen aux trois sous-échelles (nausée, oculomoteur, désorientation) et score total au SSQ.**

À T0, T+15 et T+45 lors d'une tâche de marche sur tapis roulant. Source : Sinitski *et al.*, 2018.

L'absence d'abandon et l'intensité faible de la cybercinétose lors de la marche sur tapis roulant suggèrent donc que la modalité d'interaction est un facteur important de la survenue et de l'intensité de la cybercinétose.

Indépendamment de la dimension des écrans, de la dynamique des images ou encore du mode d'interaction, ces études s'accordent néanmoins sur le fait que l'exposition à la réalité virtuelle entraîne des effets sur la posture.

En accord avec la théorie de l'instabilité posturale, Dong *et al.*, (2011), Chang *et al.*, (2012) et Palmisano *et al.*, (2018) ont montré que les participants qui se déclarent malades se différencient des participants non malades par rapport aux ajustements posturaux. En particulier, Dong *et al.*, (2011) ont mesuré les mouvements de tête et du torse (les participants étant en position assise) au cours de l'exposition et mis en évidence qu'un changement de régime dans les ajustements posturaux ne s'observait que chez les participants malades (*cf.* Figure 62). Ces ajustements posturaux étaient au contraire stables dans le temps pour les participants ne rapportant pas de cybercinétose.

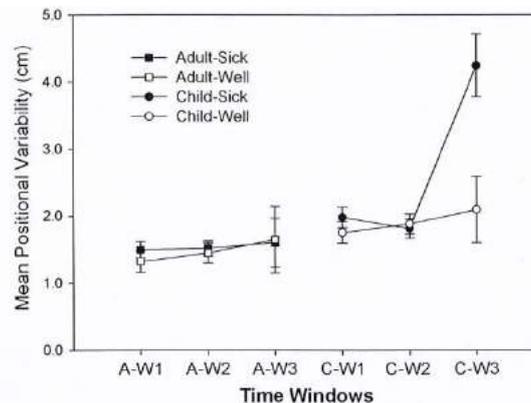


**Figure 62 : Variabilité des mouvements de la tête (à gauche) et du torse (à droite) dans l'axe antéropostérieur (AP).**

Selon que les participants se déclarent malades (« *sick* ») ou non (« *well* »), à trois moments différents d'une session de jeu sur console (W1 : 0-2 min ; W2 : 9-11 min ; W3 : 17-19 min). Source : Dong *et al.*, 2011.

Chang *et al.*, (2012) ont, quant à eux, montré que la variabilité des mouvements de la tête et du torse était significativement supérieure chez les enfants comparativement aux adultes, mais

que cela n'expliquait en rien la survenue de cinétose. Si cette étude n'a pas permis de reproduire le changement de régime dans les ajustements posturaux des participants adultes qui se déclarent malades, tel qu'illustré ci-dessus, elle a néanmoins démontré l'existence de ce changement chez les enfants « malades » (cf. Figure 63 ci-dessous).



**Figure 63 : Variabilité des mouvements de la tête dans l'axe antéropostérieur de participants adultes et enfants.**

Selon qu'ils se déclarent malades (« sick ») ou non (« well »), à trois moments différents d'une session de jeu sur console (W1 : 0-2 min ; W2 : 17-19 min ; W3 : 33-35 min). Source : Chang *et al.*, 2012.

Enfin, Palmisano *et al.*, (2018) ont mesuré l'activité posturale avant l'exposition à la réalité virtuelle et montré que les participants qui se sont par la suite déclarés malades étaient plus instables que les participants non malades. Il est à noter que les mesures posturales n'étaient pas corrélées avec l'intensité de la cybercinétose. Cette méthodologie, si elle ne rend pas compte des effets de la réalité virtuelle sur le contrôle postural, permet de mettre en évidence sans équivoque les liens entre instabilité posturale et survenue de la cybercinétose, l'instabilité observée étant décorrélée de l'exposition à la réalité virtuelle.

Les résultats de Sinitski *et al.*, (2018) laissent au contraire penser que les liens entre cybercinétose et instabilité posturale sont ténus. Cette étude montre d'une part que l'instabilité posturale augmente avec le temps d'exposition, tous les indicateurs posturaux augmentant significativement entre T0 et T+45. Les auteurs ont d'autre part exploré, du fait de la nature de la tâche, le rôle de la fatigue dans ces résultats. Ils ont, pour cela, séparé leur population entre les participants ayant des scores non nuls aux items fatigue et sudation du SSQ et ceux n'ayant ressenti aucun de ces symptômes et montré aucune différence sur les indicateurs posturaux. Ils ont également déterminé si les scores au SSQ pouvaient expliquer l'instabilité posturale à T+45 min et montré que l'effet de l'exposition sur les indicateurs de la posture persistait après contrôle de la cybercinétose. Ces résultats vont donc dans le sens d'une explication selon laquelle les effets sur la posture sont des effets en soi de la réalité virtuelle et ne conditionneraient pas la survenue ni l'intensité de la cybercinétose. Néanmoins, il convient d'être prudent dans cette conclusion, puisque cette étude a été réalisée sur une population de militaires de carrière et a montré des niveaux de cinétose faibles, voire négligeables après contrôle, éléments qui pourraient expliquer l'absence de lien entre instabilité posturale et cybercinétose. Il est, de plus, difficile de déterminer si l'effet observé est attaché spécifiquement à l'exposition à la réalité virtuelle ou s'il provient de la marche sur tapis roulant (il existe par exemple des différences de cinématique entre marche au sol et marche sur tapis).

En synthèse des études ayant examiné le contrôle de l'équilibre lors de l'exposition, par le biais d'écrans, à la réalité virtuelle, les points principaux à retenir sont :

- les participants dont le contrôle postural se dégrade au cours de l'exposition à un jeu vidéo sont aussi ceux qui se déclarent malades et mettent fin à l'expérience (Chang *et al.*, 2012 ; Dong *et al.*, 2011) ;
- cette dégradation a été observée aussi bien chez les adultes (Dong *et al.*, 2011) que chez les enfants (Chang *et al.*, 2012) ;
- afin de désambiguïser les effets de l'exposition de ceux de la cinétose sur le contrôle postural, Palmisano *et al.*, (2018) ont mesuré l'activité posturale avant l'exposition à la réalité virtuelle et reproduit la relation existant entre instabilité posturale et cybercinétose. Pour ces auteurs, la mesure de l'activité posturale avant exposition peut donc permettre de prédire si une personne sera sujette ou non à la cybercinétose ;
- malgré la métaphore naturelle d'interaction (marche sur tapis roulant), l'exposition à la réalité virtuelle entraîne une augmentation de l'instabilité posturale (Sinitski *et al.*, 2018). Bien que des interrogations persistent quant à un strict effet de l'exposition (effet possiblement dû à la marche sur tapis), cet effet n'est pas lié à la survenue de la cinétose.

En conclusion, les effets de l'exposition à la réalité virtuelle (avec écrans) sur le contrôle postural sont ténus, puisqu'une seule étude s'est intéressée spécifiquement à cette relation (Sinitski *et al.*, 2018). Les autres études se sont attachées à montrer l'existence d'un lien entre exposition à la réalité virtuelle, difficulté à s'adapter aux nouvelles congruences sensorielles et cybercinétose, cette dernière étant une conséquence de l'instabilité posturale observée avant l'exposition ou provoquée par l'exposition.

### 5.3.5.3 Contrôle postural et exposition à la réalité virtuelle au moyen d'un visiocasque

Avec l'utilisation d'un casque de réalité virtuelle (*Oculus Rift CV1* ou *DK2*, sauf 2 études), 5 études parmi les 9 retenues ont mis en évidence une relation entre exposition à la réalité virtuelle et instabilité posturale. Si les modalités d'exposition par lesquelles cette relation est observée sont une nouvelle fois hétérogènes, rendant ainsi difficile l'identification de caractéristiques de ces expositions susceptibles d'être à l'origine des effets néfastes décrits, ces études ont comme point commun d'avoir observé conjointement la survenue de la cybercinétose et un changement dans les ajustements posturaux.

Les 4 autres études retenues ont au contraire montré une absence d'effet sur le contrôle postural. Trois d'entre elles ont pourtant décrit des effets sur l'intensité de la cybercinétose. Il est à noter que la seule étude qui ne démontre pas d'effet, ni sur la cybercinétose ni sur la posture, a exposé les participants à un dispositif impliquant une métaphore de déplacement naturel (Kim *et al.*, 2017).

Au vu de ces études, l'analyse qui suit est centrée sur les travaux ayant mis en évidence des effets néfastes de l'exposition à la réalité virtuelle sur le contrôle postural et, comme dans la partie qui précède, le taux d'abandon, la survenue et l'intensité de la cybercinétose puis les indicateurs de la stabilité posturale sont décrits. Les études qui n'ont pas montré d'effet sur la posture sont ensuite présentées, principalement pour décrire les populations et les dispositifs et contenus utilisés.

### Abandons

Dans leur ensemble, les 9 études retenues ont fait appel à un total de 236 participants, dont 29 ont abandonné (soit 12,3 %). Sur les 5 études qui ont rapporté des effets en lien avec la posture, on relève un taux d'abandon de 15 % en moyenne. Limité aux seules études rapportant des abandons, dont les conditions d'exposition consistent à interagir sur la base de mouvements volontaires de la tête (Munafo *et al.*, 2017, Etude 1) ou à se déplacer dans un environnement ouvert à l'aide d'une manette de jeu (Conradi & Alexander, 2017 ; Munafo *et al.*, 2017, Etude 2), ce taux s'élève à 25 %.

Munafo *et al.*, (2017,) ont exposé, pendant un maximum de 15 minutes consécutives, 36 participants âgés en moyenne de 21 ans (répartis équitablement entre hommes et femmes) au jeu « *Balancer Rift* ». Ce jeu consiste à orienter un plateau, par l'intermédiaire des mouvements de la tête, de façon à déplacer une bille dans un labyrinthe. Six des 36 participants ont abandonné, soit 17 % de l'échantillon (1 homme et 5 femmes), au bout de 6 minutes de jeu. Pour mémoire, le temps avant abandon est de l'ordre d'une vingtaine de minutes lorsqu'il s'agit d'un jeu de course sur écran (Chang *et al.*, 2012 ; Dong *et al.*, 2011).

Dans leur seconde étude, Munafo *et al.* (2017) ont également exposé, pendant 15 minutes, 36 participants âgés en moyenne de 23 ans et répartis équitablement entre hommes et femmes au jeu « *Affected* ». L'objectif pour les participants est de se déplacer, à l'aide d'une manette, dans un ensemble de couloirs et pièces afin de rallier un endroit préalablement identifié. Seize des 36 participants ont abandonné, soit 44 % de l'échantillon (6 hommes et 10 femmes), au bout de 7 min de jeu.

Conradi et Alexander (2017) ont, pour leur part, enregistré 4 abandons (soit 14 %) sur un échantillon de 32 participants (dont 20 hommes, âgés en moyenne de 30 ans), lors de sessions du jeu « *Quake III* » pour lesquelles ils avaient à naviguer à l'aide d'une manette (selon 4 modalités différentes de contrôle des mouvements de translation et de rotation et une exposition limitée à 8 minutes par condition).

Les deux autres études recensées n'ont, au contraire, rapporté aucun abandon pour des conditions d'exposition similaires. Immérgés pendant 1 minute (répétée 5 fois) dans un nuage de points en 3D, les 20 participants (dont 6 hommes, âgés en moyenne de 28 ans) à l'étude de Arcioni *et al.* (2018) avaient à effectuer des mouvements de tête autour de l'axe Z (rotation de la tête vers la gauche et la droite), au rythme de 30 mouvements par minute, selon deux conditions différentes (« écologique », la scène visuelle défilant en sens opposé à la tête et « non écologique », la scène défilant dans le même sens que la rotation de la tête). Dans l'étude de Walker *et al.*, (2010), 24 militaires, âgés de 18 à 25 ans, ont réalisé 20 répétitions en une journée (temps formel d'exposition non renseigné) d'une tâche impliquant de sécuriser 15 pièces différentes en éliminant les ennemis. Les soldats contrôlaient les translations à l'aide d'une manette fixée sur un fusil factice, les rotations étant contrôlés par les mouvements de tête.

### Cybercinétose

Concernant la survenue et l'intensité de la cybercinétose, les résultats de ces études concordent sur le fait que les scores de cybercinétose après l'exposition sont significativement supérieurs aux scores enregistrés avant. Ces scores sont néanmoins extrêmement variables d'une étude à l'autre.

Inscrivant leurs travaux dans le cadre de la théorie de l'instabilité posturale, Munafo *et al.*, (2017) et Arcioni *et al.*, (2018) ont rapporté la probabilité d'occurrence de la cybercinétose (réponse « oui » ou « non » à la question : « Êtes-vous malade ? »), avec respectivement 8 participants sur 36 (2 hommes et 6 femmes), soit 22 % (Munafo *et al.*, 2017, étude 1), 20 participants sur 36 (6 hommes et 14 femmes), soit 56 % (Munafo *et al.*, 2017, étude 2), et enfin 10 participants sur 20 (3 hommes et 7 femmes), soit 50 % (Arcioni *et al.*, (2018). À noter que

3 participants à la seconde étude de Munafo *et al.*, (2017) ont rapporté être malades 24 h après l'exposition.

Les participants ayant complété le questionnaire SSQ avant puis après l'exposition, il est intéressant de noter que si les scores post-exposition sont élevés pour les participants qui se sont déclarés malade, ils le sont également pour les participants qui ne déclarent pas de cybercinétose (si l'on se réfère à la proposition de Kennedy *et al.*, (2003) selon laquelle un score après exposition supérieur à 20 témoigne d'un problème). Dans la première étude de Munafo *et al.*, (2017), les scores post-exposition étaient de 30 pour les hommes qui se sont déclarés malade (SSQ préexposition = 5) comme pour ceux qui ne sont pas déclarés malade (SSQ préexposition = 10). Les femmes qui ne se sont pas déclarées malade avaient quant à elle un score de 25 (SSQ pré-exposition = 5), tandis que les femmes malades avaient un score post-exposition de 90 (SSQ pré-exposition = 20). Dans leur seconde étude, les scores au SSQ passaient de 15 à 35 et de 20 à 110 pour les hommes non malades et malades, et de 15 à 35 et de 20 à 100 pour les femmes non malades et malades. Pour les 10 participants qui se sont déclarés malade dans l'étude de Arcioni *et al.*, (2018), le score moyen au SSQ après exposition était de 35, contre 17 pour les participants qui ne se sont pas déclarés malades. Arcioni *et al.*, (2018) ont complété ces données de cybercinétose en montrant que des facteurs tels que l'âge, la taille, le poids, l'acuité visuelle ou encore la distance inter-pupillaire n'étaient pas en mesure d'expliquer les différences de l'intensité de la cybercinétose observées. Enfin, les scores au SSQ ne différaient pas non plus entre les conditions dites écologique et non-écologique, invalidant par la même l'hypothèse du conflit sensoriel (selon cette hypothèse, l'intensité de la cybercinétose aurait dû être plus élevée dans la condition non-écologique).

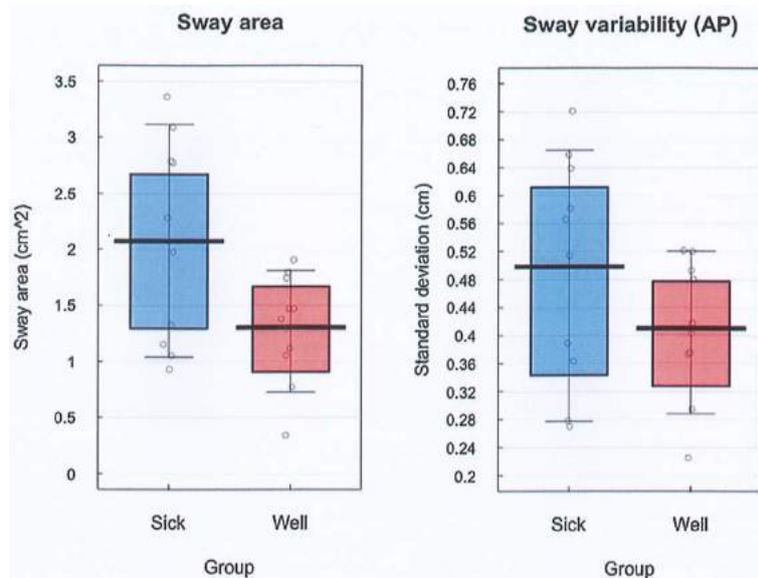
Conradi et Alexander (2017) ont également mesuré l'intensité de la cybercinétose au moyen du SSQ passé avant, tout de suite après et 1 h après l'exposition à la réalité virtuelle. L'analyse des données a révélé une absence d'effet de la modalité d'interaction mais un effet significatif de l'exposition, la cybercinétose après exposition étant néanmoins d'intensité faible (7,4). Si chaque participant a ressenti des symptômes de cybercinétose pour au moins une des expositions (SSQ<sub>min</sub> = 3,74), certains participants ont ressenti des symptômes d'intensité élevée (SSQ<sub>max</sub> = 82,3). Pour les participants qui ont abandonné, le score au SSQ culminait à 116. L'analyse a également révélé que le score au SSQ 1 h après l'exposition était significativement moins élevé pour les sessions 3 à 5 que pour les sessions 1 et 2, suggérant une forme d'habituation, dont l'origine exacte n'est pas discutée mais que l'on peut attribuer au dispositif et à ses effets nauséogènes.

Walker *et al.*, (2010) ont exploité différemment les scores au SSQ (qui a, pour mémoire, été complété avant puis après les essais 1, 4, 8, 12, 16 et 20). Reprenant la catégorisation de la sévérité de la cybercinétose de Kennedy *et al.*, (2003), ils ont utilisé le score maximum au SSQ observé sur l'ensemble des répétitions pour classer les participants selon l'intensité rapportée. Six participants avaient une intensité faible (SSQ < 10), 4 une intensité moyenne (10 < SSQ < 20) et 14 une intensité élevée (SSQ > 20).

### Contrôle postural

En ce qui concerne la relation entre exposition à la réalité virtuelle et contrôle postural, les travaux s'inscrivant dans le cadre de la théorie de l'instabilité posturale sont d'abord présentés. La raison principale tient au fait que ces études ont mesuré les indicateurs posturaux avant l'exposition. Elles ne mesurent donc pas à proprement parlé les effets de l'exposition sur la posture mais s'attachent à montrer que les participants malades se différencient des participants non malades pour le contrôle postural spontané. À partir des données d'occurrence de la cybercinétose, ces études ont réalisé des analyses comparatives des indicateurs posturaux avant exposition (axes antéropostérieur et médial-latéral) entre le sous-groupe de participants se déclarant malade et le sous-groupe de participants ne rapportant pas de symptômes.

Dans leur première étude, Munafo *et al.*, (2017) ont confirmé que les ajustements posturaux (dans l'axe antéropostérieur) se différencient entre les sujets malades et non-malades. Dans la seconde étude, l'analyse a également mis en évidence des effets sur l'axe antéro-postérieur, avec notamment une plus grande variabilité des mouvements du centre des pressions chez les participants se déclarant malades au cours de l'exposition. Les résultats ont de plus montré des paramètres d'ajustements posturaux différents selon le sexe et le statut. Alors que les mouvements du centre des pressions sont plus variables chez les hommes malades comparativement aux non-malades, le *pattern* inverse est observé chez les femmes. Ce résultat a amené les auteurs à qualifier les casques de réalité virtuelle de « sexistes » dans les effets qu'ils provoquent. Arcioni *et al.*, (2019) ont rapporté des résultats similaires pour différentes mesures relatives au centre des pressions réalisées en condition yeux ouverts. Pour les participants se déclarant malade, l'aire totale de mouvement du centre des pressions et la variabilité de ces mouvements dans l'axe antéro-postérieur étaient supérieures comparativement aux participants qui n'étaient pas sujet à la cybercinétose (cf. Figure 64). Les auteurs ont de plus réalisé une analyse de corrélation pour déterminer si les différences individuelles dans l'instabilité posturale spontanée étaient liées à l'intensité de la cybercinétose. Cette analyse a révélé que seule la variabilité des mouvements du centre des pressions dans l'axe antéropostérieur était significativement corrélée aux scores totaux au SSQ mais que cette corrélation était faible ( $R^2 = 0,14$ ).



**Figure 64 : Aire de mouvement (à gauche) et variabilité des mouvements (à droite) dans l'axe antéropostérieur de participants adultes.**

Selon qu'ils se déclarent malades (« sick ») ou non (« well »). Source : Arcioni *et al.*, 2019.

Ces résultats sont complétés par ceux de Dennison et D'Zurma (Dennison *et al.*, 2017). Dans cette étude, 15 participants (dont 4 femmes) étaient équipés d'un casque de réalité virtuelle et exposés, en position assise puis debout, à un flux visuel en rotation (animé de différentes vitesses dans les 2 directions) pendant 30 secondes (pour un temps total cumulé de 48 minutes).

Avant et pendant l'exposition, les mouvements de tête et du centre des pressions (axes antéropostérieur et médial-latéral) étaient enregistrés. Après chaque essai, les participants devaient indiquer leur perception de la verticale (en réglant l'orientation d'une flèche toujours équipés du casque). Cette étude a confirmé les effets bien établis de la direction et de la vitesse de rotation d'un flux visuel circulaire. Les résultats n'ont par contre pas révélé de différence entre les conditions assis et debout sur l'intensité de la cybercinétose ni sur la

verticale subjective (ni d'association entre ces deux variables). Concernant la posture, il n'a pas été observé de différences significatives entre les mesures réalisées avant et pendant l'exposition. Ce résultat va donc dans le sens d'une absence d'effet de la réalité virtuelle sur le contrôle postural. Dennison et D'Zurma (Dennison et D'Zurma, 2017) ont néanmoins classé, sur la base du score médian au SSQ, les participants « confortables » (score inférieur à 18) et les participants « moins confortables » avec la réalité virtuelle (score supérieur à 18) et montré que ces derniers étaient moins instables (axe antéropostérieur). Alors que les auteurs concluent en suggérant que l'instabilité posturale n'est ni un préalable ni un symptôme de la cybercinétose, ce résultat s'accorde pourtant avec la théorie de l'instabilité posturale. Il est néanmoins nécessaire de rappeler que les indicateurs posturaux considérés sont ceux de l'exposition (et non de pré-exposition) et que les participants concernés n'ont pas abandonné et ne se sont pas déclarés malades. Enfin, les auteurs ont évoqué l'idée que les sujets « moins confortables » aient adopté une stratégie visant à minimiser les mouvements pour limiter la survenue d'effets indésirables. Ce dernier point fait écho à l'étude de Walker *et al.*, (Walker *et al.*, 2010).

Les auteurs ont mesuré l'amplitude des mouvements de tête ainsi que le pourcentage de temps passé sans bouger la tête au cours de l'exposition. Ces variables ont fait l'objet, dans un premier temps, d'une analyse de corrélation avec le score au SSQ qui n'a pas révélé de relation significative. Les auteurs ont ensuite comparé ces deux mêmes variables entre les trois groupes de participants selon l'intensité de la cybercinétose. L'analyse sur l'amplitude des mouvements de tête n'a pas révélé de différence entre groupes de sujets, au contraire du temps passé sans bouger la tête. Les participants ayant les scores les plus élevés au SSQ (> 20) ont passé significativement plus de temps sans bouger la tête que les deux autres groupes de participants (*cf.* Figure 65). À noter que dans une situation similaire en réel, les mouvements de tête enregistrés pour 24 autres sujets étaient plus importants et plus fréquents qu'en réalité virtuelle. Une explication potentielle à ces résultats pourrait tenir au champ de vision limité du casque utilisé (60° en diagonal), mais une amplitude de mouvement plus importante aurait dans ce cas due être observée en réalité virtuelle comparativement à la situation réelle. Une autre explication repose sur l'idée que les sujets nauséeux aient limité les mouvements de tête de façon à limiter les effets indésirables de la réalité virtuelle. Cette stratégie semble néanmoins peu fondée, dans la mesure où le temps passé sans bouger la tête n'augmente pas avec la répétition chez les sujets les plus nauséeux. Le lien de causalité n'étant pas établi, d'autres travaux sont nécessaires afin de déterminer si les mouvements de tête diminuent en raison d'une augmentation de la cybercinétose ou si une restriction des mouvements de tête entraîne une augmentation des effets indésirables.

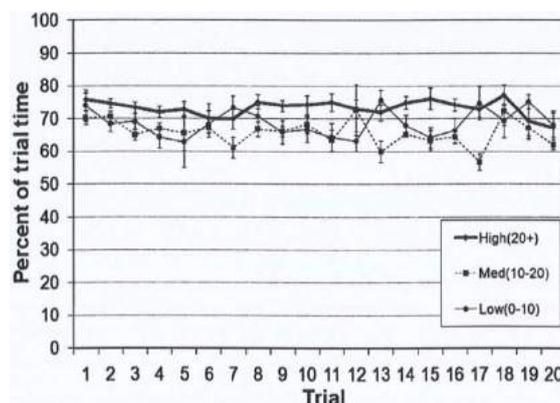
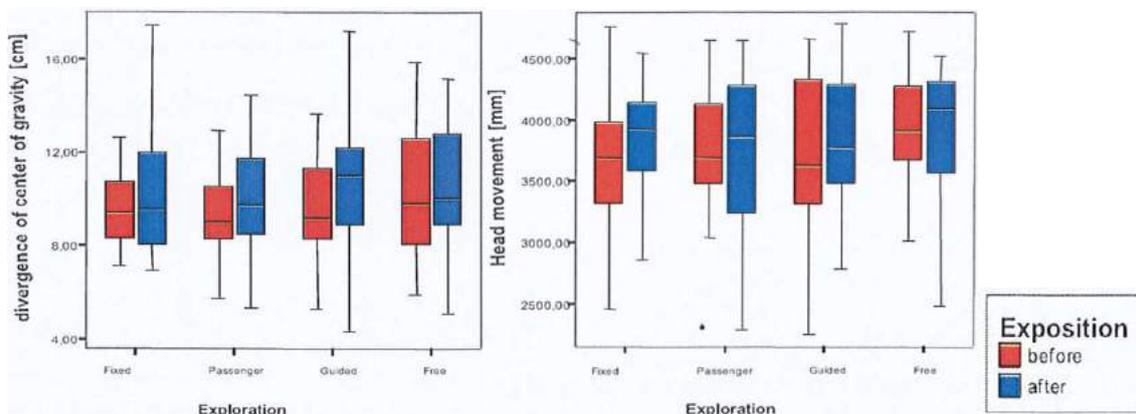


Figure 65 : Pourcentage de temps pendant lequel les sujets ne bougent pas la tête en réalité virtuelle, en fonction de l'intensité de la cybercinétose et de l'essai.

Source : Walker *et al.*, 2010.

Conradi et Alexander (Conradi *et al.*, 2012) ont quant à eux investigué les effets de l'exposition à la réalité virtuelle sur le contrôle de l'équilibre, selon une méthodologie classique de comparaison des indicateurs mesurés avant puis après l'exposition. Les résultats concernant l'intensité de la cybercinétose ont été présentés précédemment. Le contrôle de l'équilibre a été évalué par le biais des déplacements du centre de gravité (test statique) ainsi que des mouvements de tête (test dynamique consistant à marcher sur une distance de 3 m). Les analyses ont révélé un effet principal de l'exposition à la réalité virtuelle sur les déplacements du centre de gravité ainsi que sur l'amplitude des mouvements de tête qui augmentent en post-exposition (*cf.* Figure 66). Pour les auteurs, ces résultats s'accordent avec les effets observés sur l'intensité de la cybercinétose et considèrent l'augmentation de l'instabilité posturale comme une mesure objective de la cybercinétose. La relation entre ces deux manifestations de l'exposition à la réalité virtuelle n'est cependant pas démontrée autrement que par un effet sur ces deux mesures.



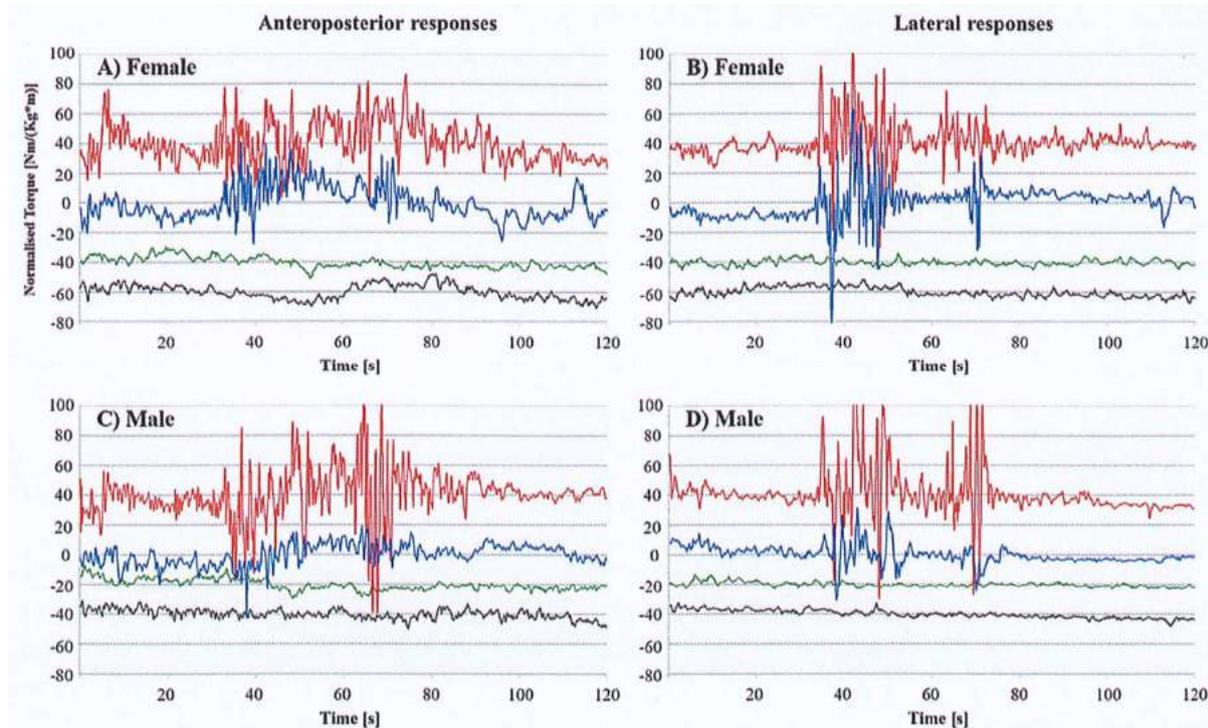
**Figure 66 : Mouvements du centre de gravité (à gauche) et de la tête (à droite) avant et après exposition en fonction de la modalité d'interaction.**

Source : Conradi & Alexander, 2012.

Alors que ces études ont mesuré les effets de la réalité virtuelle sur la posture à différents moments (avant l'exposition uniquement, avant et pendant l'exposition ou avant et après l'exposition), elles se rejoignent sur le fait qu'elles ont procédé à des analyses fines des ajustements posturaux (différence dans l'amplitude des mouvements, de leur variabilité ou de leur dynamique temporelle). Néanmoins, aucune n'a mentionné l'existence de cas limite (perte d'équilibre ou chute). Une explication possible tient aux conditions dans lesquelles les participants ont été exposés à la réalité virtuelle. Dans les études d'Arcioni (Arcioni *et al.*, 2018) et Munafo (Munafo *et al.*, 2017), si la mesure du contrôle postural a été réalisée en condition debout avant exposition, les participants réalisaient l'expérimentation en condition assise, avec, dans certains cas, un dispositif de retenue visant à contrôler l'amplitude des mouvements de tête. Dennison et D'Zurra (Dennison *et al.*, 2017) ont comparé les effets de l'exposition en condition assis puis debout, en l'absence de dispositif de retenue. Dans l'étude de Walker (Walker *et al.*, 2010), les participants étaient sécurisés par un anneau en métal de 1 m de hauteur. Aucune indication n'est mentionnée dans l'étude de Conradi et Alexander (Conradi *et al.*, 2012) quant aux conditions exactes d'exposition. Il ne peut donc pas être écarté que ces conditions particulières (assis, avec retenue) limitent les risques de pertes d'équilibre.

Une étude rapportant ce type d'événements a néanmoins été identifiée. Fransson *et al.*, (Fransson *et al.*, 2019) ont exposé 20 participants (dont 10 femmes ; âge moyen de 27 ans) à une expérience de montagne russe en réalité virtuelle (casque *HTC Vive*), en position debout. Les participants prenaient place sur une plateforme de force afin d'enregistrer la stabilité de leur posture, au repos dans un premier temps (en condition yeux ouverts et yeux fermés) puis

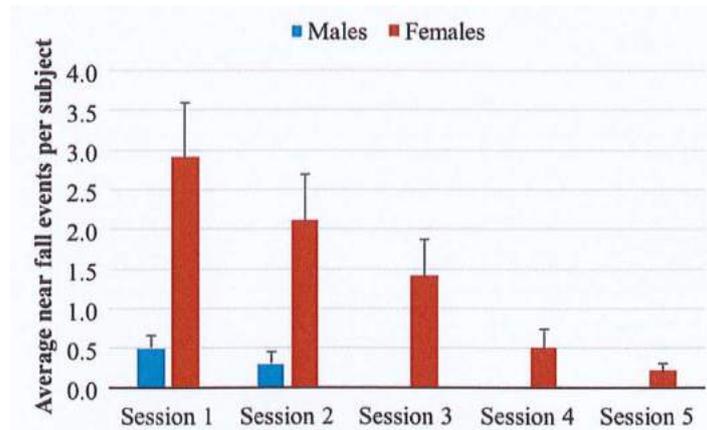
pendant l'exposition (5 répétitions de 90 secondes). Les principaux résultats montrent que la stabilité posturale au repos ne diffère pas entre hommes et femmes (dans les deux conditions de mesure), que l'instabilité posturale augmente lors de l'exposition mais se réduit avec la répétition et que ce soit dans l'axe antéropostérieur ou latéral, chez les hommes comme chez les femmes (cf. Figure 67 ci-dessous).



**Figure 67 : Réponse posturale dans l'axe antéropostérieur (à gauche) et latéral (à droite) pour une femme (en haut) et un homme (en bas).**

Sur chaque graphe sont représentées les réponses posturales lors de la première exposition (rouge), lors de la dernière exposition (bleu), dans la condition contrôle yeux ouverts (vert) et yeux fermés (noir) avant exposition. Les données sont normalisées pour tenir compte des différences de taille et de poids. Source : Fransson *et al.*, 2019.

Les femmes ont cependant davantage d'instabilité par rapport aux hommes et s'adaptent plus lentement à la stimulation. Malgré cela, il n'a pas été observé de différence liée au genre dans la capacité d'adaptation (taux de changement entre la première et dernière exposition). En complément des données posturales, les auteurs ont également rapporté les événements de « presque » chute. Ces événements ont été définis comme les essais au cours desquels les expérimentateurs ont jugé nécessaire de soutenir les participants pour éviter une éventuelle chute. Les résultats (cf. Figure 68) montrent que le nombre moyen de « presque » chute est élevé chez les femmes (3 événements en moyenne par participante lors de la 1<sup>ère</sup> exposition de 90 secondes) et que ce nombre diminue significativement avec la répétition de l'exposition, chez les hommes comme chez les femmes.



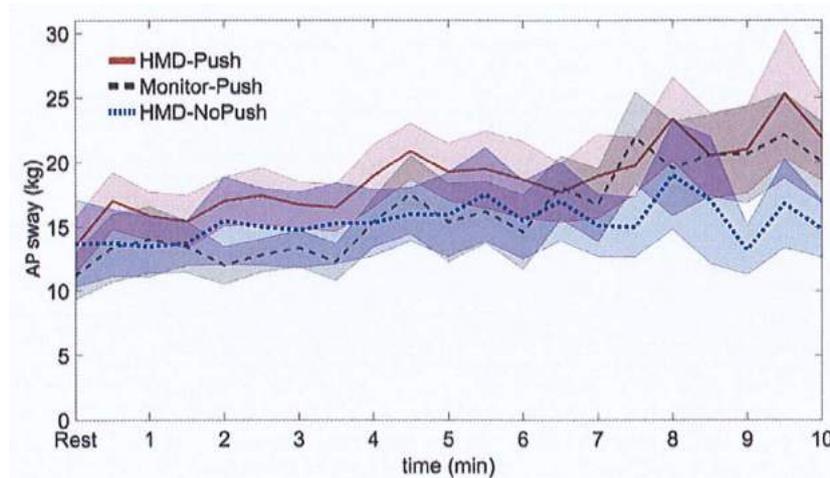
**Figure 68 : Nombre moyen de « presque » chute par participant au cours de chacune des expositions, pour les hommes et les femmes.**

Source : Fransson *et al.*, 2019.

Comme cela a été indiqué précédemment, quatre études parmi celles retenues ont rapporté des effets de l'exposition à la réalité virtuelle sur l'intensité de la cybercinétose, mais pas sur le contrôle postural. Parmi ces travaux, deux études ont procédé à des comparaisons avant vs pendant l'exposition (Dennison & D'Zurma, 2017, 2018), les 2 autres rapportant des comparaisons avant vs après exposition (Aldaba *et al.*, 2017 ; Kim *et al.*, 2017). Avec casque également, lorsque l'interaction repose sur une métaphore naturelle, l'exposition à la réalité virtuelle n'entraîne ni abandon ni cybercinétose (Kim *et al.*, 2017).

Bien qu'elle ne montre pas d'effet principal de l'exposition sur la posture, l'étude de Dennison et D'Zurma (2017) a mis en évidence des différences sur le contrôle postural entre participants dits « confortables » et « moins confortables ». Le choix a donc été fait de présenter ce travail avec ceux rapportant des effets sur la posture.

Dans la seconde étude de Dennison et D'Zurma (2018), 20 participants (dont 5 femmes) ont réalisé une tâche de navigation (avec manette de jeu) dans une station spatiale avec l'objectif de retrouver un maximum de cibles en 10 minutes. Les participants ont été exposés, en position debout, à 3 conditions différentes : avec casque (champ visuel : 100 x 100°) et perturbation visuelle, sur écran (champ visuel : 60 x 40°) avec perturbation visuelle et avec casque sans perturbation visuelle. Les perturbations visuelles, d'une durée de 260 ms, introduites toutes les 2 s, consistaient en un déplacement du point de vue dans les axes antéropostérieur ou médial-latéral ; ces perturbations étaient destinées à provoquer un conflit afin d'en mesurer les effets sur la cybercinétose et la posture. Deux participants ont abandonné prématurément pour cause de cybercinétose sévère. En condition normale d'utilisation (sans perturbation visuelle), les résultats ont montré que la stabilité du contrôle postural avec le casque ne se différenciait pas entre la période de repos, le début ou la toute fin d'exposition (*cf.* Figure 69). Comme attendu, l'intensité de la cybercinétose et l'instabilité posturale en présence de perturbations visuelles étaient plus importantes avec le casque que face à un écran. D'autre part, la cybercinétose était moins élevée face à l'écran en présence de perturbations (SSQ pré/post = 2/13) qu'avec le casque sans perturbations (SSQ post = 3/43). Enfin, il n'a pas été observé de différence dans les réponses posturales entre participants « confortables » et « moins confortables » avec la réalité virtuelle, quelle que soit la condition d'exposition.



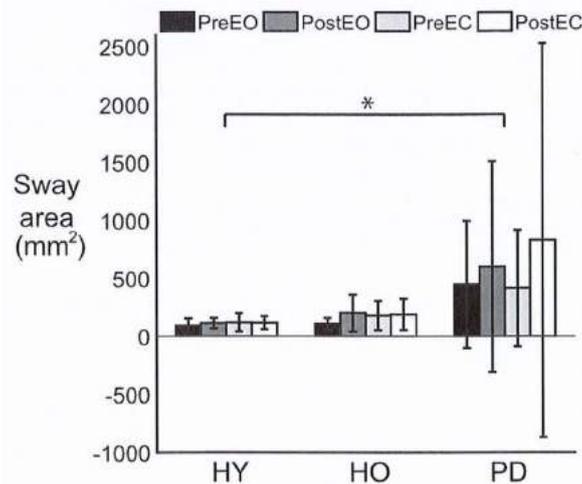
**Figure 69 : Ajustements posturaux.**

Dans l'axe antéropostérieur (variabilité du centre des pressions par période de 30 secondes) au cours des 10 minutes d'exposition pour les conditions casque et perturbation visuelle (« *HMD-Push* »), écran et perturbation visuelle (« *Monitor-Push* ») et casque sans perturbation visuelle (« *HMD-NoPush* »).

Source : Dennison & D'Zurma, 2018.

Aldaba *et al.*, (2017) ont exposé à la réalité virtuelle 20 participants (dont 10 femmes) au moyen d'un visiocasque dans le but de comparer différentes modalités de navigation (chaise pivotante, marche sur tapis omnidirectionnel, fauteuil roulant, manette de jeu en position assise). Les résultats sur la cybercinétose ont été présentés dans la section 5.3.3.1. Comme indiqué à cette occasion, le temps d'exposition n'est pas mentionné et varie d'un participant à un autre, puisqu'il est indexé sur le temps mis pour réaliser la tâche (naviguer dans un bâtiment pour retrouver une pièce qui a été indiquée depuis l'extérieur). Afin d'évaluer les effets de l'exposition sur le contrôle postural, l'amplitude des mouvements du centre des pressions ont été mesurés avant et après le 1<sup>er</sup>, 4<sup>ème</sup> et 8<sup>ème</sup> et dernier essai en condition yeux ouverts et yeux fermés. L'analyse statique n'a pas révélé d'effet de l'exposition ni de la modalité de navigation, quelle que soit la condition (yeux ouverts ou fermés).

Enfin, dans la dernière étude retenue (Kim *et al.*, 2017), 33 participants ont été répartis en 3 groupes : jeunes sains (28 ans, 6 femmes), âgés sains (66 ans, 8 femmes) et âgés parkinsoniens (65 ans, 8 femmes). La tâche consistait à marcher en ligne droite dans un environnement urbain sans obstacle, sur tapis roulant avec visiocasque (*Oculus Rift DK2*), pendant 5 min consécutives répétées 4 fois. La vitesse du tapis roulant était réglée sur la vitesse de marche de chacun des participants, mesurée préalablement (test sur 10 m). Différentes mesures ont été réalisées avant puis après les 20 minutes d'exposition à la réalité. Pour ce qui concerne l'intensité de la cybercinétose et l'amplitude des mouvements du centre des pressions au repos (cf. Figure 70), les analyses n'ont pas révélé d'effet de l'exposition, et ce quel que soit le groupe. Il est néanmoins à noter que la vitesse de marche sur 10 m augmente suite à l'exposition pour les trois groupes de participants. Si la reproduction de cette mesure aurait été intéressante afin de déterminer sa persistance dans le temps, ce résultat est cependant à prendre avec précaution car certains participants (N = 13) ont choisi de réduire la vitesse du tapis roulant. L'analyse comparative de la vitesse de marche n'ayant pas été réalisée séparément pour ces participants, il paraît délicat de généraliser cet effet d'augmentation de la vitesse de marche.



**Figure 70 : Amplitude des mouvements du centre des pressions au repos.**

Mesurée avant (*Pre*) et après (*Post*) l'exposition, en condition yeux ouverts (EO) et yeux fermés (EC), pour les jeunes sains (HY), les âgés sains (HO) et les âgés parkinsoniens (PD). Source : Kim *et al.*, 2017.

#### 5.3.5.4 Conclusion

En synthèse des études ayant examiné les effets de l'exposition à la réalité virtuelle au moyen de visiocasques sur le contrôle de l'équilibre, 9 études ont été retenues, dont 5 mettent en évidence une relation entre exposition et contrôle postural.

Cet ensemble d'études se caractérise par des conditions d'exposition hétérogènes :

- dans les contenus utilisés (nuage de points en 3D, jeux vidéo, environnement urbain, station spatiale, intérieur de bâtiments) ;
- dans les modalités d'interaction (observateur passif, mouvements volontaires de la tête, navigation au moyen d'une manette de jeu ou d'un tapis roulant) ;
- dans les temps d'exposition, allant de courtes expositions (30 secondes à 1 minute 30) répétées, à des expositions sans interruption (5 à 15 minutes). Malgré leur brièveté, ces expositions occasionnent des abandons et s'accompagnent de cybercinétose importante. Aucune étude n'a procédé à des expositions prolongées et répétées dans le temps.

Ces études ont d'autre part approché différemment la relation entre exposition à la réalité virtuelle et contrôle postural, donnant lieu à des méthodes particulières :

- lorsque l'instabilité posturale est envisagée comme une conséquence de l'exposition, les études comparent les indicateurs posturaux avant vs pendant ou avant vs après. Deux études seulement ont mis en évidence une augmentation de l'instabilité posturale pendant (Fransson *et al.*, 2019) ou suite à l'exposition (Conradi & Alexander, 2012). Quatre autres études s'inscrivant dans cette approche n'ont pas confirmé l'existence de cette relation (Aldaba *et al.*, 2017 ; Dennison & D'Zurra, 2017, 2018 ; Kim *et al.*, 2017). Si le contrôle de l'équilibre peut être perturbé du fait d'une exposition à la réalité virtuelle, cet effet n'est cependant pas systématique ;
- lorsque l'instabilité posturale est envisagée comme un marqueur de la cybercinétose, des analyses de corrélation entre les indicateurs posturaux et l'intensité de la cybercinétose (score au SSQ) sont réalisées. Aucune des études retenues n'a démontré de relation robuste entre dynamique posturale spontanée et cybercinétose (Arcioni *et al.*, 2019) ou entre mouvements de tête au cours de l'exposition et cybercinétose (Walker *et al.*, 2010). Si Conradi et Alexander (2012) considèrent

l'augmentation de l'instabilité posturale comme une mesure objective de la cybercinétose, cette relation n'est cependant pas démontrée autrement que par un effet sur ces deux mesures ;

- lorsque l'instabilité posturale spontanée est envisagée comme un prédicteur de la survenue de la cybercinétose, les mesures posturales réalisées avant exposition sont comparées entre les participants selon qu'ils se déclarent malade ou non pendant ou à la fin de l'exposition (réponse à la question « Êtes-vous malade ? »). Les études s'inscrivant dans cette démarche et ce postulat ont confirmé que les participants qui se déclarent malade ont une dynamique de l'équilibre spontanée différente de ceux qui ne se déclarent pas malade (Arcioni *et al.*, 2019 ; Munafo *et al.*, étude 1, 2017 ; Munafo *et al.*, étude 2, 2017).

Plusieurs résultats marquants sont à souligner :

- après une exposition à un nuage de points en rotation, la perception de la verticale subjective n'est pas altérée (Dennison & D'zurma, 2017) ;
- exposés à une simulation de montagne russe reconnue pour être particulièrement provocante, les participants sont capables de stabiliser leur équilibre très rapidement (quelques minutes ; Fransson *et al.*, 2019) ;
- si les femmes sont plus instables en début d'exposition, elles s'adaptent dans la même mesure que les hommes mais ont besoin de plus de temps (Fransson *et al.*, 2019). Elles sont d'autre part plus susceptibles de développer des symptômes nauséogènes que les hommes (Munafo *et al.*, 2017) ;
- rares sont les études qui évoquent non seulement l'instabilité générée par une exposition à la réalité virtuelle mais aussi les conséquences de cette instabilité. Fransson *et al.*, (2019) ont documenté cet aspect en montrant que le nombre de presque chute, face à une stimulation provocante, est élevé en début d'exposition avant de disparaître au bout de quelques minutes ;
- le résultat le mieux documenté est celui issu des travaux s'inscrivant dans le cadre de la théorie de l'instabilité posturale : les participants qui se déclarent malades ont des réponses posturales spontanées (*i.e.*, avant exposition) significativement différentes des autres. Il est ainsi envisageable de prédire, sur la base d'une analyse de la posture, quelle personne sera sujette à la cybercinétose en cas d'exposition à la réalité virtuelle. Il reste néanmoins à identifier quel(s) est(sont) le(s) indicateur(s) pertinent(s) et leur valeur pour qu'une telle prédiction soit fiable ;
- lorsque la métaphore d'interaction avec le dispositif est naturelle (marche sur tapis roulant), il n'est observé ni abandon, ni cybercinétose, ni altération du contrôle de l'équilibre après exposition (Kim *et al.*, 2017). Il n'est pas observé non plus d'effet qui soit lié à l'âge des participants ou à l'existence d'une pathologie (Parkinson). Il est nécessaire néanmoins de rappeler que ces résultats sont liés à une exposition relativement courte (5 min), répétées 4 fois. Pour mémoire, Sinitski *et al.*, (Sinitski *et al.*, 2018) ont montré une augmentation de l'instabilité posturale suite à 30 min consécutive de marche sur tapis roulant face à un écran cylindrique. Enfin, Kim *et al.*, (Kim *et al.*, 2017) ont observé, suite à l'exposition, une augmentation de la vitesse de marche. Bien que ce résultat soit soumis à caution, il pourrait témoigner d'un phénomène d'adaptation.

En conclusion, les effets de l'exposition à la réalité virtuelle avec visiocasque sur le contrôle postural sont ténus, puisque seules deux études ont mis en évidence une augmentation de l'instabilité posturale pendant (Fransson *et al.*, 2019) ou après l'exposition (Conradi & Alexander, 2012). Le résultat le mieux documenté est celui du lien, montré par les trois autres études retenues, entre dynamique posturale spontanée, exposition à la réalité virtuelle et cybercinétose, la dynamique posturale spontanée mesurée avant l'exposition étant fortement associée à l'occurrence de la cybercinétose.

### 5.3.6 Effets visuels

#### 5.3.6.1 Le système visuel et la cybercinétose

Les mécanismes exacts de la cybercinétose restent imparfaitement compris. Ils pourraient résulter d'un conflit oculo-vestibulaire dû à la perception de mouvement par le système visuel, non intégrée par le système vestibulaire et à une activation primitive (émotionnelle) et/ ou secondaire (due au conflit oculo-vestibulaire) du système sympathique.

#### Rappels sur le contrôle du système visuel par le système nerveux autonome

Les projections oculaires du système nerveux autonome influencent de nombreuses fonctions de l'œil. Parmi celles-ci, on peut citer :

- le diamètre de la pupille et l'accommodation, qui sont contrôlés par les muscles intrinsèques de l'œil situés dans l'iris et le corps ciliaire respectivement - ces structures sont innervées par les fibres postganglionnaires des ganglions ciliaires (parasymphiques) et cervicaux supérieurs (sympathiques) ;
- le flux sanguin oculaire, qui est contrôlé par l'innervation du système vasculaire dans le nerf optique, la rétine, la choroïde, le corps ciliaire et l'iris. Ces lits vasculaires sont innervés par des fibres postganglionnaires provenant des ganglions pterygopalatins (parasymphiques) et des ganglions cervicaux supérieurs (sympathiques) ;
- la pression intra-oculaire (PIO), qui est régulée principalement par des changements dans la formation et l'écoulement de l'humeur aqueuse. La régulation autonome des vaisseaux sanguins du corps ciliaire et de l'épithélium ciliaire contrôlent la formation de l'humeur aqueuse, tandis que la régulation du réseau trabéculaire et des vaisseaux sanguins épiscléraux sont des déterminants importants de l'écoulement de l'humeur aqueuse. Ces structures sont innervées par des fibres postganglionnaires provenant des ganglions pterygopalatins (parasymphiques) et cervicaux supérieurs (sympathiques) ;
- la quantité et la qualité du film lacrymal, car les glandes lacrymales et les glandes de meibomius sont sous le contrôle sympathique et parasymphique ;

Mais toutes les régulations du système nerveux autonome ne subissent pas l'influence d'afférence limbique (émotions). Du moins seules certaines sont connues à ce jour.

Les manifestations cliniques de la cybercinétose étant liées à l'activation du système sympathique, certains symptômes oculaires peuvent en faire partie :

#### *Le diamètre pupillaire*

La pupille est un élément optique qui contrôle la quantité de lumière parvenant sur la rétine en agissant comme un diaphragme. Le diamètre de la pupille est contrôlé par deux muscles, les muscles du sphincter de l'iris sous le contrôle du système nerveux parasymphique, et les muscles dilatateurs de l'iris, sous le contrôle du système nerveux sympathique. La contraction du sphincter, accompagnée d'un relâchement du dilatateur, produit une constriction de la pupille (myosis) ; tandis que la contraction du dilatateur, accompagnée d'un relâchement du sphincter, produit une dilatation de la pupille (mydriase). Ces muscles sont innervés par des neurones postganglionnaires provenant des ganglions ciliaires et cervicaux supérieurs, contrôlés par des entrées du système nerveux central qui sont influencées par divers facteurs tels que l'irradiation de la rétine, la distance de vision, la vigilance et la charge cognitive et émotionnelle. La pupille humaine normale peut changer de diamètre de 8 mm à 1,5 mm, ce qui correspond à un changement de surface d'environ 28 fois. Les modifications de la taille de la pupille modulent non seulement l'éclairage de la rétine, mais aussi la profondeur de champ,

les aberrations optiques et la diffraction. Lorsque le diamètre de la pupille diminue, la profondeur de champ augmente et les effets de dégradation de l'image des aberrations optiques diminuent. Ces divers facteurs ont un effet sur les performances visuelles et, compte tenu des conditions d'éclairage de l'environnement et des tâches visuelles changeantes, le système nerveux module continuellement le diamètre de la pupille pour obtenir des performances visuelles optimales.

Le réflexe de mydriase consécutif à l'obscurité associe un phénomène passif, par relâchement du sphincter irien, une inhibition de la voie du réflexe photomoteur stimulée par les cellules rétinienne et une stimulation de la voie sympathique de l'iridodilatation.

La constriction pupillaire qui accompagne l'accommodation-convergence (ou réaction pupillaire à la vision de près) est un mouvement syncinétique d'origine supra-nucléaire. C'est une synergie de trois mécanismes dite « triade de fixation » : l'accommodation qui permet la mise au point sur la rétine, la convergence des globes oculaires qui assure la fusion des images rétinienne, le myosis qui réduit les aberrations dues aux changements de courbure cristallinienne. La constriction du sphincter irien et du muscle ciliaire d'une part, et celle des muscles droits internes d'autre part interviennent dans cette action synergique. La contraction pupillaire débute lorsque l'objet fixé est à 40 cm et devient maximale à 30 cm. Les voies de la réaction d'accommodation partent de la rétine, suivent les voies optiques jusqu'au cortex visuel, qui se projette sur les noyaux antéro-médians. Elles suivent ensuite la voie finale commune parasympathique pour gagner le ganglion ciliaire.

La mydriase peut résulter d'autres réflexes :

- le réflexe sensitivo-moteur : toute excitation d'un nerf sensitif ;
- le réflexe sensori-moteur : toute sensation (gustative, tactile, auditive) désagréable entraîne une mydriase bilatérale ;
- le réflexe psychomoteur : les excitations psychiques (peur, émotion, joie) provoquent une mydriase bilatérale.

Par ailleurs, la nature du stimulus visuel en isoluminance influe sur le diamètre pupillaire, en particulier la couleur, la fréquence spatiale et le mouvement apparent. Ainsi, en cas d'activation du système sympathique, on observera une mydriase, majorée s'il existe des facteurs émotionnels, une réduction de la profondeur de champs, une dégradation de l'image et des aberrations optiques.

#### *L'accommodation*

L'innervation parasympathique du muscle ciliaire domine la dynamique des réponses d'accommodation. Les augmentations de l'innervation parasympathique agissent rapidement (en moins d'une seconde) pour produire une accommodation positive substantielle allant jusqu'à 20 dioptries tandis que l'innervation sympathique agit avec un temps beaucoup plus lent de 10 à 40 secondes pour produire une accommodation de loin d'au maximum 1,5 dioptrie. Il semblerait que le système sympathique n'affecte cependant que légèrement la dynamique de l'accommodation.

Une stimulation sympathique induit une accommodation en vision de loin et réduit la capacité d'accommodation en vision de près.

#### *Les larmes et les paupières*

Les glandes lacrymales sont sous le contrôle du système nerveux sympathique et parasympathique, non seulement pour la production mais également pour la composition des larmes (osmolarité, concentration en protéines). Ces régulations sont complexes et leur dérèglement est source de syndrome sec et inflammatoire de la surface oculaire (Dartt, 2009).

Les glandes des meibomius (glandes tarsiennes ou glandes tarsales) sont des glandes sébacées situées dans les paupières. Leur sécrétion contribue à l'équilibre du film lacrymal. Ces glandes sont principalement sous le contrôle du système sympathique.

Une hyperactivation du système sympathique serait de nature à modifier la composition du film lacrymal, induisant ainsi une gêne oculaire et une sensation d'œil sec.

En conclusion, les manifestations oculaires de la cybercinétose, résultant d'une hyperactivation du système sympathique, induiraient une dilatation de la pupille, une réduction de la capacité d'accommodation/convergence allant jusqu'à des troubles oculomoteurs (exophorie) et une modification de la qualité et de la quantité des larmes. Par ailleurs, le contenu du stimulus visuel peut également influencer sur la taille de la pupille, non seulement par sa dimension émotionnelle mais également par ses caractéristiques physiques.

Les symptômes ressentis peuvent donc être des troubles oculomoteurs, de la fatigue oculaire, des migraines et céphalées, une vision trouble pendant et après l'exposition, un inconfort visuel, une sensation d'œil sec, des brûlures oculaires et des larmoiements.

### 5.3.6.2 Troubles visuels en réalité virtuelle

#### **5.3.6.2.1 Troubles oculomoteurs, fatigue visuelle**

Les troubles oculomoteurs sont des symptômes fréquents de la cybercinétose. Ainsi, dans l'étude de Kennedy *et al.*, (1993), les nausées, les troubles oculomoteurs et la désorientation contribuaient respectivement pour 31 %, 24 % et 45 % aux cyber-malaises (Kennedy *et al.*, 1993). Dans une étude plus récente qui testait la conduite en simulateurs, des proportions similaires étaient observées, avec nausées, signes oculomoteur et désorientation contribuant à 36 %, 30 % et 34 % à la cybercinétose induite par le simulateur (Milleville-Pennel & Charron, 2015). La nature exacte des troubles oculomoteurs n'est pas bien définie et dépend du type de stimulation utilisée. Une étude a analysé de façon objective l'accommodation, la convergence et les phories avant et après exposition à un jeu de combats armés de 30 min, réalisé avec un casque de réalité virtuelle chez trente-quatre sujets âgés de 18 à 28 ans. Vingt-deux sujets ont présenté un cyber-malaise associé à des troubles oculomoteurs immédiatement après une exposition de 30 minutes.

Les résultats ont montré que l'exposition aux jeux de réalité virtuelle affectait les systèmes d'accommodation et de convergence. Après une immersion courte à un casque de réalité virtuelle, les sujets ont présenté un excès d'accommodation associé à un déficit de convergence avec tendance à l'exophorie<sup>18</sup> (Mohamed *et al.*, 2019). Ces conflits d'accommodation/convergence entraînent des symptômes visuels et une gêne chez les jeunes adultes.

La fatigue visuelle peut être aussi causée par la grande quantité de mouvements et de parallaxe pendant la visualisation stéréoscopique, car il y a un mouvement constant exerçant ainsi une demande croissante sur les systèmes accommodatifs et de convergence pour maintenir une image claire et unique (Mohamed *et al.*, 2019).

Ces résultats n'ont pas été confirmés par une étude assez similaire qui a mesuré la vision binoculaire, la stabilité du regard, l'accommodation/convergence et la stéréopsie avant et après exposition de 19 sujets de 18 à 35 ans à un jeu sur casque de réalité virtuelle pendant 40 minutes. Aucune différence n'a été observée sur tous les paramètres mesurés, mais une augmentation significative quoique modérée (10 µm) de l'épaisseur choroidienne<sup>19</sup> a été mesurée après chaque séance d'exposition au casque (Turnbull *et al.*, 2017). Ce paramètre anatomique mérite d'être

---

<sup>18</sup> Déviation pathologique des globes oculaires.

<sup>19</sup> La choroïde est l'une des couches de la paroi du globe oculaire, située entre la sclérotique à l'extérieur et la rétine à l'intérieur. C'est une couche richement vascularisée qui assure la nutrition de l'iris et des photorécepteurs rétiniens.

considéré avec prudence, car les mesures d'épaisseurs choroidiennes par tomographie à cohérence optique sont peu discriminatives à moins de 30  $\mu\text{m}$ . Ces résultats mériteraient donc d'être confirmés.

La différence entre les deux études sur les autres paramètres pourrait être expliquée par la différence de contenu du jeu. Il a en effet été montré que les inconforts visuels surviennent d'avantage lorsque la distance du stimulus change rapidement, en particulier lorsque le stimulus de vergence change, mais pas le stimulus accommodatif (Kim *et al.*, 2014) et quand les modifications sont rapides et les variations de distance importantes (Banks *et al.*, 2013).

Une autre étude a testé comment les casques de réalité virtuelle d'utilisation grand public pourraient affecter le système de vergence, en plus d'étudier l'effet de la profondeur simulée sur les performances du regard. Le scénario virtuel utilisé incluait un objet virtuel commun (un cube), dans un environnement virtuel simple, sans aucune contrainte sur le mouvement de la tête et du cou des sujets. La biomécanique oculaire et le suivi oculaire ont été utilisés pour comparer les angles de vergence dans des conditions d'observation (idéales) et conflictuelles (réelles). L'angle de vergence réel pendant l'immersion était significativement plus élevé que l'angle de vergence idéal et présentait une variabilité plus élevée qui conduisait à des indices de profondeur incorrects qui dégradent la perception de la profondeur et induisent une fatigue visuelle quand les expériences virtuelles sont prolongées. Par ailleurs, à mesure que la profondeur simulée augmentait, la capacité des utilisateurs à manipuler des objets virtuels diminuait, ce qui témoigne d'une altération des capacités visuelles (Iskander *et al.*, 2019).

D'autres études ont recherché si les attributs de l'environnement virtuel influent sur les symptômes visuels induit par des interfaces de RV autres que les casques. Il apparait que les symptômes, tels que la fatigue oculaire sont influencés par la couleur du fond, l'éclairage virtuel, le rapport de contraste, le champ de vision, la vitesse de l'objet virtuel et le type et la résolution de l'affichage. Les symptômes de vision floue sont significativement affectés par la couleur rouge de l'arrière-plan, le champ de vision, la vitesse de déplacement des objets virtuels et le contraste. Ceci est en cohérence avec le fait que le contenu visuel en isoluminance influe sur la stimulation sympathique de la constriction pupillaire. La sensation de sécheresse oculaire et d'irritation est plus importante quand la luminosité augmente, le champ de vision et la vitesse du mouvement des objets virtuels augmente. Le niveau de luminosité affecte considérablement les symptômes visuels, en particulier la sensibilité à la lumière des utilisateurs (Zhari Taha *et al.*, 2014).

Ces études confirment que quel que soit le support, le contenu et la luminosité influent sur la survenue des conflits accommodation / convergence et sur les symptômes associés à l'exposition à la lumière et aux écrans.

### **5.3.6.2.2 Les symptômes visuels dus à l'exposition aux écrans**

#### *L'éblouissement d'inconfort*

Les utilisateurs d'écrans sont souvent exposés à certains changements ou différences de luminance entre différentes zones d'un écran, ce qui peut à son tour produire un phénomène appelé l'éblouissement d'inconfort. L'éblouissement d'inconfort est susceptible d'affecter les performances cognitives. La performance dans la périphérie visuelle est plus sensible aux perturbations. Une étude a exploré les effets de l'éblouissement d'inconfort sur la détection et le traitement des informations visuelles périphériques dans une tâche visuelle complexe. La tâche consistait à comparer l'orientation des flèches présentées dans le champ visuel central et périphérique, précédé ou non d'une scène d'éblouissement avec une luminance de 25  $\text{cd}/\text{m}^2$  flashée avant le stimulus (56 sujets).

Les résultats montrent que l'éblouissement gênant affecte les performances visuelles périphériques dans un environnement de réalité virtuelle (Huang *et al.*, 2014).

### *La sécheresse oculaire*

L'exposition à des écrans, et en particulier à de la lumière bleue, altère les cellules de la surface oculaire, et ce d'autant que le réflexe de clignement est réduit quand le sujet est concentré sur une tâche. Mais les effets spécifiques des casques de réalité virtuelle sur la surface oculaire ont peu été étudiés. Une étude a comparé les effets d'un casque de réalité virtuelle et de l'utilisation d'un écran d'ordinateur de bureau conventionnel sur les paramètres de la surface oculaire et du film lacrymal. Vingt opérateurs informatiques ont été recrutés dans le cadre d'une étude croisée prospective, randomisée et masquée. Les participants ont été répartis au hasard sur des journées distinctes, pour 40 minutes de port continu d'un casque de réalité virtuelle ou d'utilisation d'un écran d'ordinateur de bureau conventionnel. La température extérieure des paupières et de la cornée, le niveau de la couche lipidique du film lacrymal et le temps de rupture du film lacrymal non invasif ont été mesurés au départ et immédiatement après la période d'exposition de 40 minutes. Le port d'un casque de réalité virtuelle a entraîné une augmentation significative de la température de la paupière extérieure et de la cornée, par rapport à l'utilisation classique d'un écran d'ordinateur de bureau. Ces augmentations ont été associées à des améliorations significatives de la couche lipidique du film lacrymal. Des améliorations cliniquement significatives de l'épaisseur de la couche lipidique et de la stabilité du film lacrymal ont été observées avec le port d'un casque de réalité virtuelle. Ces résultats suggèrent que le port d'un casque de réalité virtuelle peut soulager la sécheresse oculaire des opérateurs d'ordinateur dans l'environnement moderne du lieu de travail (Turnbull *et al.*, 2019).

En conclusion, les symptômes visuels sont fréquents dans la cybercinétose et chez les utilisateurs de systèmes de réalité virtuelle. Ils sont en général temporaires et disparaissent dans les minutes ou heures qui suivent l'exposition. Leur origine est complexe et multifactorielle. Il n'existe pas d'étude à ce jour qui ait analysé les conséquences de troubles oculomoteurs symptomatiques ou infracliniques sur le déclenchement de la cybercinétose et / ou sur la fréquence des troubles visuels qui lui sont associés. Les déséquilibres oculomoteurs et les insuffisances de convergence ou un déséquilibre du système sympathique, associé par exemple au diabète, pourraient favoriser l'apparition et peut être la sévérité des symptômes oculaires associés à la cybercinétose. Mais aucune étude n'a été menée pour répondre à cette question.

### **5.3.7 Évaluation du niveau de preuve**

La cybercinétose regroupe un certain nombre de symptômes éprouvés lors d'une exposition à la réalité virtuelle : pâleur, sensation de malaise, troubles visuels, désorientation, maux de tête, fatigue, vertiges, nausées, vomissements, tachycardie, hypersalivation. La cybercinétose peut apparaître très rapidement (en moins de 5 minutes). La susceptibilité à la cybercinétose est très dépendante du contenu (tour de montagnes russes, flux visuel, ...) et du champ visuel sollicité.

Pour ce qui concerne spécifiquement les troubles visuels, les symptômes ressentis peuvent être de la fatigue oculaire, des troubles oculomoteurs, des migraines et céphalées, une vision trouble pendant et après l'exposition, un inconfort visuel, une sensation d'œil sec, des brûlures oculaires et des larmoiements. Les symptômes visuels sont fréquents dans la cybercinétose. Ils sont en général temporaires et disparaissent dans les minutes ou heures qui suivent l'exposition. Leur origine est complexe et multifactorielle.

L'exposition à la réalité virtuelle induit des effets sur les systèmes nerveux central et autonome, dans des schémas encore complexes. La combinaison de mesures subjectives et mesures physiologiques permet d'évaluer la sévérité des symptômes de cybercinétose ressentis lors d'une expérience en réalité virtuelle. Quelques études mettent par ailleurs en évidence une augmentation de l'instabilité posturale pendant ou après l'exposition à la réalité virtuelle.

*Au regard des études sur la cybercinétose incluant celles sur la stabilité posturale et celles sur les troubles visuels, le groupe de travail considère que les éléments de preuve disponibles chez l'humain sont suffisants pour conclure à l'existence de la cybercinétose lors d'une*

exposition à la réalité virtuelle. La cybercinétose est donc un effet avéré lors d'une exposition à la réalité virtuelle.

## 5.4 Post-effets : effets persistants ou consécutifs à l'exposition

### 5.4.1 Introduction

Outre la cybercinétose, y a-t-il d'autres effets qui peuvent perdurer après l'exposition à la réalité virtuelle ? Quelle est leur durée ? Certains contenus sont-ils plus à même de faire apparaître ces effets ?

Comme indiqué au début de ce chapitre, la réalité virtuelle peut exposer les usagers à de nouvelles congruences entre les informations reçues sur les différentes modalités sensorielles, ou au sein d'un même canal sensoriel. Elles sont qualifiées de nouvelles, car elles diffèrent de l'expérience perceptive passée de chaque individu. Selon la théorie du conflit sensoriel, elles remettent en cause des schémas d'intégration multisensorielle bâtis sur l'expérience de la vie quotidienne d'un individu.

Pour une expérience de réalité virtuelle réussie, les utilisateurs doivent s'adapter à ces nouvelles congruences de sorte à résoudre le conflit. Cette adaptation peut perdurer lors du retour aux congruences sensorielles initiales, existantes dans la réalité, générant de fait une inadaptation sensori-motrice et/ou perceptive temporaire (Welch *et al.*, 2008).

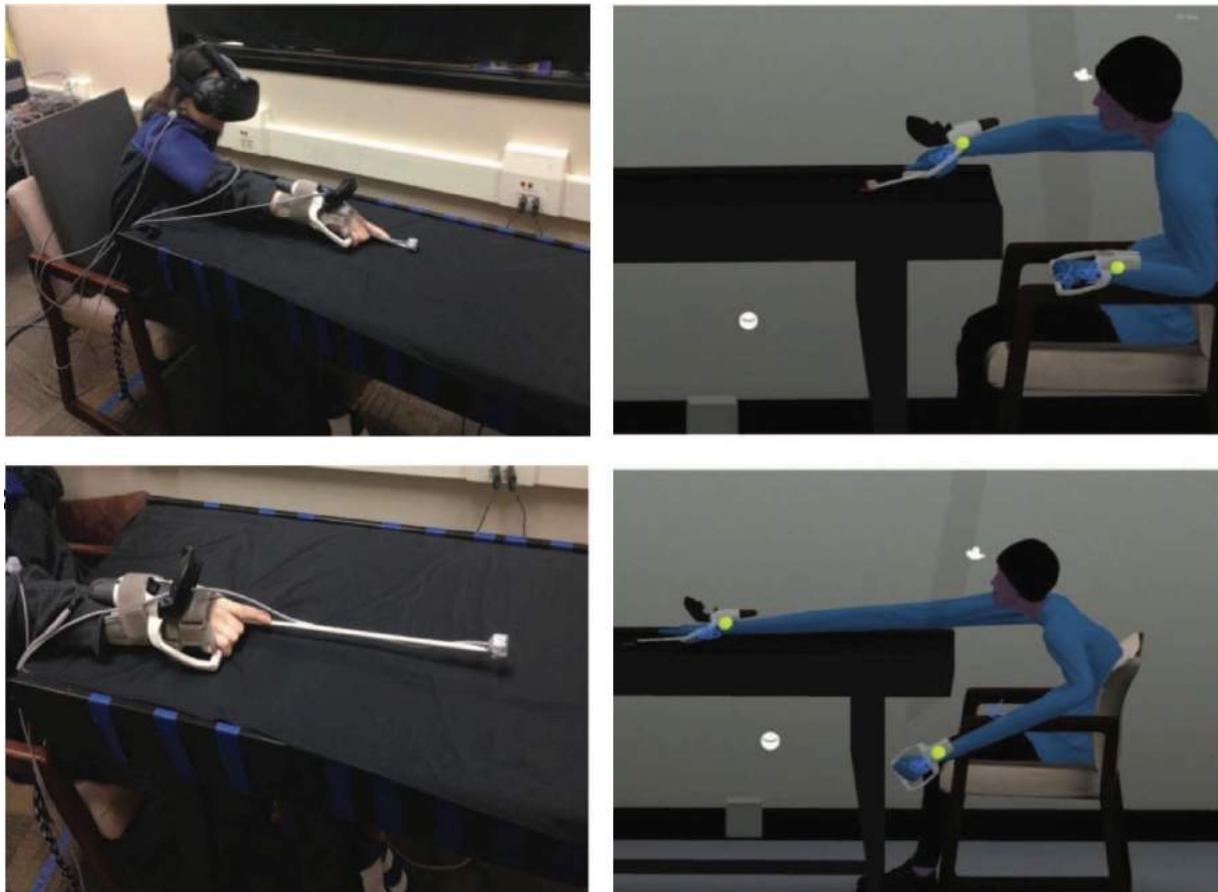
Sont présentés ici, par types d'effets, les résultats de quelques d'études qui s'intéressent à cette adaptation ou recalibration dans le temps après exposition. Les informations suivantes sont recherchées : nature de la ou des nouvelles congruences, étendue des effets et durée. Cette revue de la littérature n'est pas exhaustive, l'étude des post-effets s'inscrivant dans le champ plus général de la recalibration et par là de la plasticité sensorielle.

### 5.4.2 Perturbation de l'habileté manuelle

Dans les activités de préhension et de manipulation d'objets, les mouvements d'extension des bras et des mains sont contrôlés par l'analyse couplée d'informations visuelles et proprioceptives. Dans notre vie quotidienne s'est établi un schéma de contrôle de la configuration spatiale de notre corps pour réaliser le mouvement vers le point de l'espace visuel où l'objet est perçu. C'est sur la relation -ou congruence- entre les informations visuelles et proprioceptives qu'est établi ce schéma. La plupart du temps, cette congruence est reproduite en réalité virtuelle : dans la littérature, on parle de « co-localisation », caractéristique d'un système de réalité virtuelle qui superpose l'espace de visualisation et l'espace de manipulation. Dans ce cas, les schémas de préhension issus de la vie courante sont valides. Cependant, dans certains cas, cette congruence visuo-proprioceptive peut être modifiée dans les systèmes de réalité virtuelle. Si nous nous y adaptons, cela a-t-il des effets sur notre activité post-exposition ? Deux études qui étudient les effets de nouvelles congruences visuo-proprioceptives sont présentées ci-dessous.

La première étude (Day *et al.*, 2018) pose la question suivante : quels sont les effets si les dimensions anthropométriques de la représentation de notre corps dans un visiocasque diffèrent de celles de notre corps ? Pour cela, l'étude modifie l'avatar de l'utilisateur, en allongeant la représentation visuelle de son bras dans un visiocasque. L'endroit où la main est visuellement représentée est situé 30 cm en avant de la position physique de la main (*cf.* Figure 71). La congruence visuo-proprioceptive est modifiée car l'extension du bras nécessaire à atteindre un objet est plus courte.

L'étude évalue la précision spatiale lors d'une tâche de pointage, consistant en l'apparition de cibles virtuelles, que le sujet doit atteindre à l'aide de l'index de son avatar.



**Figure 71 : Tâche de pointage sans modification de la taille du bras (haut) et avec modification, allongement du bras de 30 cm vers l'avant) impliquant une nouvelle congruence visuo-proprioceptive (bas).**

Source : Day *et al.*, 2018.

La procédure expérimentale permet d'observer l'évolution des performances de pointage lors de trois phases : 1) pré-test avec avatar normal, 2) calibration avec avatar modifié (nouvelle congruence visuo-proprioceptive avec décalage du bras de l'avatar de 30 cm vers l'avant) et enfin 3) post-test retour à l'avatar normal. Un groupe témoin est exposé à un avatar non modifié. Les hypothèses de l'étude sont que, pour le groupe avec avatar modifié, une recalibration des mécanismes de pointage a lieu lors de la phase 2), qu'ils ne sont pas instantanés, et que lors de la phase post-test on observe un retour progressif à la normale. Les hypothèses sont validées par l'expérience, la recalibration lors de la phase 2) se traduit par une erreur de pointage supérieure au début des essais, qui s'amenuise selon un modèle linéaire. Lors de cette phase, les performances rejoignent celles de la phase 1 au bout de 45 essais. On observe au début de la phase post-test une erreur de pointage supérieure (5,6 cm pour le groupe avatar modifié, 2,3 cm pour le groupe avatar normal). La pente plus faible de l'erreur de pointage en fonction du rang de l'essai démontre que la recalibration (normal-altéré) est plus rapide que (altéré-normal) qui est d'environ 65 essais. Le groupe témoin ne présente qu'une légère décroissance linéaire de la performance attribuée à la fatigue.

Une seconde expérience menée dans cette étude démontre que les effets de la phase de recalibration s'exportent dans l'environnement réel. En remplaçant les phases pré-test et post-test par des tâches de pointage dans l'environnement réel, sans visiocasque, les mêmes effets sont observés. On peut donc conclure qu'une phase d'exposition à un avatar modifié en réalité virtuelle a bien un effet persistant sur l'habileté manuelle.

La seconde étude (Champney *et al.*, 2007) analysée s'intéresse aux post effets sur les performances de pointage et la stabilité posturale, consécutivement à la réalisation de diverses tâches dans un visiocasque. L'environnement dit d'exposition consiste en une série de déplacements dans un bâtiment virtuel (couloirs, ascenseurs), des tâches de manipulation (insertion et déplacement d'objets), et une tâche de sélection d'une couleur dans une palette. Le périphérique d'interaction utilisé est une souris 2D : il est important de noter que ceci induit une congruence très différente entre les informations proprioceptives et visuelles, comparativement à l'état de l'art actuel des périphériques de réalité virtuelle. En effet, la navigation à la souris n'est pas naturelle, et dans cette expérience, la manipulation des degrés de liberté de l'objet se fait séparément. Les performances de pointage 3D et la stabilité posturale sont mesurées en pré-exposition (*baseline*). Ensuite, les sujets sont tous exposés à l'environnement précédemment décrit et sont assignés aléatoirement à l'une des trois stratégies de réadaptation : « *natural decay* » (*i.e.* pas d'action particulière), une tâche d'insertion d'une cheville dans un trou, et une tâche de marche le long d'une ligne. Cette phase de réadaptation n'a lieu qu'une fois et dure 5 minutes. Les mesures de post effets (pointage, posture) sont réalisées toutes les 15 minutes à partir de la fin de l'exposition (notées t0, t15, ... t60). Nous nous intéressons dans cette section uniquement aux effets sur les performances de pointage. Tout d'abord, l'étude démontre clairement l'existence d'un post effet : l'erreur moyenne de pointage est multipliée par deux pour 60 % des participants juste après l'exposition (t0). Par la suite, les performances s'améliorent, la meilleure stratégie de réadaptation étant la tâche d'insertion. Les mesures suivantes démontrent que bien que s'améliorant, après une heure, les performances ne sont toujours pas revenues aux valeurs de départ.

Une troisième étude (Harm *et al.*, 2008) mesure les performances de pointage juste après l'exposition puis à 1 h, 2 h, 4 h, et 6 h. Le système de RV utilisé pour la phase d'exposition est un dôme vidéoprojeté, une souris 3D pour la préhension et le déplacement des objets, et un *joystick* pour le déplacement. Les congruences modifiées sont visuo-proprioceptives. Pour la manipulation, la souris 3D utilisée implique un espace de manipulation de taille très réduite (réalisation d'une pression sur la souris 3D pour spécifier une position ou une vitesse, avec un déplacement physique du périphérique de l'ordre de 1 cm) par rapport à l'espace de visualisation de ces effets (ici la tâche lors de l'exposition consiste à déplacer des objets dans une pièce). L'étude conclut à l'existence de post effets sur la performance de pointage (ordre de grandeur de l'augmentation de l'erreur spatiale : 15 %) et observe un retour à la normale au bout de 6 h.

### Conclusion sur la perturbation de l'habileté manuelle

Ces trois expérimentations concluent clairement à l'existence de post effets sur l'habileté manuelle. Dans la première étude, la nouvelle congruence, un décalage de 30 cm entre la vision et la proprioception, est précisément contrôlée. Elle démontre une augmentation de l'erreur dans une tâche de pointage dans l'environnement et observe qu'une recalibration progressive s'effectue pour revenir à la normale après 65 essais. Pour la seconde étude, l'environnement d'exposition ne permet pas d'isoler une caractéristique qui participerait principalement de l'effet constaté (erreur de pointage doublée). L'usage de la souris comme périphérique de pointage peut en être la cause principale, il reste que ce type d'interaction n'est plus proposé dans les systèmes de réalité virtuelle professionnels ou grand public. Il faut dès lors discuter de l'exposition à ce type de contenu, qui reste très rare hors du laboratoire. La troisième étude est plus précise sur les modalités de contrôle, puisque l'usage des périphériques est plus précisément décrit. Il reste que la phase d'exposition combine manipulation et déplacement, chacune apportant une nouvelle congruence spécifique, et qu'il est dès lors difficile de connaître leur rôle individuel dans les post effets constatés.

### 5.4.3 Perturbation de l'orientation du corps

Une série d'études s'intéressent à la question de l'habileté à connaître l'orientation de son corps dans l'espace *via* la perception de rotations du corps, suite à une exposition en réalité virtuelle (Ivanenko *et al.*, 1998, Viaud Delmon *et al.*, 1999). Il est à noter qu'aucune manifestation de cybercinétose n'est relevée dans ces études, et que les participants ont été sélectionnés pour leur absence de sensibilité au mal des transports.

Le système de réalité virtuelle est un siège mobile dont la rotation est contrôlée par ordinateur, combiné à un visiocasque qui présente une pièce en stéréoscopie (*cf.* Figure 72). L'environnement d'exposition joue sur le gain défini comme le rapport entre la rotation présentée visuellement dans le visiocasque et la rotation physique opérée sur le siège. L'exposition réalise une session de recalibration visuo-vestibulaire (ou VVS pour *visual-vestibular stimulation*), en appliquant au sujet des déplacements dont les gains sont symétriques (Gain  $G=0,5$  ( $90^\circ/180^\circ$ ) vers la droite et vers la gauche) (Ivanenko *et al.*, 1998, 25 participants) ou asymétriques (Viaud Delmon *et al.*, 1999, 2 participants sélectionnés dans l'étude précédente sur la base des modifications perceptives générées chez eux par la VVS symétrique) suivant la direction de rotation (Gain  $G=0,5$  ( $90^\circ/180^\circ$ ) vers la droite – Gain  $G=1$  ( $90^\circ/90^\circ$ ) vers la gauche). Après cette phase d'exposition, les sujets doivent estimer les rotations qui sont appliquées sur le siège, les yeux bandés. Le post effet constaté est une réduction de l'estimation des rotations. Pour une VVS symétrique, les estimations sont en moyenne réduites de 25 %, avec une large variabilité interindividuelle, et de manière bilatérale. Pour une VVS asymétrique, les estimations sont en moyenne à 50 % de l'angle réel, et, bien que la VVS soit asymétrique, cette erreur d'estimation est bilatérale.

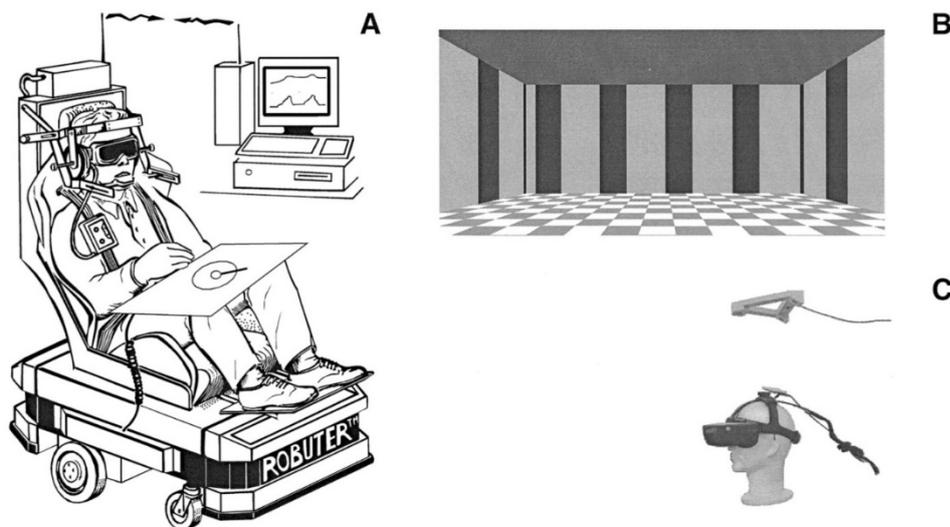


Figure 72 : Illustration de l'étude sur la recalibration visuo-vestibulaire.

#### Conclusion sur la perturbation de l'orientation du corps

Une exposition à un environnement virtuel dans lequel les gains de rotation sont changés par rapport à la congruence naturelle, peut, par la suite, modifier l'amplitude estimée de nos rotations physiques. L'étude ne permet pas de statuer sur l'existence ou l'amplitude de cet effet si le sujet garde les yeux ouverts, ce qui serait probablement le cas dans un contexte écologique - sauf usage pour les malvoyants, ni sur la durée des effets.

#### 5.4.4 Effets sur la posture, la marche, le contrôle moteur

Des quatre études considérées ici, deux concluent à des effets positifs sur le contrôle moteur et sur la marche, leur contexte applicatif est thérapeutique. Deux études mentionnent des post effets négatifs.

##### *Les deux études constatant des effets négatifs*

Celle de Champney déjà décrite plus haut (section 5.4.2) mentionne que pour 50 % des sujets, l'augmentation de l'instabilité posturale est de 72 % (de la ligne de référence) juste après l'exposition. Les mêmes remarques que précédemment s'appliquent : la nature des conditions d'exposition rend difficile l'interprétation des causes, car le mode d'interaction à la souris (2D) pour réaliser la tâche de navigation et de manipulation implique de nouvelles congruences à plusieurs niveaux. Une seconde étude considère l'effet, dans un visiocasque (*Sony Playstation VR*), de 15 minutes de deux jeux : l'un présentant un fond statique (*Fruit Ninja*) et l'autre présentant un fond mouvant (conduite d'une voiture) (Park & Lee 2020). Les résultats confirment ceux de nombreux autres travaux étudiant l'incohérence visuo-vestibulaire provoquée ici, dans un contexte de jeux grand public : l'instabilité posturale est supérieure juste après exposition dans le cas mouvant, mais l'étude ne présente pas de procédure ni de données pour étudier la durée de ces effets.

##### *Les deux études constatant une issue positive*

Dans une simulation de *snowboard*, après une série de stimulations dans lesquelles le retour visuel présente une latence croissante par rapport aux actions motrices sur un *snowboard* (cf. Figure 73), l'étude suggère que le contrôle postural et la performance motrice -dans le monde réel- sont améliorés (Wada *et al.*, 2016).



**Figure 73 : Congruence visuo proprioceptive.**

Dans cette étude, la congruence visuo proprioceptive est modifiée temporellement, en ajoutant une latence entre la commande motrice sur le *snowboard* instrumenté, et le résultat visuel sur l'écran.

L'autre étude considérant des effets positifs s'intéresse à la possibilité de corriger la marche par l'adaptation en réalité virtuelle (Sorrento *et al.*, 2018). L'activité consiste à promener un chien en laisse. La simulation permet une marche sur tapis roulant avec simulation visuelle de l'environnement ainsi que du chien qui trotte devant soi. Une force de traction est appliquée sur la laisse maintenue par le sujet grâce à un système haptique (10 à 20 N) pendant une durée de 60 s. Les mesures de fréquence de marche et de longueur du pas démontrent l'existence d'une adaptation pendant et après l'exposition : ces deux marqueurs augmentent lors de l'application de la force de traction, et persistent lorsque la force de traction est annulée.

### Conclusion sur la posture, la marche et le contrôle moteur

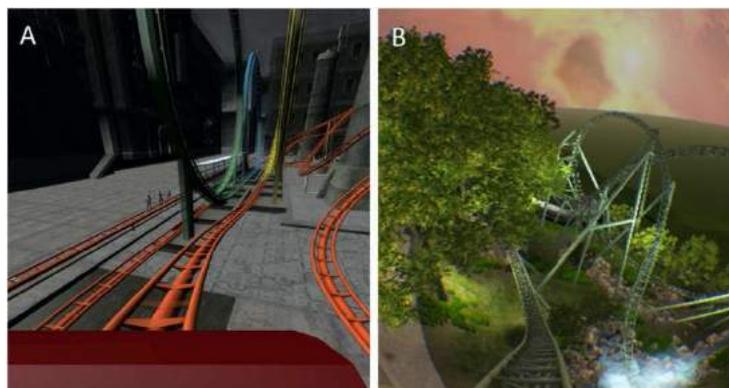
Le fait que de l'étude de Champney *et al.*, combine diverses activités lors de l'exposition ne permet que de constater des post-effets de modifications temporaires de la stabilité posturale, sans pouvoir les relier à une cause précise. Réaliser la correspondance entre l'espace de manipulation 2D (souris) - et l'espace de navigation et manipulation en 3D, loin des congruences de la vie courante, pourrait expliquer ces effets.

L'étude de Wada *et al.* montre que lorsque la congruence visuo-proprioceptive présente un retard temporel (retard du retour visuel par rapport à l'entrée motrice) les schémas moteurs s'en trouvent modifiés. L'étude ne permet pas de conclure sur la durée de l'effet.

La question de la durée des effets reste également ouverte pour la modification de la longueur et la fréquence des pas.

#### 5.4.5 Temps de réaction

Les montagnes russes virtuelles sont une expérience favorable à l'apparition de la cybercinétose, en particulier en l'absence de dispositif permettant de renvoyer des informations d'accélération au système vestibulaire (plateforme mobile par exemple). C'est suite à l'exposition à ce type d'environnement, sciemment choisi, car provocateur de cybercinétose, dans un casque de type *Oculus (DK1)*, que Nalivaiko *et al.*, (Nalivaiko *et al.*, 2015) ont mesuré le temps de réaction lors d'une tâche. La tâche (réalisée post-exposition) consiste à appuyer sur un bouton du clavier dès l'apparition d'une croix sur un écran d'affichage. L'exposition aux montagnes russes est au maximum de 14 minutes, ou s'arrête à la demande des sujets. À l'issue de l'exposition, le temps de réaction est de faible amplitude, mais sensiblement accru de 20 à 50 ms (l'ordre de grandeur de temps de réaction est de 400 ms), l'expérience ne réalise pas de mesures à des moments ultérieurs. Il est à noter que l'augmentation du temps de réaction est corrélée au niveau de sensation nauséuse.



**Figure 74 : Environnement d'exposition provocateur de cybercinétose : les montagnes russes.**

Les auteurs observent une augmentation sensible du temps de réaction lors d'une tâche simple (réaction par pression sur un bouton à un stimulus visuel – croix sur un écran) réalisée en comparatif avant/après exposition à cet environnement très générateur de cybercinétose. Le score de nausée est corrélé à la prolongation du temps de réaction. Source : Nalivaiko *et al.*, 2015.

#### 5.4.6 Persistance de troubles visuels ou posturaux chez l'enfant

Deux études sur des populations d'enfants n'ont pas été fusionnées avec les sections précédentes.

La première étude (Rauschenberger, Bakarar 2020) a proposé à une population de 30 enfants de 10 à 12 ans, de sélectionner 5 jeux en RV parmi un catalogue très varié. Une sélection représentative de 5 visiocasques grand public est utilisée dans l'étude. L'exposition consiste à jouer pendant 5 jours d'affilée, 30 minutes par jour, à une sélection de 5 jeux. Une série de mesures ophtalmologiques (acuité, phorie (rapport AC/A), facilité accommodative, perception stéréoscopique), vestibulaire (réflexe oculo-vestibulaire, équilibre), coordination œil-main (insertion de 25 bâtons dans des pailles orientées aléatoirement), marche les yeux bandés vers une cible précédemment visualisée. Les mesures sont effectuées au jour 1 (avant exposition), au jour 5 (juste après exposition), et au jour 6 (lendemain de l'exposition). L'étude conclut à l'absence de preuve empirique d'effets sur tous ces indicateurs. Il est important de noter que, pendant l'exposition, les sujets étaient assis, et que la posture assise semble être un facteur réducteur de la cybercinétose. Il faut considérer la possibilité que ces résultats puissent changer dans une condition expérimentale utilisant la station debout.

La seconde étude (Tychsen et Foeller 2020) concerne une population de 50 enfants (dont 29 garçons et 21 filles) de 4 à 10 ans, jouant lors de deux sessions de 30 minutes au jeu *Eagleflight* (Ubisoft). Les mesures d'acuité, de phorie, de réfraction, d'acuité stéréoscopique, de stabilité posturale, et de réflexe visuo vestibulaire sont réalisés en pré-, inter-, et post-session. Trois des enfants ont souhaité arrêter l'expérimentation (un garçon pour inconfort, deux filles reportant des symptômes cohérents avec la cybercinétose). Les mesures ne montrent pas d'effets significatifs.

#### 5.4.7 Persistance de la cybercinétose et phénomène d'habituation

En ce qui concerne la persistance de la cinétose, les travaux mesurant explicitement son évolution post-exposition sont rares. L'étude de Conradi et Alexander (2012, cf. section 5.3.3.1) mentionne que les « Les scores augmentent juste après la session d'exposition à la RV et reviennent au niveau initial une heure après ».

Une étude (Gavgani *et al.*, 2017) observe les effets de l'exposition à des montagnes russes virtuelles (visiocasque, sans plateforme mobile), pendant 15 minutes, en mesurant entre autres la réponse électrodermale (sur le front) et en administrant un questionnaire de cybercinétose (MSAQ) avant et après l'exposition. L'étude est menée pendant trois jours consécutifs. L'étude conclut d'une part à la fiabilité de la mesure de réponse électrodermale pour évaluer la nausée. D'autre part, les auteurs concluent à un phénomène d'habituation, car l'exposition répétée sur les trois jours s'accompagne d'un ralentissement de l'apparition des effets de cybercinétose.

#### 5.4.8 Évaluation du niveau de preuve

Plusieurs études identifient de nouvelles congruences sensorielles comme génératrices de post-effets (Anglin *et al.*, 2017), (Bansal *et al.*, 2019), (Bodenheimer *et al.*, 2017), (Kokkinara *et al.*, 2015), (Ramos *et al.*, 2019), (Waller *et al.*, 2008), (Welch et Sampanes, 2008). Sur la base des études analysées, le groupe de travail conclut à l'existence d'un post effet sur l'habileté manuelle, lorsque l'environnement expose les sujets à un avatar incohérent avec une caractéristique anthropométrique, ici, la longueur du bras de l'avatar (Day *et al.*, 2018). Le groupe de travail conclut également à l'existence d'un post effet sur la capacité à orienter son corps (Ivanenko *et al.*, 1998, Viaud-Delmon *et al.*, 1999) lorsque l'exposition opère une modification sur le gain rotation visuelle – rotation physique. Il convient de discuter de la possibilité de leur occurrence auprès d'un public plus large, et du risque encouru au vu de l'étendue des effets. En particulier, une méthode d'interaction pour le déplacement en

environnements virtuels, le « *redirected walking* » ou « marche redirigée » (Sun *et al.*, 2020) est directement basée sur l'utilisation de gains entre mouvements réels et mouvements virtuels qui impliquent de nouvelles congruences. Cette méthode pourra s'avérer une solution de déplacement dans les environnements virtuels de grande taille, notamment dans des installations grand public. Il est envisageable que des considérations ludiques ou créatives viennent transformer les caractéristiques anthropométriques dans les applications ludiques. Nous pouvons prendre l'exemple du jeu *ARMS (Nintendo Switch)*, jeu de boxe qui amène les joueurs à visualiser leurs bras comme des ressorts extensibles capables d'atteindre leur adversaire à distance. Ce contenu n'est pas proposé en réalité virtuelle aujourd'hui mais pourrait l'être.

L'étude de Champney *et al.*, conclut à des effets sur l'habileté manuelle et la posture, mais ne permet pas d'isoler des caractéristiques spécifiques de l'exposition amenant à ce résultat. Il est important de noter la différence de durée des effets entre l'étude de Day *et al.* d'une part, et de Champney (Champney *et al.*) et Harm (Harm *et al.*) d'autre part. En effet, les effets sont plus courts dans la première. Deux hypothèses pourraient faire l'objet d'études complémentaires. D'abord, le caractère hybride de l'exposition dans l'étude de Champney *et al.*, (combinaison de tâches, et nouvelles congruences multiples) peut être à l'origine de perturbations plus durables. Ensuite, l'étude de Day *et al.*, propose explicitement une phase de recalibration à la normale, ciblant spécifiquement l'incongruence délivrée dans la phase d'exposition, avec *feedback* explicite, ce qui n'est pas le cas de l'étude de Champney *et al.*, (les phases d'exposition et de réadaptation ne ciblent pas une nouvelle congruence spécifique), ni de Harm *et al.*, (qui ne propose pas de phase de recalibration). Cette dernière hypothèse constitue d'ailleurs une voie possible pour la réduction des post effets en réalité virtuelle, consistant en une phase de réadaptation systématique avec *feedback* pour les contenus destinés au grand public.

Le Tableau 11 ci-dessous synthétise l'analyse de la littérature sur les post-effets.

**Tableau 11 : Synthèse de la littérature sur les post-effets.**

Référence	Activité	Exposition / Nouvelle congruence*	Effet sur l'activité**	Étendue	Durée	Remarques
(Day <i>et al.</i> , 2018)	Pointage 3D	VP : Décalage visuel (30 cm) de la main de l'avatar	Baisse de la précision de pointage	Moyenne de l'erreur de pointage doublée	Retour à la normale après 65 essais	
(Champney & al. 2007)	Pointage 3D	Indéterminé. Exposition composite : Interaction à la Souris 2D pour activités 3D	Baisse de la précision de pointage	Moyenne de l'erreur de pointage doublée (60% sujets)	Les effets perdurent après 1h	Augmentation de l'instabilité posturale de 72%
(Harm <i>et al.</i> , 2008)	Pointage directionnel	VP : Souris 3D isométrique.	Baisse de la précision de pointage	Ordre de grandeur*** d'augmentation de l'erreur 15%	retour à la normale après 6h	
(Viaud Delmon <i>et al.</i> , 1999).	Estimation de rotation propre (yeux fermés)	VP : stimulation par rotations avec gain visuel asymétrique (Droite : G=0.5, Gauche G= 1)	Sous-estimation de la rotation du corps (yeux fermés)	Moyenne des estimations d'angle divisée par 2, effet bilatéral	Pas d'information au-delà de la mesure post exposition.	

Référence	Activité	Exposition / Nouvelle congruence*	Effet sur l'activité**	Étendue	Durée	Remarques
(Wada & al. 2016)	Snowboard	VP : latence entre l'entrée motrice et le retour visuel (jusqu'à 0.6s)	Amélioration de la stabilité de la tête-écart type accélérations	Ordre de grandeur**** de la réduction de l'écart type : 30% - axe inter-aural.	Pas d'information au-delà de la mesure post exposition.	
(Sorrento et al., 2018).	Promener un chien	Sans : traction supérieure sur la laisse simulée pendant 60s	Augmentation fréquence de marche et longueur du pas	-	Pas d'information au-delà de la mesure post exposition.	
(Rauschenberger et Bakarar 2020)	Jouer à des jeux grand public sur visiocasque	Indéterminé (exposition combinant 5 jeux) 30 min par jour pendant 5 jours	Absence d'effets ophtalmologiques (cf. mesures), posturaux, et sur la coordination œil-main.	-	-	Population de 30 enfants, <b><u>Position Assise</u></b>
(Tychsen et Foeller 2020)	Eagleflight (Ubisoft)	VP : contrôle du vol d'un aigle à la première personne avec l'orientation de la tête.	Absence d'effets (acuité, phorie, stabilité posturale, réflexe visuo vestibulaire)	-	-	Population de 50 enfants

\* VP – nouvelle congruence visuo-proprioceptive.

\*\* S'entend au retour à la normale, après exposition aux nouvelles congruences.

\*\*\* estimation basée sur la figure 2 page 997 de l'article.

\*\*\*\*estimation basée sur la figure 3 page 3 de l'article.

## 5.5 Effets psychologiques et psychosociaux

La littérature s'est penchée sur la possibilité que la réalité virtuelle puisse altérer le rapport que nous entretenons avec le réel (Viaud-Delmon, 2007). Il semble légitime de se demander si l'illusion induite par la réalité virtuelle peut être un facteur de confusion chez des populations à risques, telles que les personnes présentant des troubles psychiatriques de type psychotique. Bien que les recherches dans le domaine soient trop insuffisantes pour pouvoir conclure, nous avons pu trouver des études expérimentales s'intéressant à deux types de troubles : la paranoïa et les troubles dissociatifs. La question de l'exposition aux contenus violents est également abordée, mais il est à noter qu'elle n'est pas propre à la réalité virtuelle, elle concerne les jeux vidéo en général.

### 5.5.1 Idéation paranoïaque

La réalité virtuelle a été utilisée pour mesurer la propension à l'idéation paranoïaque dans la

population générale (Freeman *et al.*, 2007). Deux cent participants (50 % femmes/hommes) étaient immergés dans un environnement virtuel représentant le métro londonien. Cet environnement comportait plusieurs personnages virtuels dont le comportement était neutre. Les chercheurs ont ensuite mesuré la tendance des participants à juger ces personnages comme persécutant à leur égard. Les données montraient que 40 % des participants développaient des idéations de persécution. Ce résultat doit néanmoins être relativisé en considérant que l'expérience a été réalisée un an après les attentats de 2005 dans le métro londonien. Une expérience similaire a été menée avec des personnes présentant des risques de troubles psychotiques (Valmaggia *et al.*, 2007). Un des objectifs était d'évaluer la faisabilité d'utiliser la réalité virtuelle avec cette population et le risque de réaction adverse suite à l'exposition dans cet environnement. Cette étude a été réalisée avec 21 participants (dont 8 femmes) et les possibles réactions adverses ont été évaluées une semaine après exposition. Les résultats n'indiquaient pas d'existence de réactions adverses particulières. Néanmoins, l'évaluation était réalisée par téléphone et ne s'appuyait pas sur un instrument standard d'évaluation de l'humeur ou des tendances paranoïaques. En outre, l'étude ne comportait pas de groupe contrôle. Il n'était donc pas possible d'évaluer si les idéations de persécution juste après exposition en réalité virtuelle différaient de celles de la population générale. Hesse *et al.*, (2017) ont étudié la faisabilité d'induire des idéations paranoïaques chez des populations psychotiques (schizophrénie ou trouble schizo-affectif). Leur étude comportait 21 patients psychotiques et 20 personnes sans troubles. Leur interprétation des résultats suggère que les patients psychotiques étaient plus susceptibles de développer des idéations de persécution. Néanmoins, le traitement statistique sur lequel ils basent leur interprétation est critiquable, puisqu'il s'agit de tests *post-hoc* entre conditions (environnement neutre vs environnement pouvant induire un sentiment de rejet) et groupes comparés deux à deux, alors que leur analyse principale (analyse de la variance) n'indiquait pas d'interaction. En outre, le graphique dans leur article peut laisser penser que les différences constatées entre groupe psychotique et groupe contrôle seraient dues à un effet plancher chez le groupe contrôle. Ces auteurs rapportent également qu'un plus grand nombre de patients psychotiques ont abandonné l'expérience. Mais il est difficile de savoir à quoi ces abandons sont dû et s'ils ont été spécifiquement causés par l'expérience en RV. À noter, cependant, qu'il a fallu calmer deux patients pendant environ une heure après l'expérience. Davantage de recherche sur ces questions sont nécessaires afin de statuer sur l'effet de la RV sur des populations à risque de troubles psychotiques.

### 5.5.2 Troubles dissociatifs

Les troubles dissociatifs se réfèrent à des altérations de la mémoire, l'identité, la perception, et le sens de soi, tels que la dépersonnalisation/déréalisation (American Psychiatric Association, 2013). Les symptômes regroupent un sentiment de détachement de soi ou des pertes de mémoire et l'amnésie. Il existe peu d'études analysant les effets de dissociation possibles induits par la réalité virtuelle et une seule expérience prospective de groupe avec évaluations pré-post exposition (Aardema *et al.*, 2010). L'expérimentation a été réalisée sur des adultes immergés avec un casque de réalité virtuelle pendant 15 minutes. Elle montrait une augmentation des symptômes dissociatifs après exposition à la réalité virtuelle, mais ceux-ci restaient inférieurs aux niveaux infra-cliniques. Selon les conclusions des auteurs, cette augmentation pourrait correspondre à des processus normaux impliqués dans l'imagination comme lors des rêveries diurnes. Snodgrass *et al.* (2011) argumentent que de telles expériences dissociatives pourraient être ressenties comme agréables par les personnes exposées à la réalité virtuelle et pourraient participer au bien-être de l'individu, voire avoir un rôle thérapeutique. Ces données extrêmement préliminaires suggèrent que les risques d'émergence de troubles dissociatifs dus à la réalité virtuelle sont faibles. Néanmoins, la littérature scientifique actuelle manque d'études réalisées spécifiquement sur des personnes diagnostiquées avec des troubles dissociatifs. Aardema *et al.*, (2010) indiquaient un effet plus important de la réalité virtuelle chez les participants qui avaient une tendance dissociative préalable. Il est donc possible que la réalité virtuelle puisse avoir un impact plus fort sur des

populations vulnérables, avec le potentiel de dépasser les seuils cliniquement significatifs. Plus d'études sur le sujet seraient nécessaires pour pouvoir conclure.

### 5.5.3 Contenus violents

S'agissant de l'exposition à des contenus violents, Farrar *et al.* (Farrar *et al.*, 2013) montrent qu'il existe un effet d'amorçage peu important des pensées paranoïaques liées au contenu de l'environnement. Qui plus est, l'effet étudié reste limité aux jugements des utilisateurs concernant l'environnement lui-même, ce qui ne permet pas de conclure à l'existence d'un effet post exposition dans l'environnement réel.

Deux études relatives à l'exposition à des contenus violents cherchent, quant à elles, à estimer les effets pendant et après l'exposition.

En comparant 2 groupes de 35 sujets exposés durant 3 jours, pour l'un, à des jeux violents et, pour l'autre, à des jeux non violents, Hasan *et al.* (Hasan *et al.*, 2013) concluent que les perceptions d'hostilité et de comportements agressifs post exposition sont plus importants et ont augmenté au fil du temps de pratique (3 jours consécutifs) pour les joueurs de jeux vidéo violents, mais pas pour les joueurs de jeux vidéo non-violents.

Une seconde étude (Engelhardt *et al.*, 2011) expose 2 groupes de 32 sujets (l'un caractérisé par une forte pratique des jeux vidéo violents ; l'autre, par une faible pratique de ces jeux) à des stimuli relatifs à l'agressivité après 25 minutes de pratique, soit de jeux violents, soit de jeux non violents. Plusieurs résultats peuvent être soulignés.

En premier lieu, les sujets ayant joué à des jeux violents lors de l'expérimentation sont plus agressifs que ceux ayant joué à des jeux non violents et ceci est vrai quelles que soient leurs habitudes de jeu (qu'ils pratiquent fortement ou faiblement les jeux vidéo violents).

En second lieu, sachant que la faible amplitude de l'onde cérébrale P300 est corrélée à des réactions violentes, un EEG a permis de mettre en exergue les résultats suivants :

- les images violentes présentées aux sujets (stimuli post jeu) produisent une amplitude plus faible de l'onde chez les sujets ayant des pratiques élevées de jeux vidéo violents comparé aux sujets pratiquant faiblement les jeux vidéo violents. En somme, les sujets qui pratiquent fréquemment des jeux violents, réagissent plus violemment à des images violentes que les sujets ayant une pratique peu fréquente des jeux violents ;
- les sujets ayant une faible pratique des jeux violents et ayant joué à un jeu violent lors de l'étude ont une plus faible amplitude de P300 que ceux qui ont joué à un jeu non violent. Cela signifie que, pour les sujets jouant peu à des jeux violents, le fait de jouer à un jeu violent lors de l'expérimentation augmente le niveau de leurs réactions violentes ;
- que les sujets aient joué à un jeu violent ou non violent lors de l'étude, lorsqu'ils sont exposés à des images violentes, les sujets ayant une forte pratique des jeux violents ont une plus faible amplitude de P300 que ceux qui pratiquent moins fréquemment les jeux vidéo violents. En d'autres termes, le fait d'avoir joué à un jeu violent lors de l'étude, n'a pas rendu les sujets pratiquant fortement les jeux violents encore plus violents.

### 5.5.4 Evaluation du niveau de preuve

Le groupe de travail s'est intéressé à savoir si l'illusion induite par la réalité virtuelle peut être un facteur de confusion chez des populations à risques, telles que les personnes présentant des troubles psychiatriques de type psychotique. Les recherches dans le domaine sont

insuffisantes pour pouvoir conclure. Il existe cependant des études expérimentales s'intéressant à deux types de troubles : la paranoïa et les troubles dissociatifs. La question de l'exposition aux contenus violents est également abordée, mais il est à noter qu'elle n'est pas propre à la réalité virtuelle et concerne les jeux vidéo en général.

*Le groupe de travail conclut que les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'effets psychologiques ou psychosociaux lors d'une exposition à la réalité virtuelle.*

## 5.6 Avatars, rétroactions et représentations de l'utilisateur

### 5.6.1 Introduction

Le domaine de la réalité virtuelle s'inscrit dans une évolution générale des médias et des dispositifs de communication vers une forme « d'incorporation » (Biocca 1997), c'est-à-dire de rapprochement progressif du corps et de l'interface. Il existe simultanément une relation de contrôle croissante entre l'utilisateur et sa figuration dans le monde virtuel (Biocca, 1997).

Dans les environnements virtuels (EV), la question de la rétroaction vers l'utilisateur est intimement liée à celle de sa représentation dans le monde virtuel. Par représentation, il faut entendre la (ou les) modalité(s) concrète(s) des rétroactions vers l'utilisateur, en matière d'information fournie en retour sur son action, sa position ou encore sur ses possibilités d'action dans l'EV.

Techniquement, ces rétroactions se traduisent par des représentations et des effets sonores, visuels, haptiques, voire des messages et des dialogues. Ceux-ci peuvent se combiner les uns aux autres, afin de permettre à l'utilisateur de contrôler son activité et de comprendre l'évolution de la situation dans laquelle et avec laquelle il interagit.

Les rétroactions et représentations ont pour fonctions générales de :

- renseigner l'utilisateur sur sa position dans l'espace virtuel mis en scène dans l'EV, notamment relativement aux autres éléments, objets et utilisateurs qui y sont présents ;
- permettre à l'utilisateur de se construire une « identité » parmi ceux avec qui il partage l'environnement virtuel, de façon plus ou moins pérenne et personnalisable ;
- guider l'utilisateur dans son dialogue et la réalisation de sa tâche, en lui délivrant une information permettant d'orienter la suite de ses actions ;
- renseigner l'utilisateur sur la prise en compte de ses actions dans l'EV et sur l'effet qui en résulte dans l'espace ou sur les objets virtuels concernés.

Alors que le terme de rétroaction est plutôt utilisé pour désigner une information transitoire de changement liée à une action, une commande ou un évènement, le terme de représentation tendrait plutôt à désigner les moyens d'affichage (visuels, sonores, haptiques...) permettant de présenter avec une certaine invariance les utilisateurs, les objets et les lieux. Dans ce sens, la représentation humanoïde d'un utilisateur peut dans le même temps être considérée comme la rétroaction que lui renvoie l'environnement virtuel, par exemple concernant sa situation dans une pièce virtuelle. Pour la suite, nous considérerons les deux termes comme équivalents pour discuter de la façon dont les utilisateurs et leurs actions sont « représentés » dans un EV.

### 5.6.2 Les avatars : représentation de soi pour soi versus pour les autres, selon des formes variées

La question de la représentation de l'utilisateur dans les environnements virtuels semble avoir d'abord été étudiée dans le contexte des environnements multi-utilisateurs en ligne pour le jeu

et la conversation. En particulier, le terme d'avatar<sup>20</sup> a été consacré dans ce contexte pour désigner le personnage ou l'entité apparente correspondant à l'utilisateur dans le monde virtuel (Blade *et al.*, 2002). Le contexte des « environnements virtuels collaboratifs » implique en effet que l'utilisateur puisse accéder à une information fiable concernant son interaction avec l'EV mais aussi son « interaction<sup>21</sup> » avec les intentions, les actions et la position des autres utilisateurs. Trois grands types d'avatars peuvent ainsi être distingués :

- les avatars en tant que *représentation de soi pour soi* : l'avatar – généralement humanoïde et visant à représenter une entité individuelle a pour fonction essentielle de fournir une information à destination de l'utilisateur lui-même ; en général, l'objectif de l'avatar est alors de faciliter la navigation dans l'environnement virtuel, voire l'action ;
- les avatars en tant que *représentation de soi pour les autres* : l'avatar a pour fonction de fournir une information à destination des autres utilisateurs, comme dans le cas des jeux ou des environnements virtuels collaboratifs à distance ;
- les *autres représentations de l'utilisateur*, qui ne sont pas forcément étudiées sous la thématique des avatars, mais dont la fonction première reste néanmoins une représentation de l'utilisateur dans l'environnement virtuel, lui restituant une information sur sa localisation et sur ces actions et leur effet.

Sur le plan de la forme visuelle, les catégories de représentations sont fort variées (*cf.* Figure 75) ((Kadri *et al.*, 2007), (Seinfeld *et al.*, 2020)), telles que :

- la représentation humanoïde de l'utilisateur, plus ou moins réaliste, plus ou moins complète et plus ou moins ressemblante ;
- une ou plusieurs parties du corps, par exemple une main, des doigts, des yeux ou une tête ;
- un outil spécifique exprimant sa fonction dans l'environnement virtuel, par exemple une gomme, un pinceau, des ciseaux, un tournevis ;
- un objet virtuel sans signification spécifique bien définie, par exemple une flèche, une sphère, un rayon, etc.



Figure 75 : Exemples d'avatar.

Situations collectives de brainstorming à distance, à gauche (Bourgeois-Bougrine *et al.*, 2020) ; réalité augmentée pour le traitement de la katsaridaphobie (peur des cafards), au centre (Wrzesien *et al.*, 2013) ; formation aux procédures de chargement de matière dangereuse à droite (Barot *et al.*, 2013).

<sup>20</sup>Avatar, du Sanskrit *avatara* désigne les multiples incarnations du dieu Vishnou dans la religion hindoue. Le terme a été ensuite repris dans le domaine des jeux et en informatique pour désigner la représentation apparente d'un utilisateur dans un monde virtuel.

<sup>21</sup> Il doit être bien clair ici que même si le même terme est utilisé, la notion d'interaction utilisateur-EV n'est pas de même nature que l'interaction homme-homme, y compris dans le cas où cette interaction est médiatisée à travers un EVC.

### 5.6.3 Revue des études sur les avatars

Les études menées dans les années 90 ont porté sur les premiers environnements virtuels collaboratifs, pour l'essentiel textuels (*MUDs - Multi-User Domains* ; *MOO - MUDs Object Oriented* ; (Curtis *et al.*, 1994) ; (Bruckman *et al.*, 1995) ; (Dillenbourg *et al.*, 1997)). Ces études se sont essentiellement penchées sur le versant social de l'usage des avatars. Il a ainsi été proposé des typologies (voir par exemple l'étude de Suler de 1996<sup>22</sup> concernant l'environnement « *The Palace* ») selon des critères techniques (avatar standard fourni par le logiciel, *Smileys vs* création de l'utilisateur), de forme (animal, personnage dessiné, photo de l'apparence réelle, etc.) ou encore selon l'intention de communication véhiculée par l'avatar choisi.

Trois grands domaines d'application abordent par la suite la question de la représentation des utilisateurs de façon explicite : les études portant sur la représentation des patients dans le contexte d'un usage thérapeutique des environnements virtuels, les études ayant vocation à assister un travail collaboratif (par opposition aux jeux et aux environnements de conversation) et enfin les études récentes sur les jeux en ligne impliquant un nombre extrêmement grand de joueurs (*Massively Multi-player Online Games – MMOGs* (Ducheneaut *et al.*, 2006)), 50 000 personnes pour *EverQuest Online Adventure* (Ducheneaut et Moore 2004).

Les travaux étudiant l'impact des avatars peuvent s'analyser selon des perspectives et des critères très variés.

Une première direction de travaux vise à évaluer l'impact de certaines propriétés des avatars relativement à l'utilisabilité du dispositif, à la performance des utilisateurs (par exemple en matière de facilitation de l'interaction avec le dispositif, de tâches à réaliser ou d'objectif à atteindre) et à leur satisfaction. Dans le cas où la tâche implique plusieurs utilisateurs, les propriétés de l'avatar peuvent être aussi étudiées relativement à l'efficacité de la communication et de la collaboration entre participants distants. Certains travaux ont tenté ainsi de formuler des principes de conception (Salem *et al.*, 2000 et Gaggioli *et al.*, 2003) concernant les propriétés des représentations et l'information convoyée par l'avatar à différents niveaux : social, conversationnel (postures, expression faciale, gestes de la main). Toutefois, les principes qu'ils proposent ne sont pas toujours fondés sur des résultats, ni évalués de façon systématique. Parmi les résultats et principes souvent rapportés, on peut mentionner que les propriétés de l'avatar doivent être alignées avec les caractéristiques de la tâche (par exemple en matière de degré de liberté et de correspondance entre l'espace virtuel et l'espace réel) et des indices clairs sur les possibilités d'actions doivent être fournis à l'utilisateur pour faciliter l'interaction (« affordances »).

Si la plus-value de la fourniture d'avatars réaliste est souvent affirmée, les premiers travaux sur ce thème souffrent cependant d'une absence de consensus sur la notion même de « réalisme » : selon les auteurs, les avatars « réalistes » désignent une figuration précise de la personne réelle (par exemple en utilisant le flux vidéo), ou bien des dimensions variées du rendu graphique et de l'animation de l'avatar (suivi du regard, mouvement des lèvres en cohérence avec le son de parole) celui-ci apparaissant néanmoins comme un humain de synthèse. De plus, les travaux se sont rarement fondés sur des mesures de performances ou de comportement, privilégiant des mesures subjectives de dimensions telles que la présence, le « réalisme » perçu ou encore la crédibilité. En résumé, ces travaux suggèrent cependant que c'est moins la caractéristique anthropomorphe « réaliste » de l'avatar que l'homogénéité en matière de « réalisme » entre les différents éléments présents dans l'environnement virtuel qui amène la meilleure évaluation par les participants (Garau *et al.*, 2003), (Vinayagamoorthy *et al.*, 2004).

---

<sup>22</sup> Pour une version revisitée de ce travail, voir <http://users.rider.edu/~suler/psyber/psyav.html>.

La deuxième direction des travaux concerne l'effet des propriétés des avatars relativement à la psychologie des utilisateurs et aux processus sensori-moteurs, cognitifs et psychosociologiques en œuvre dans les mondes virtuels. Au-delà des travaux qui ont pu s'intéresser au lien entre présence et représentation de soi ou des autres dans l'environnement virtuel, trois grands axes semblent se dégager. Le premier concerne l'impact des caractéristiques de la représentation sur l'intégration visuo-proprioceptive et les modifications éventuellement entraînées. Le deuxième axe étudie l'influence des caractéristiques de l'avatar sur le comportement et les attitudes, effet désigné notamment par le terme d'effet « Proteus » dans la littérature. Cet effet désigne le phénomène selon lequel les caractéristiques de l'avatar qui représente l'utilisateur l'amène à adopter le comportement et les attitudes conformes avec ses caractéristiques ((Yee et Bailenson, 2007), (Ratan *et al.*, 2020)). Le troisième axe s'intéresse à « l'incarnation virtuelle » définie au travers de trois composantes relatives à l'expérience subjective de l'utilisateur (Kilteni *et al.*, 2012) :

- le sentiment de localisation de soi (*self-location*), c'est-à-dire l'expérience spatiale d'être dans un corps ;
- le sentiment d'agentivité (*agency*), c'est-à-dire la sensation d'être en contrôle de ses actions ;
- le sentiment d'appropriation de tout ou partie d'un corps (*body ownership*), c'est-à-dire le sentiment que le corps virtuel est la source des sensations ressenties. Selon Tsakiris (Tsakiris, 2010), celui-ci découle à la fois d'informations innées ou acquises par l'expérience de notre corps tout au long de notre vie, mais aussi de stimuli multisensoriels reçus à un instant donné, de sorte que des illusions corporelles peuvent être ressenties, donnant lieu à (i) des distorsions corporelles (*body distortions*), (ii) des expériences de décorporations (*out of body experience*) ou (iii) des illusions d'appropriation corporelle (*body ownership illusion*) qui peuvent concerner tout ou partie du corps.

Sur le plan méthodologique, on peut distinguer deux grandes familles d'études. Les premières, plus expérimentales, tentent de montrer l'influence de tel ou tel aspect de l'avatar sur des degrés très variés de l'activité et l'expérience des utilisateurs. Dans la mesure où l'utilisateur ne peut pas voir son propre corps lorsqu'il observe un environnement virtuel au travers d'un casque, les chercheurs se sont d'abord intéressés aux effets de différents types de représentation du corps afin de les rapprocher des caractéristiques spécifiques à l'utilisateur. Plus récemment, un second courant de recherche manipule volontairement les caractéristiques de l'avatar en vue de les éloigner de celle de l'utilisateur, dans le but d'étudier ou de modifier son comportement ou ses attitudes.

La seconde ligne d'études -d'orientation descriptive- concerne les usages établis, essentiellement par le truchement de méthodes d'investigation d'inspiration ethnologique. Ces dernières, ou les recherches adoptant une approche longitudinale, apportent un point de vue complémentaire. Elles suggèrent notamment que les avatars sont plus proches fonctionnellement du masque ou du costume qu'il plait à l'utilisateur d'endosser, que du reflet réaliste, « sans fard », de la personne dans le monde réel. La possibilité de créer et de changer d'avatars est ainsi une caractéristique importante des usages dans les environnements collaboratifs de communication, en même temps qu'une demande explicite des utilisateurs (Persson 2003), ainsi qu'un instrument essentiel pour la construction d'une identité sociale et d'une réputation à l'intérieur d'une communauté de joueurs par exemple (Ducheneaut *et al.*, 2006).

Ainsi, les effets des propriétés de l'avatar constituent un champ de recherche ouvert. Dans la suite de ce chapitre, le travail est cependant focalisé sur les données issues des études expérimentales.

#### 5.6.4 Revue sur les effets négatifs potentiels des caractéristiques formelles des avatars

Au-delà de littérature scientifique encore parcellaire aujourd'hui, l'effet des avatars constitue un sujet actuel et important dans la communauté scientifique. Ainsi, les articles cités ci-après sont très récents dans leur grande majorité. Le degré de connaissance et de compréhension des mécanismes et de l'impact négatif des propriétés des avatars reste toutefois encore limité, les recherches à venir devant permettre de les compléter. De plus, les études sur ces effets excluent la plupart du temps l'investigation d'applications potentiellement néfastes – notamment pour des raisons éthiques.

Les travaux en matière d'effets potentiels négatifs des caractéristiques des avatars peuvent être organisés autour de plusieurs thématiques plus ou moins indépendantes. Les sections ci-après rendent compte de ces thèmes et de l'avancement du travail. On distingue à ce stade la représentation de son propre corps dans un environnement virtuel de la représentation des autres.

Le cas de la réalité augmentée est abordé indifféremment dans les deux sections, la littérature étant trop limitée pour justifier un paragraphe dédié. Si la question des avatars comme représentation de soi pour soi apparaît essentiellement associée à la réalité virtuelle dans ces diverses déclinaisons (casque, salle immersive, écran), la représentation de soi pour les autres se retrouve dans la RV et la RA.

##### 5.6.4.1 Impact(s) des caractéristiques de la représentation de soi dans l'environnement virtuel sur soi au cours de l'expérience vécue

###### 5.6.4.1.1 **Impact du couplage des représentations constituant l'avatar sur l'intégration sensorielle et la performance**

Noël *et al.* (Noël *et al.*, 2018) ont cherché à comprendre l'importance du couplage entre les différents sens pour la représentation de son propre corps. Dans une expérience rassemblant 28 sujets immergés dans un environnement virtuel *via* un casque avec des capteurs de position sur les mains, ils testent l'importance des types de retour (visuel à une ou deux mains ou couplant visuel et proprioceptif) pour étudier l'intégration visuo-proprioceptive. Ils en concluent que plus le rendu du corps est sophistiqué, plus l'attente des observateurs en matière de rendu proprioceptif est important. Pour autant, ce rendu visuel pris seul n'impacte guère la précision ou la robustesse de la tâche effectuée. On peut noter que, selon Noël *et al.* (Noël *et al.*, 2018), la sensation d'appropriation corporelle (« *body ownership* ») pourrait être liée au couplage entre les différents sens pour la représentation de son propre corps, couplage peu voire pas pris en compte dans les travaux sur l'appropriation.

###### 5.6.4.1.2 **Incarnation (*embodiment*) et *body awareness***

Très récemment, Dewez *et al.* (Dewez *et al.*, 2019) se sont intéressés aux différents facteurs susceptibles d'impacter le sentiment d'incarnation virtuelle. Les auteurs ont réalisé une expérience avec 123 participants. L'étude se déroulait en 3 phases : une phase d'adaptation, une phase d'induction dans laquelle le sujet devait reproduire des tâches visuo-motrices et enfin une phase de menace dans laquelle un avatar externe venait planter un couteau dans la main virtuelle du participant (la menace est utilisée dans de nombreuses études sur les avatars pour mesurer le sentiment d'incarnation). Le résultat principal concerne les liens entre certaines caractéristiques individuelles (sexe, croyances sur le sentiment de contrôle) et le sentiment d'incarnation virtuelle (notamment sentiment d'agentivité et sentiment d'appropriation). La menace elle-même n'engendre que peu de réactions chez les participants, les auteurs observant cependant une corrélation avec une dimension de la personnalité (neuroticisme, c'est-à-dire une tendance à vivre des émotions négatives : colère, hostilité, dépression, anxiété).

Waltemate *et al.* (Waltemate *et al.*, 2018) ont étudié l'effet de la personnalisation de l'avatar (fondée sur la capture vidéo et l'enregistrement des caractéristiques corporelle du participant) et du type d'immersion (casque *versus* face d'une salle immersive) notamment sur le sentiment d'appropriation corporelle. Comme dans un bon nombre d'expériences d'incarnation, les auteurs utilisent des miroirs dans l'environnement virtuel pour aider (ou forcer ?) les participants à regarder la représentation de leur corps. Les résultats montrent notamment que la personnalisation augmente l'appropriation du corps, tandis que l'effet du type d'immersion ne semble pas avéré. Toutefois, une limitation importante est la forte latence relevée par les auteurs dans l'expérience.

#### 5.6.4.2 Impact(s) des caractéristiques de la représentation de soi dans l'environnement virtuel sur son propre comportement dans l'EV ou ultérieurement dans le monde réel (effet « proteus »)

Les avatars peuvent être utilisés dans le but d'avoir un impact sur le comportement des participants au cours d'une expérience de réalité virtuelle. Souvent désigné par les termes « effet proteus », cet effet est analysé principalement sous l'angle de deux principales théories : la théorie de l'auto-perception (self-perception ; (Bern, 1972)) selon laquelle une personne infère ses attitudes et son état interne sur la base des indices externes extrait à partir de l'observation de sa propre apparence et, la théorie de l'amorçage (*priming*) selon laquelle ce qui est perçu dans le contexte situationnel active incidemment des constructions en mémoire, par exemple des stéréotypes, qui vont *in fine* favoriser la sélection des comportements les plus congruents avec la connaissance activée (Pena *et al.*, 2009). Ainsi, plusieurs études témoignent d'un effet des caractéristiques de l'avatar sur le comportement, l'attitude ou la performance lors d'une séance en environnement virtuel et/ou immédiatement après, dans des tâches et sur des indicateurs variés (par exemple recalibration perceptivo-motrice dans une tâche de pointage (Day *et al.*, 2018) performance créative accrue (Guegan *et al.*, 2016 ; Buisine et Guegan, 2020), vitesse de marche (Reinhardt *et al.*, 2020) influencée par le stéréotype d'âge figuré par l'avatar, activité physique accrue (Navarro *et al.*, 2020), degré d'agressivité d'une production textuelle, etc.). Par exemple, Fox *et al.* (Fox *et al.*, 2013) mettent en place une expérience comparant les effets de l'habillement de l'avatar (plus ou moins sexualisé) et ceux de l'utilisation d'un visage générique ou personnalisé sur la représentation du corps. Sans surprise, les avatars habillés de façon plus sexualisés sont perçus comme tels et ceux présentant des visages réalistes sont considérés comme plus ressemblants par les 86 participantes. L'habillement de l'avatar présente un effet significatif sur les pensées liées au corps. Les auteurs notent également un effet du type de visage sur l'acceptation des mythes du viol mais pas de l'habillement. Sur le même registre, Kilteni (Kilteni *et al.*, 2013) montre aussi que le fait de s'incarner dans des corps et vêtements différents modifie la manière dont on peut jouer de la musique. Selon cet auteur, les changements comportementaux sont susceptibles d'intervenir lorsque le corps virtuel paraît plus apte à réaliser une tâche que le corps réel. Une méta-analyse récente de cette littérature (Ratan *et al.*, 2020) suggère - sur la base de 46 articles sélectionnés pour présenter une manipulation expérimentale randomisée des caractéristiques des avatars - l'existence d'un effet robuste de taille faible à moyenne.

Certains de ces travaux observent la persistance d'une telle influence, au-delà de l'immersion dans le virtuel, sur le comportement dans l'environnement réel. C'est le cas par exemple de l'une des études de Yee (Yee *et al.*, 2009) qui montre qu'après une manipulation de la taille de l'avatar, les participants affublés d'un avatar de plus grande taille dans l'environnement virtuel y exhibent un comportement plus agressif lors d'une tâche de négociation, et que cette agressivité supérieure est également observée un quart d'heure plus tard lors d'une négociation subséquente en face-à-face, par comparaison avec les participants dotés d'un avatar de plus petite taille. C'est aussi ce que suggèrent plus récemment les travaux de Bertrand *et al.* (Bertrand *et al.*, 2018), même si ces auteurs ne mènent pas directement d'expériences en ce sens : ils émettent l'idée que les avatars peuvent être utilisés pour générer

de l'empathie s'appuyant sur les différents types de formation à l'empathie ainsi que sur certains travaux menés dans le laboratoire de Slater à Barcelone ou celui de Bailenson à Stanford. À noter que certains travaux utilisent aussi des représentations d'avatars d'autres personnes, ce qui rend la classification non univoque. De plus, suivant les études, l'avatar peut être présenté au sujet comme sa représentation, ou bien comme la représentation d'une autre personne avec laquelle on lui demande de partager ou prendre le point de vue.

Certains chercheurs ont tenté de modifier la représentation de son propre corps, soit directement soit indirectement, pour mettre en évidence des changements de comportements. Normand *et al.* (Normand *et al.*, 2011) démontrent ainsi qu'il est possible, sous certaines conditions, de s'incarner dans un corps dont le ventre a été largement agrandi. Il est intéressant de constater que le degré d'illusion est corrélé positivement avec l'estimation de la différence, par les participants, avec leur ventre réel, induisant ici le fait que la perception de leur corps réel a été modifiée, au moins à court terme. Différentes autres modifications du corps sont proposées : Kilteni et Normand (Kilteni *et al.*, 2012) étudient l'incarnation virtuelle pour l'appropriation d'un corps virtuel asymétrique dont l'un des deux bras a été allongé ; Hoyet *et al.* (Hoyet *et al.*, 2016) ajoutent un sixième doigt à une main, les exemples sont nombreux. Certains vont au-delà du simple sentiment d'incarnation ou d'acceptation et commencent à étudier les modifications de comportement induites, volontairement ou non. Ainsi, Verhulst *et al.* (Verhulst *et al.*, 2018) utilisent l'immersion dans un corps obèse pour étudier l'influence de cette représentation sur les comportements d'achats alimentaires. Il n'y a pas d'achats significativement différents, mais le rapport à la nourriture est différent, qu'il en soit de la qualité nutritive des aliments ou de la perception de certains prix.

Plus avant encore, Peck *et al.* (Peck *et al.*, 2013) vont jusqu'à incarner un participant blanc de l'expérience dans un personnage avec une peau noire. L'incarnation fonctionne et elle démontre ainsi que les préjugés raciaux implicites décroissent après cette phase d'incarnation. Ce second test est effectué 3 jours après, ce qui tend à accréditer qu'il soit possible d'avoir des effets persistants de l'incarnation. Cette théorie est largement abordée dans la thèse de Domna Banakou (Banakou 2017) dans le laboratoire de Slater qui porte sur l'impact de l'incarnation sur la perception, les attitudes et le comportement. Très récemment, Neyret *et al.* (Neyret *et al.*, 2020) se sont intéressés aux conséquences de l'incarnation d'hommes dans le corps d'une victime de harcèlement sexuel dans une expérience de Milgram se déroulant une semaine plus tard : par rapport à un groupe de contrôle qui n'a pas subi cette expérience de harcèlement, les « harcelés » ont fait subir environ 2 fois moins de chocs électriques. Malgré tout, ces études restent parcellaires et il est difficile d'en tirer une conclusion définitive.

Enfin, on peut citer les travaux de Rosenberg (Rosenberg *et al.*, 2013), dont l'idée générale est d'offrir des superpouvoirs aux participants dans le monde virtuel puis d'examiner leur comportement dans les mondes virtuel et réel. Ainsi, il compare deux types de personnages (*Superman versus* un passager d'un hélicoptère) effectuant diverses tâches dans un environnement virtuel. À la fin de l'expérience, l'expérimentatrice faisait tomber volontairement un pot de crayons et le vrai but de l'étude portait sur l'aide apportée à celle-ci pour ramasser les crayons. Il apparaît que :

- ceux qui avaient des superpouvoirs étaient plus susceptibles d'aider à ramasser les crayons (et en ont ramassé plus) ;
- la tâche effectuée n'a pas d'effet ;
- les sujets ayant des super-pouvoirs ont montré un peu plus de présence ;
- il n'existe pas de différence significative sur la volonté d'aider les autres.

On assiste bien ici à une forme de modification implicite du comportement induite par l'expérience de réalité virtuelle.

Enfin, très récemment, Pouke *et al.* (Pouke *et al.*, 2020) ont cherché à établir l'effet de l'échelle sur la compréhension du monde physique : ils ont immergé les 44 sujets de leur expérience dans un monde virtuel où ils étaient visuellement positionnés et reproduits à une échelle

réduite (échelle 1/10). Les humains prenant leur taille visible comme élément de référence pour la perception des caractéristiques des éléments de l'environnement, il était attendu que cela impacte le réalisme perçu du mouvement. La tâche consistait à faire tomber puis à lancer des opercules de canettes de soda dans deux conditions expérimentales manipulant le degré d'appariement des lois physiques : la première (appelée *true physics*) reproduit les lois de la physique réaliste pour l'objet lancé depuis la position réduite à l'échelle 1/10, en cohérence avec la scène visuelle présentée au sujet ; la seconde (appelée *movie physics*) utilise une physique modifiée en ce qu'elle est calculée sur la base d'une position de lancement de l'objet accrue d'un facteur 10. Or cette dernière condition est perçue comme plus plausible et conforme aux attentes et préférences des participants. La conclusion qu'en tirent les auteurs est que les changements d'échelle de représentation ont tendance à affecter la perception de la plausibilité et du réalisme du comportement physique des objets virtuels. Toutefois, il faut noter que, dans cette étude, il n'y avait pas de prise en compte de la masse.

#### 5.6.4.3 Impact(s) des caractéristiques (de la représentation/de la présence) d'autres avatars dans l'environnement virtuel sur soi

Les travaux sur la représentation d'autres êtres humains sont plus nombreux que ceux sur la représentation de son propre corps. De fait, les représentations d'autres utilisateurs ou de personnages virtuels ne nécessitent pas de recourir à un matériel sophistiqué comme un casque de réalité virtuelle du point de vue de celui qui les regardent. Les avatars sont d'ailleurs utilisés depuis de nombreuses années, notamment dans les jeux vidéo. Centrés d'abord sur les aspects techniques et une sorte de course au réalisme visuel, les travaux sur la représentation se sont progressivement intéressés à des situations impliquant des interactions entre plusieurs (au moins deux) avatars et donc aussi à la dimension sociale de ces représentations.

Sur un plan technique, Choi *et al.* (Choi *et al.*, 2020) ont étudié l'impact de la représentation visuelle statique et dynamique d'un avatar dans un contexte de téléprésence. L'expérience avec 44 participants s'est déroulée dans un environnement virtuel avec casque, les variables étudiées étaient : la vitesse et le type de marche, le point de vue sur l'avatar, la proportion du corps visible (*full body* ou des mains aux genoux). Les mesures portent sur la naturalité perçue, la similarité entre mouvements, préservation de l'intention de mouvement et les préférences. Les auteurs notent dans leurs résultats un effet significatif positif de l'augmentation de la vitesse de marche, peu d'effet du type de marche ou de la proportion visible du corps. Par ailleurs, ils ne constatent pas d'effet général du point de vue mais une interaction avec la naturalité en fonction du type de marche.

Latoschik *et al.* (Latoschik *et al.*, 2019) ont étudié l'impact d'une réalité virtuelle sociale sur les participants en travaillant sur des représentations très réalistes des avatars. Dans leur dernière étude, 45 participants ont été exposés au moyen de 3 types de casques (*Rift*, *Vive* et *Vive Pro*) et l'effet du nombre d'avatars présents sur le sentiment de co-présence est évalué. Les auteurs montrent que le sentiment de co-présence augmente avec le nombre d'avatars présents dans la scène (au moins jusqu'à 25 avatars, mais on peut estimer que cette borne supérieure est une limitation technique). Pour autant, la co-présence apparaît moins marquée avec des avatars complètement réalistes qu'avec des avatars à l'apparence artificielle, tandis qu'aucun sentiment d'humanité n'est perçu chez ces derniers. D'un point de vue plus qualitatif, les auteurs ajoutent que certains participants prêtent des intentions aux avatars, et que passé un certain nombre d'avatars présents dans la scène, la situation est même considérée comme accablante par certains participants (nombre d'avatars et de participants non communiqués). Roth *et al.* (Roth *et al.*, 2016) supposent quant à eux que les interactions sociales sont gênées dans le cas d'avatars non réalistes. Une étude similaire (Latoschik *et al.*, 2017) menée sur 20 sujets, avec des avatars représentés par des bonshommes articulés en bois, montre un effet

du réalisme de l'avatar sur l'humanité perçue ainsi que sur l'acceptation mais met en avant un possible phénomène d'« *Uncanny Valley* » ou « vallée dérangement »<sup>23</sup> (Mori *et al.*, 2012).

Ces travaux ont été récemment poursuivis par Roth (Roth *et al.*, 2019) qui travaille sur l'expressivité des avatars. Son étude effectuée en ligne avec 172 participants ne rentre donc pas tout à fait dans le cadre de la réalité virtuelle, mais il paraît néanmoins intéressant de la citer ici. L'objectif est de comparer l'authenticité perçue, l'empathie cognitive et émotionnelle ainsi que les intentions pro-sociales entre des avatars animés (2 niveaux d'expressivité) et de véritables acteurs filmés en vidéo. Il est intéressant de constater que les avatars ont parfois été perçus comme plus authentiques que les acteurs. Aucun effet significatif n'a été démontré sur le niveau d'empathie, quelques effets d'interaction existent néanmoins : effet de l'authenticité sur l'empathie, de l'empathie sur les comportements pro-sociaux. La portée de cette expérience reste limitée (un seul acteur qui n'est pas considéré par les participants comme quelqu'un disant la vérité, la mesure de l'authenticité est faible), des expériences complémentaires sont nécessaires pour pouvoir envisager une généralisation.

Yoon *et al.* (Yoon *et al.*, 2019) ont étudié l'effet de l'apparence des avatars sur la présence sociale dans un contexte de réalité augmentée à travers deux études utilisateur. Les conditions étudiées étaient : représentation d'un corps entier réaliste, représentation réaliste de la partie haute du corps, représentation réaliste du visage et des mains, et les 3 mêmes conditions dans lesquelles une représentation de type dessin animé (*cartoon*) est utilisée. Dans une application de RA où un avatar, animé par un acteur, est présent, les participants doivent (1) résoudre des problèmes de mots croisés en collaboration avec l'avatar de l'acteur, (2) effectuer du placement de mobilier. Chaque expérience est effectuée avec 24 participants qui doivent également répondre à des questionnaires de présence sociale. Les résultats montrent une influence significative de la partie du corps sur la présence sociale : la visibilité de l'ensemble du corps est partiellement corrélée positivement à la présence sociale tandis que voir seulement ses mains et son visage conduit à la plus petite présence sociale. Enfin, il n'y a pas d'incidence significative du réalisme de la représentation (réaliste ou *cartoonesque*).

Wang *et al.* (Wang *et al.*, 2019) ont étendu cette exploration des caractéristiques des avatars à la multi-modalité dans un contexte de réalité augmentée. Les auteurs comparent les effets de représentation par la voix uniquement avec une représentation non humaine, un humain à l'échelle 1/1 et un humain miniature. La tâche consiste à retrouver un objet caché à l'aide d'un agent conversationnel. La tâche est représentée sur un écran en face du participant tandis que l'agent est représenté virtuellement dans un *Hololens* (casque de réalité mixte autonome). Vingt-quatre sujets ont participé à l'étude. Les résultats montrent que les facteurs étudiés n'ont pas d'influence significative sur le temps d'achèvement de la tâche. En revanche, il existe un effet de l'apparence sur le nombre de fois où le participant regarde l'agent quand celui-ci s'exprime, ainsi que sur la présence et le réalisme perçus. C'est l'humain miniature qui emporte le maximum d'adhésion. L'hypothèse des auteurs est qu'un humain « trop réaliste » soit un indicateur d'*Uncanny Valley* (Mori *et al.*, 2012). Toutefois, ils s'accordent aussi à dire que le faible champ de vision de l'*Hololens* contribue à limiter la portée des résultats de leur étude.

### 5.6.5 Conclusion

L'effet de deux grands types d'usage des avatars sont étudiés : les avatars utilisés pour la représentation de soi et les avatars utilisés pour représenter les autres participants dans une

---

<sup>23</sup> Masahiro Mori observe que l'affinité pour les robots augmente en fonction de leur ressemblance à l'humain, jusqu'à un certain point. Cependant, entre le premier pic d'affinité et le second d'indifférenciation humaine se trouve la « vallée de l'étrange ». Mori conseille aux créateurs d'éviter cette vallée et de viser le premier pic. *Une apparence presque totalement humaine au point de pouvoir provoquer la confusion, une sensation d'étrangeté est provoquée par chacun de ses aspects non-humains* » <https://journals.openedition.org/ephaistos/5333>.

expérience de réalité virtuelle orientée vers la collaboration. Les premiers sont souvent utilisés dans des applications thérapeutiques ou les jeux vidéo. Dans ces deux domaines, ils peuvent être considérés comme des représentations crédibles d'êtres humains dans des conditions variables, mais qui laissent penser que la congruence des sens est un facteur positif ainsi qu'une forme de réalisme, probablement plus comportemental que visuel. Le dépassement d'un certain seuil de qualité visuelle, surtout s'il n'est pas accompagné d'autres types de perception semble au contraire être une forme de limite qui serait conforme à l'idée d'*Uncanny Valley* de Mori (Mori *et al.*, 2012).

Dans un autre registre, la question de l'avertissement de l'utilisateur est posée – ne serait-ce que sur le plan éthique – concernant la nature des artefacts virtuels avec lesquels il est amené à interagir. Ainsi, quelle confiance – concernant les apparences, les attitudes et les comportements – est-il possible d'accorder à un interlocuteur virtuel lors d'interactions médiatisées en environnement virtuel ? La question se complique du fait que la présence de l'avatar d'un utilisateur réel n'exclut pas le fait que celui qu'il représente soit absent : des travaux commencent à proposer des techniques hybrides agent-avatar où l'interaction est prise en charge par un agent lors de l'absence de l'utilisateur réel (Gerhard *et al.*, 2004).

En ce qui concerne la modification de la représentation de soi, le sujet est investigué depuis peu en raison des progrès récents en matière de casques, et les études sont très parcellaires. Néanmoins, les études rassemblées indiquent que le sentiment d'incarnation dans un corps similaire ou légèrement différent du nôtre (avatar) a une influence. Cette influence, pas simplement liée à des critères de plaisir ou de réalisme, semble être, d'après quelques études, bien réelle et se traduit par des modifications du comportement. Si les études montrent principalement des modifications du comportement considérées comme « positives » (comportement plus social, moins sensible aux stéréotypes de genre ou racistes), l'utilisation d'avatar pourrait également être « néfaste », même si cela n'a pas été à proprement parler étudié, pour des motifs éthiques. L'utilisation d'avatar peut donc être considérée comme problématique et les données disponibles suffisent à souligner une nécessaire vigilance.

La plupart des études montrent des modifications pendant l'expérience ou peu de temps après celle-ci, mais d'autres tendent à démontrer des effets post-expositions, même après plusieurs jours. On pourra citer aussi l'étude très particulière en matière d'incarnation puisqu'elle parle de décorporation (*Out-of body illusion*) de Barberia *et al.* (Barberia *et al.*, 2018) qui observe des modifications de rapport à la vie à long terme après une expérience de mort imminente. Cette étude est néanmoins la seule disponible sur les effets post-exposition et il serait risqué de conclure trop vite quant aux effets à long terme.

En raison du faible nombre d'études disponibles sur ce sujet, il n'est pas possible de statuer sur le niveau de preuve associé à cet effet. Il conviendrait avant tout de produire de nouvelles données afin de mieux comprendre les effets de l'incarnation dans un avatar et d'évaluer le niveau de preuve apporté par ces études. La conduite d'études provoquant de manière volontaire, par le contenu utilisé par exemple, des effets néfastes, pose évidemment des questionnements éthiques. Même si certaines données montrent que les mécanismes impliqués dans la survenue de modifications comportementales néfastes peuvent être spécifiques, les études conduisant à des effets positifs pourraient s'avérer utiles pour mieux comprendre l'influence de l'avatar.

Même en l'absence de certitude, la question d'avertir l'utilisateur sur les effets potentiels se pose clairement. En fonction des connaissances produites et du niveau de preuve sur la modification des comportements par l'utilisation d'avatars, il conviendrait d'envisager que l'utilisation d'un avatar s'accompagne d'une mention d'avertissement.

Enfin, en matière d'éthique de la conception, il convient de se questionner sur la façon dont les constructeurs s'assurent, sachant que le système peut avoir une influence, de réduire ou prévenir cet effet.

## 5.7 Effets liés aux agents physiques émis par les dispositifs de réalité virtuelle (casques et téléphones)

### 5.7.1 Champs électromagnétiques

Les sources identifiées d'émissions de champs électromagnétiques par les dispositifs de réalité virtuelle sont d'une part les émetteurs radiofréquences qui transmettent du contenu entre le casque et l'ordinateur ou les capteurs externes (type *Bluetooth* ou Wi-Fi, émetteur 3G ou 4G) et d'autre part l'électronique embarquée dans un casque (écran, capteurs, composants, cartes et circuits).

Les bandes de fréquences identifiées lors des mesures de champs électromagnétiques émis par les dispositifs de réalité virtuelle (cf. chapitre 6.2.3.2) sont situées entre quelques kHz et quelques MHz et une bande dans le domaine des champs radiofréquences entre 700 MHz et 6 GHz. Les niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques auxquels sont soumis les utilisateurs de dispositifs de réalité virtuelle sont très faibles et bien en-dessous des valeurs limites d'exposition préconisées par l'Icnirp<sup>24</sup>.

Les conclusions des récentes expertises collectives publiées par l'Anses ne mettent pas en évidence de lien de cause à effet démontré entre l'exposition aux champs électromagnétiques émis par des dispositifs de communication grand public et d'éventuels effets sanitaires. Bien que les éléments de preuve en faveur de l'existence d'effets soient insuffisants dans les études chez l'humain (cliniques et épidémiologiques), les expertises font cependant apparaître, avec des niveaux de preuve limités, différents effets sur des modèles animaux et cellulaires concernant le sommeil, la fertilité mâle ou encore les performances cognitives.

### 5.7.2 Lumière bleue

Les utilisateurs de dispositifs de réalité virtuelle sont exposés aux rayonnements optiques issus des écrans et plus particulièrement à la lumière bleue émise par ces derniers, notamment lors du port d'un casque. La source de rayonnement lors de cette exposition est à très courte distance des yeux. L'exposition à la lumière bleue est à considérer sous deux angles : la quantité et la composition spectrale de lumière bleue reçue sur la rétine d'une part, et le moment dans la journée où cette exposition a lieu d'autre part.

En effet, la phototoxicité de la lumière bleue dépend de la quantité de lumière bleue reçue par la rétine mais aussi du moment de la journée à laquelle on est exposé. Enfin, la perturbation des rythmes circadiens est, elle, très dépendante du moment de la journée auquel a lieu l'exposition.

Dans son rapport de 2019 sur les effets sur la santé humaine et sur l'environnement des diodes électroluminescentes (Anses, 2019), l'Anses a conclu que :

- l'effet de la lumière riche en bleu sur la toxicité rétinienne à *court terme est avéré* ;
- l'effet d'une lumière riche en bleu sur *le long terme sur la contribution à la survenue de DMLA est avéré* ;
- la perturbation des rythmes circadiens par *l'exposition à une lumière riche en lumière bleue en soirée ou la nuit est avérée*.

La perturbation des rythmes circadiens peut contribuer à la survenue de nombreux effets sanitaires : perturbation de la qualité et de la durée du sommeil, troubles métaboliques, cancer, obésité, pathologies cardiovasculaires, effets sur la santé psychique, ... Cependant, le lien

---

<sup>24</sup> Voir les différents rapports d'expertise publiés par l'Anses sur les effets des champs électromagnétiques sur la santé. <https://www.anses.fr/fr/content/radiofr%C3%A9quences-et-sant%C3%A9-0>.

direct entre l'exposition à la lumière riche en lumière bleue la nuit et ces effets sanitaires, bien que fortement suspecté, n'a pas encore été établi à ce jour chez l'humain.

Les niveaux d'exposition (luminance) à la lumière issue des écrans de réalité virtuelle sont faibles mais la lumière peut être riche en bleu. Ainsi, la question d'une exposition longue durée à courte distance des yeux peut poser question et toute exposition avant le coucher peut interférer avec la régulation des rythmes circadiens.

### 5.7.3 Modulation temporelle de la lumière

La lumière émise par les écrans des dispositifs de RV peut présenter une modulation temporelle de la lumière, c'est-à-dire que l'intensité lumineuse varie en fonction du temps, avec une succession de phases où l'écran s'allume et s'éteint. Parfois, ces clignotements de la lumière se font à de telles des fréquences que l'œil humain ne peut pas les percevoir, trop rapides pour être visibles. Même si cette modulation temporelle de la lumière n'est pas toujours visible, selon la fréquence de cette modulation (clignotement), des effets sanitaires ont été rapportés dans la littérature scientifique : déclenchement de crises d'épilepsie chez les personnes souffrant de crises d'épilepsie pour des fréquences autour de 15 Hz (entre 1 et 90 Hz), fatigue visuelle, maux de tête ou migraines pour des fréquences de l'ordre de 90 Hz (entre 60 et 120 Hz).

La modulation temporelle de la lumière se caractérise par deux éléments : sa fréquence de modulation et son taux de modulation. Il est généralement admis que des taux de modulation supérieurs à 15 % peuvent être associés à des symptômes.

Dans son rapport de 2019 sur les effets sur la santé humaine et sur l'environnement des diodes électroluminescentes (Anses, 2019), l'Anses a conclu que :

- les éléments de preuve disponibles chez l'humain concernant le déclenchement de crises d'épilepsie chez les personnes souffrant de crises d'épilepsie par l'exposition à la lumière modulée (fréquence de modulation entre 1 et 80 Hz) sont suffisants. *L'effet de la modulation temporelle de la lumière sur le déclenchement de crises d'épilepsie est donc avéré ;*
- les éléments de preuve disponibles chez l'humain sur la fatigue visuelle, le déclenchement de maux de tête, de migraines causés par la modulation temporelle de la lumière (fréquence de modulation entre 50 et 120 Hz) sont limités. Il n'existe pas de données scientifiques chez l'animal. *L'effet de la modulation temporelle de la lumière sur la fatigue visuelle est possible.*

### 5.7.4 Bruit

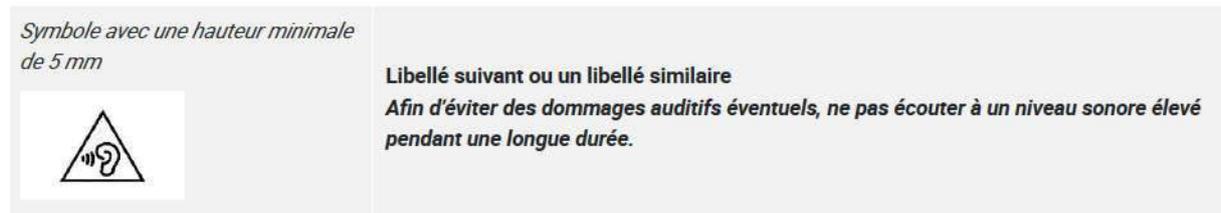
Une exposition à un dispositif de réalité virtuelle peut exposer l'utilisateur à un niveau de bruit lié à l'application utilisée. L'Anses n'a pas procédé à des mesures de son des dispositifs de RV mais les effets du bruit sur l'audition devraient être considérés. Pour rappel, l'OMS estime qu'1,1 milliards d'adolescents et de jeunes adultes sont exposés au risque de déficience auditive à cause de l'utilisation dangereuse de dispositifs audio personnels et de l'exposition à des niveaux sonores nocifs dans certains lieux de loisirs, comme les boîtes de nuit, les bars, les festivals.

Les appareils (tout appareil portable – dont les baladeurs – permettant l'écoute de sons *via* un dispositif d'écoute) et les dispositifs d'écoute – tels que casques ou oreillettes – vendus seuls, doivent satisfaire aux exigences de sécurité posées par le Code de la santé publique ou le Code des postes et communications électroniques, selon qu'il s'agit d'appareils non connectés ou d'appareils radioélectriques (*smartphones*, casques *Bluetooth*). Des normes européennes définissent les règles techniques dont le respect permet aux professionnels de justifier le respect des exigences de sécurité.

S'agissant des exigences de conception, la puissance sonore maximale de sortie d'un baladeur musical ne peut ainsi excéder 100 dB(A) et l'utilisateur doit être informé lorsque le niveau sonore dépasse 85 dB(A).

Les recherches sur la perte auditive ont permis de déterminer que l'exposition à un niveau moyen de bruit continu supérieur à 85 dB(A), 8 heures/jour, ou l'exposition à des bruits impulsionnels même de courte durée (< 2 secondes), suffisent pour provoquer des pertes auditives.

La réglementation prévoit également la présence de mentions obligatoires sur les appareils (et non sur les dispositifs d'écoute) : le pictogramme et l'avertissement ci-après doivent être apposés sur l'appareil, sur l'emballage ou dans la notice d'utilisation (cf. Figure 76).



**Figure 76 : pictogramme et avertissement à apposer sur l'appareil, l'emballage ou la notice des appareils.**

<https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Publications/Vie-pratique/Fiches-pratiques/Baladeur-numerique>.

## 5.8 Autres effets

### 5.8.1 Effets sur le développement

À ce jour, il n'existe pas de données s'intéressant aux effets sur le développement d'une exposition à la réalité virtuelle, que ce soit sur des modèles ou chez l'humain. Les données ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'effets sur le développement lors d'une exposition à la réalité virtuelle ou augmentée.

### 5.8.2 Effets neurologiques néfastes

À ce jour, il n'existe pas de données s'intéressant aux effets neurologiques néfastes d'une exposition à la réalité virtuelle, que ce soit sur des modèles ou chez l'humain.

Des travaux chez le rat (Aghajan *et al.*, 2014) ont mis en évidence que les activations neuronales n'étaient pas identiques en réalité virtuelle et dans le monde réel, sans doute parce que naviguer en réalité virtuelle ne comporte pas encore la même richesse sensorielle que naviguer dans le monde réel. Ces travaux ne portaient donc pas directement sur les effets neurologiques néfastes de la réalité virtuelle.

Les données ne permettent donc pas de conclure à l'existence ou non d'effets neurologiques néfastes lors d'une exposition à la réalité virtuelle.

## 6 Caractérisation de l'exposition de la population générale et des travailleurs à la réalité virtuelle

### 6.1 Caractérisation des usages et de l'exposition aux technologies de réalité virtuelle, augmentée ou mixte

#### 6.1.1 Contexte et objectifs

La présente partie se focalise sur les expositions associées à la variété des usages de la réalité virtuelle et augmentée. Dans une approche d'évaluation des risques sanitaires, il apparaît essentiel de caractériser autant que possible l'exposition de la population (travailleurs et population générale) à la réalité virtuelle et augmentée. Dans cette section, il s'agit donc de documenter autant que possible le niveau réel des expositions des personnes concernées dans le but, à terme, de pouvoir évaluer le risque en matière d'effets délétères, c'est-à-dire de dommages à l'intégrité mentale ou physique de la personne qui pourraient en résulter.

Caractériser l'exposition actuelle aux technologies de réalité virtuelle, augmentée et mixte est difficile, au-delà des apparences liées à la médiatisation de certaines applications phares ou de certains dispositifs. Cela nécessite en effet de préciser plusieurs éléments, et notamment :

- quelle(s) population(s) ;
- quels équipements et quels contenus ;
- dans quelle situation/contexte et pour quel usage ;
- combien de temps et à quelle fréquence.

Il existe peu de données concernant ces différents éléments en France, comme à l'international, ces données souffrant par ailleurs de plusieurs limites. Les usages par le grand public des technologies de réalité virtuelle (RV) et/ou augmentée (RA) sont récents et encore aujourd'hui peu documentés. La majorité des publications scientifiques porte sur des prototypes et des systèmes testés en laboratoire, tandis que peu de données sont publiées ou accessibles sur les usages réels en situation professionnelle ou dans d'autres champs tels que l'apprentissage et l'éducation, l'usage dans le cadre de thérapies en cabinet, etc.

La documentation de l'exposition permet, au-delà de servir une approche quantitative ou qualitative d'évaluation des risques sanitaires, de rapporter les comportements des usagers et donc les situations d'exposition réelles. Ces éléments confrontés à ceux décrits dans les études sur les effets de la réalité virtuelle sur la santé doivent aussi rendre possible l'identification de situations non documentées ou la confirmation de l'adéquation de la recherche avec les situations de terrain.

#### 6.1.2 Méthode

Afin de caractériser l'exposition de la population à la réalité virtuelle et augmentée, le groupe de travail s'est appuyé d'une part sur l'exploitation des rares enquêtes recensées à travers la littérature scientifique et grise et, d'autre part, sur l'exploitation des données de deux études récentes menées sous l'égide de l'Anses. Dans la première, l'Anses a sollicité l'institut *OpinionWay* afin qu'il réalise un sondage pour mieux connaître les usages de la RV et de la RA par la population générale, dont les enfants, dans différents contextes d'usage (salle de jeux, domicile, thérapeutique) et dans la sphère privée ou professionnelle. La seconde étude de l'Anses a consisté à recueillir des informations sur l'exposition des personnes *via* l'administration d'un questionnaire en ligne à différents organismes utilisateurs des dispositifs de RV et/ou de RA (universitaires, thérapeutes, etc.).

Les données issues des différentes études et enquêtes sont détaillées ci-dessous. Elles sont présentées en deux parties sur la base de l'approche et de l'objectif poursuivis :

- les études adoptant une approche qualitative ; celles-ci n'ont pas pour objectif de tirer des conclusions généralisables, mais plutôt de rendre visibles l'étendue et la variété d'usages et de préciser les situations concrètes d'usage - certains en train d'émerger - à un instant donné ; ces usages et situations ont d'ailleurs probablement au moins partiellement évolué depuis la réalisation des études ;
- les études par échantillonnage ; celles-ci, moins riches et détaillées, ont l'objectif de réaliser une photographie représentative de la population et des usages qui y prennent place.

### **6.1.3 Résultats des études adoptant une approche qualitative : illustrer et rendre visible la variété et l'étendue des types et situations concrètes d'usages et d'exposition**

#### **6.1.3.1 Les études exploitées**

Trois études, principalement qualitatives, permettent, à partir d'exemples et de premières données issues du terrain, d'éclairer des usages variés et concrets dans deux domaines particuliers, le domaine éducatif et scolaire, et la culture :

- une enquête en ligne a été réalisée par l'Agence des usages du réseau Canopé du 6 novembre 2017 au 28 février 2018 ;
- une étude sur les « Expériences immersives, des nouvelles pratiques culturelles dans l'espace public »<sup>25</sup> réalisée en avril 2019 ;
- une étude menée par l'Anses par questionnaire en ligne auprès des différents organismes qui proposent ou utilisent des dispositifs de RV et/ou de RA (universitaires, thérapeutes, etc.) réalisée en février 2020.

#### **6.1.3.2 Les usages dans le champ éducatif et scolaire**

##### **Méthode**

Une enquête en ligne a été réalisée du 6 novembre 2017 au 28 février 2018<sup>26</sup> par l'Agence des usages du réseau Canopé, dans le cadre d'un groupe de travail sous l'égide de la Délégation du numérique à l'enseignement. Sur la base d'un échantillon de convenance constitué de 68 réponses complètes d'enseignants ayant déjà utilisé une ou plusieurs

---

<sup>25</sup> Son objet est plus particulièrement d'étudier : « Comment les technologies immersives et interactives issues du jeu vidéo et de la réalité virtuelle renouvellent les offres culturelles et de divertissement collectif dans l'espace public ».

<sup>26</sup> Brossard, M. (2018). Enquête sur l'utilisation de la réalité virtuelle dans un cadre pédagogique. Retrieved from [https://www.reseau-canope.fr/fileadmin/user\\_upload/Projets/agence\\_des\\_usages/enquete\\_Realite\\_virtuelle.pdf](https://www.reseau-canope.fr/fileadmin/user_upload/Projets/agence_des_usages/enquete_Realite_virtuelle.pdf), consulté le 18 novembre 2018.

Beaumont, F., & Rakotomalala Harisoa, N. A. (2017). Retours des élèves sur une expérience immersive de réalité virtuelle : le cas de " THE ENEMY." Poitiers. Retrieved from [https://www.reseau-canope.fr/fileadmin/user\\_upload/Projets/agence\\_des\\_usages/Etude\\_TheEnemy.pdf](https://www.reseau-canope.fr/fileadmin/user_upload/Projets/agence_des_usages/Etude_TheEnemy.pdf), consulté le 18 novembre 2018.

Groupe thématique numérique 7 « Immersion numérique et virtualité ». (2018). Cahier d'expériences : la réalité virtuelle dans les classes. Poitiers. Retrieved from [https://www.reseau-canope.fr/fileadmin/user\\_upload/Projets/agence\\_des\\_usages/Cahiers\\_Expériences\\_Realite\\_Virtuelle\\_Complet.pdf](https://www.reseau-canope.fr/fileadmin/user_upload/Projets/agence_des_usages/Cahiers_Expériences_Realite_Virtuelle_Complet.pdf), consulté le 18/10/2018.

techniques immersives dans leur classe au moment de l'étude et recrutés au travers du réseau de l'Éducation nationale, les données fournissent un instantané des types d'usages s'inscrivant dans ce contexte.

***La population exposée : les 12-16 ans plus concernés, mais des exemples allant du CE1 jusqu'à l'enseignement supérieur.***

Les classes représentées vont du CE1-CE2 à la terminale et jusqu'à l'enseignement supérieur. Toutefois, les usages se concentrent sur les classes de 5<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> et 2<sup>nde</sup> puisqu'elles représentent plus des deux tiers des cas d'usage en effectifs cumulés, et correspondent à une classe d'âge allant d'environ 12 à 16 ans. À l'inverse, on ne trouve qu'un seul cas d'usage dans les classes respectivement de CE1-CE2, de CM1 et de 6<sup>ème</sup>, ainsi que 4 cas d'usage dans le supérieur.

***Des usages variés, dans l'enseignement des technologies et plusieurs autres matières dont les langues, pour des objectifs d'acquisition de connaissances ou de formation au geste technique notamment.***

Les matières concernées sont variées, avec une prépondérance de l'enseignement des technologies, qui représente plus d'un quart des cas relevés, suivi par les langues vivantes, Français-Langues et culture de l'antiquité, Lettre, EPS (éducation physique et sportive), SVT (sciences de la vie et de la terre), Economie – Gestion, Physique-Chimie, et Mathématiques, etc.

Les cas d'usage rapportés vont de l'utilisation de matériel de RV/RA et de caméras vidéo 360° pour produire du contenu en rapport avec la discipline jusqu'à des usages d'interaction ou d'exposition à des contenus en lien avec la discipline et le thème traité. Pour une même activité, ces mêmes usages pouvaient être combinés. À titre d'illustration, un cas d'usage développé en EPS vise à aider les élèves à développer leur « lecture du jeu » en *basketball*. Pour cela, il y a d'abord une phase de production où une caméra 360° est portée par les élèves tour à tour lors de l'action ciblée ; puis, dans un deuxième temps, l'élève va revoir à la première personne et de façon « immersive » cette action, à l'aide d'un casque de RV avant de la commenter pour l'enseignant.

Parmi les objectifs pédagogiques associés, les deux tiers concernent l'acquisition « des connaissances, des concepts concrets ou abstraits » (n = 55, 68 %). Viennent ensuite les objectifs en lien avec la formation professionnelle tels l'apprentissage de savoir-faire, de gestes manuels ou techniques comme le geste de soudage par exemple (n = 15, 19 %). D'autres types d'objectifs sont bien moins fréquents : « formation comportementale » où il s'agit « d'acquisition de savoir-être comme par exemple développer de l'empathie » (n = 7), activités relatives à l'apprentissage d'une langue étrangère (n = 3) et, enfin différenciation pédagogique (n = 1).

***Les interfaces utilisées : moitié de RA, un tiers de RV, avec un recours fort aux tablettes et, en proportion moindre les casques, les écrans et les dispositifs de projection murale.***

La répartition des dispositifs de réalité augmentée et de réalité virtuelle dans les usages décrits montre une dominance de la RA. Celle-ci représente près de la moitié (n = 43, 47 %) contre un peu plus d'un tiers pour la RV (n = 35, 38 %). Les autres types de dispositifs sont *a priori* plutôt mobilisés à des étapes de production ou de restitution en fin d'activité (camera 360°, images de synthèse, logiciel de présentation assistée par ordinateur), représentant moins d'un cinquième des dispositifs mobilisés.

En cohérence avec ce qui précède, les catégories d'interface visuelles trouvées (total n = 79) sont essentiellement des tablettes (n = 44, 56 %) puis des visiocasques de différents types (n = 19, 24 %). Concernant ces derniers, l'usage le plus fréquent concerne les casques conçus à partir d'un *smartphone*. Viennent ensuite des technologies plus « classiques » à l'école (écran, n = 10, 13 % ; vidéo-projection, n = 5, 6 %), tandis que le recours à une salle immersive (CAVE) n'est cité qu'une fois (cf. Tableau 12).

**Tableau 12 : Interfaces visuelles mobilisées dans l'ensemble des cas d'usage éducatifs recensés.**

Type de dispositif de visualisation utilisé	Sous-catégories	Total des cas
Tablette	Sans changement de vue (27)	44
	Avec changement de vue (17)	
Casque	Conçu à partir d'un smartphone (11)	19
	Casque RV dédié (8)	
Ecran	Ecran plat (9)	10
	Ecran d'ordinateur (1)	
Projection murale	Tableau Blanc Interactif (4)	5
	Pc portable + vidéoprojecteur (1)	
Salle immersive CAVE		1

Source : Brossard, 2018.

***Lieu, fréquence et durée d'utilisation : surtout en classe, parfois à l'extérieur ou chez soi, sous la forme de 3 à 4 séances, pour une durée variable allant de moins de 10 minutes à plus de 20 minutes***

L'utilisation en classe, au cours d'une séance d'activité encadrée par l'enseignant, est la situation d'usage majoritaire. Elle représente les trois quarts des situations rapportées (n = 63, 75 % de l'ensemble des réponses). Les autres situations, moins représentées, sont l'utilisation à la maison avec suite de la séance en classe (n = 11), en sortie scolaire (n = 12), en classe durant le temps libre (n = 7), lors d'un « *escape game* » conçu par un autre groupe d'élèves et, enfin, un cas où les élèves ont produit chez eux leur propre réalité augmentée.

Les cas d'usages impliquent en moyenne « de 3 à 4 séances (la moyenne est égale à 3,7) », avec un maximum de 12 séances. À l'autre extrémité, un peu moins d'un quart des cas d'usage comportait une seule séance.

La durée moyenne d'utilisation au cours d'une séance est inférieure à 10 minutes pour 38 % (n = 26) des cas d'utilisation, comprise entre 10 et 20 minutes dans 29 % (n = 20) des cas et supérieure à 20 minutes dans un quart des cas (n = 17, 25 %).

***Retours détaillés d'expérience sur l'origine des projets, les difficultés et les rares effets néfastes observés***

Une deuxième partie de l'étude analyse de façon détaillée le retour d'expérience auprès d'un sous-ensemble d'enseignants ayant répondu positivement dans le cadre de l'enquête

précédente. Il en ressort qu'il s'agit à l'origine de projets d'initiatives individuelles pour la plupart.

L'existence de difficultés est mentionnée dans 3 cas sur les 9. Il s'agit alors d'une part de difficultés pour faire circuler les élèves avec le casque dans la salle, avec le risques d'incidents, comme par exemple se prendre les pieds dans les câbles. D'autre part, il s'agit de difficultés avec certains élèves telles que : refus de mettre le casque, difficultés à voir en stéréoscopie, nausées lors d'expériences précédentes. Dans le cas d'usage en EPS décrit un peu plus haut, l'enseignant relève qu'il fallait demander aux élèves de « s'accrocher à quelque chose de solide du fait de la désorientation occasionnée (...), désorientation qui ne permet pas de se concentrer sur la séquence à analyser ». Enfin, il a été mentionné, dans un cas, un sac à dos trop lourd contenant le matériel, des lunettes trop serrées ainsi que parfois des images floues et des textes illisibles.

Globalement, seuls 3 cas ont donné lieu à quelques effets néfastes. Des effets délétères ont été mentionnés notamment dans le retour d'expérience d'un des cas d'usage correspondant à une expérience immersive de réalité virtuelle dans l'installation « *The Enemy* ». Sur 23 élèves de 1<sup>ère</sup> scientifique ayant participé, 5 ont abandonné. Un élève a « eu un *bug* », 3 élèves ont eu des malaises et ont demandé à arrêter, et 1 élève s'est sentie angoissée et a demandé à arrêter. Ce dernier abandon découle d'un sentiment de panique engendrée par l'exposition à un contenu (récit de combattants de guerre) faisant écho avec son passé de réfugiée ayant vécue la guerre et la fuite avant de venir en France.

### 6.1.3.3 Les usages dans le champ du divertissement : jeux, art et culture

#### **Méthode**

Le CNC a commandité une étude sur les « Expériences immersives, des nouvelles pratiques culturelles dans l'espace public »<sup>27</sup> réalisée en avril 2019 par le cabinet *Evermind, Fabula* et l'association UNI-XR<sup>28</sup>.

L'étude se focalise sur les lieux publics où peut être vécue une expérience « immersive », c'est à dire où l'on fait « rentrer le spectateur dans une histoire, un jeu, une composition musicale, une œuvre d'art contemporain, de danse, de théâtre, en sollicitant plusieurs sens par des technologies comme la réalité virtuelle, la réalité augmentée, l'audio spatialisé, les projections illusionnistes (*mapping* vidéo) pour une expérience solo ou collective réalisée ». Cette étude se fonde sur une analyse qualitative de 19 entretiens semi-directifs menés en individuel ou en collectif auprès de 22 acteurs du secteur.

#### **Proposition d'une cartographie des lieux et des usages**

L'étude identifie des usages encore en cours de développement à ce jour dans le champ du jeu et de la culture, et propose une première cartographie des lieux où s'opère ce développement.

Il s'agit d'une part d'usages ludiques basés sur le jeu vidéo et, d'autre part, d'usages à visée pédagogique ou artistique tels que des films expérimentaux proposant de nouvelles formes de narrations cinématographiques au moyen de casques de réalité virtuelle, des installations et

---

<sup>27</sup> Son objet est plus particulièrement d'étudier : « Comment les technologies immersives et interactives issues du jeu vidéo et de la réalité virtuelle renouvellent les offres culturelles et de divertissement collectif dans l'espace public ».

<sup>28</sup> [https://www.cnc.fr/creation-numerique/etudes-et-rapports/etudes-prospectives/experiences-immersives-des-nouvelles-pratiques-culturelles-dans-lespace-public\\_978218](https://www.cnc.fr/creation-numerique/etudes-et-rapports/etudes-prospectives/experiences-immersives-des-nouvelles-pratiques-culturelles-dans-lespace-public_978218) ; consulté le 24/10/2019.

des performances artistiques mêlant spectacle vivant et technologies immersives, des expositions interactives, etc. Ces usages sont proposés de façon permanente ou temporaire dans certains parcs d'attraction, musées, cinémas, salles d'*Escape games* et spectacles vivant. À côté de ces lieux préexistants, il apparaît un nombre croissant de lieux dédiés spécifiquement à la réalité virtuelle avec une orientation majoritairement tournée vers le divertissement. Le type d'usages mis en place dans les salles d'arcades et de divertissement, sur la base de jeux vidéo adaptés ou spécifiquement développés, apparaît proche de celui des *escape games* et des salles de jeux.

Les autres usages apparaissent variés, allant de l'individuel au collectif et du simple au complexe en matière de médiations, sans qu'une typologie stabilisée ne permette de les décrire, du fait qu'ils sont émergents pour une bonne part. Enfin, selon les acteurs interrogés, les usages et lieux « avec de fortes capacités d'accueil obtiennent des scores (en nombre de visiteurs) comparables à des musées bien établis et des expositions temporaires d'envergures internationales ».

#### 6.1.3.4 Les usages actuels dans les champs professionnel, thérapeutique et de la recherche

##### **Méthode**

Dans le cadre de la présente expertise, l'Anses a réalisé en février 2020 une enquête en ligne auprès de professionnels de divers organismes identifiés comme proposant ou utilisant des dispositifs de RV et/ou de RA. L'objectif était d'approfondir les connaissances sur leurs usages, les populations exposées, les contenus proposés, les temps d'exposition et les recommandations d'usage.

Le questionnaire, conçu par l'Anses avec l'aide du groupe de travail, a été diffusé à différents organismes avec pour objectif qu'ils le remplissent et/ou qu'ils le relaient à d'autres organismes pouvant être concernés. Les participants ont été contactés par le truchement des associations professionnelles spécialisées du domaine (notamment l'Association française de réalité virtuelle, l'AFRV) ainsi que sur la base de contacts fournis par les experts du groupe de travail. Aucun mode de sélection particulier n'a été mis en œuvre, le but étant de diffuser le questionnaire au plus grand nombre d'organismes afin de documenter au mieux la diversité des expositions sans objectif de représentativité.

##### ***La population exposée : plutôt adulte jeune dans le champ professionnel, un éventail d'âge plus large et notamment des enfants dans le champ thérapeutique***

Pour les activités professionnelles et de recherche décrites, la majorité des utilisateurs sont des personnes âgées de 20 à 50 ans. Cependant, pour les applications thérapeutiques, les personnes interrogées indiquent que toutes les classes d'âges sont concernées et notamment les enfants dont l'âge est compris entre 6 et 12 ans.

##### ***Des usages et des objectifs très diversifiés***

Parmi les 8 répondants qui ont indiqué proposer des applications pour des activités professionnelles et/ou thérapeutiques, les situations et contenus cités sont les suivants :

- immersion dans des environnements réels ou imaginaires pour simuler des mises en situations, à des fins similaires à l'hypnose dans le cadre d'actes médicaux, pour une activité thérapeutique de rééducation, pour un traitement antalgique chez les enfants brûlés ;

- prévention/diminution du risque :
  - dans le cadre d'activités militaires. Pour cela les contenus proposés sont des véhicules, des terrains d'entraînement avec des scénarios opérationnels de combat, d'embarquement/débarquement ou encore de vie à l'intérieur d'un engin ;
  - en environnement industriel, logistique et garage. Pour cela les contenus proposés sont des visites virtuelles de sites pour trouver les risques ;
- formation : faire vivre des situations dans le cadre d'activité de formation avec des contenus pédagogiques et de communication ;
- visite virtuelle, revue de chantier ;
- aide à l'ingénierie nucléaire ;
- contrôle qualité des jeux.

Pour les activités de recherche, les réponses obtenues ont été plus nombreuses. Les situations d'exposition sont variées :

- la simulation automobile, piétonne, cycliste ;
- évaluation des dispositifs de RV pour les simulateurs de conduite et étude des comportements des conducteurs ;
- compréhension des comportements de traversée de rue en fonction de l'âge avec des contenus de scènes routières, de rues, de véhicules à l'approche ;
- formations (notamment en chirurgie), simulations pour travailler ;
- programmes interventionnels destinés à réduire l'occurrence des chutes chez les personnes âgées ;
- études portant sur la RV :
  - perception : étudier l'intégration et la perception des informations : visuelles et auditives, multimodale avec des contenus proposant des salles de concert ou de théâtre. Étudier et améliorer les interactions avec les environnements visuels. Tester les interactions avec d'autres sens dans des applications de réalité virtuelle. Compréhension des interactions physiques entre piétons, sportifs, analyse des stratégies visuo-motrices ;
  - étude des limites de validité de la RV avec des contenus ;
  - études sur les effets de la RV : étudier l'effet de l'âge sur la tolérance et l'apprentissage des dispositifs de RV afin d'apporter des recommandations ; étude de la fatigue visuelle en casque ;
- activités d'ingénierie et de conception avec tous types de contenus et d'interactions ;
- cybersécurité & visualisation de données avec la simulation d'environnements collaboratifs ;
- tests de protocoles expérimentaux de recherche.

***Les dispositifs et interfaces utilisés : casques et écrans principalement, puis smartphones, tablettes, lunettes et enfin salles immersives***

Les dispositifs utilisés sont majoritairement des casques et écrans, puis viennent ensuite des mobiles ou tablettes, des lunettes et des CAVE.

Pour les activités déclarées comme thérapeutiques par les répondants, seules les casques et écrans sont utilisés.

Pour les activités de recherche, dans les réponses reçues, les CAVE sont des dispositifs plus présents.

### ***Durée et fréquence d'exposition***

Les durées d'exposition indiquées, par jour et par utilisateur, sont en général :

- en dessous de 15 minutes pour les applications professionnelles, mais deux situations avec des expositions de plus d'une heure ont été décrites ;
- de 15 à 44 minutes pour les activités de recherche.

### ***Recommandations d'usages soulignées par les répondants***

En matière de limite d'âge, plusieurs types d'informations ont été recueillies et notamment :

- pas d'usage avant 5 ou 6 ans, et éviter l'usage pour les enfants de moins de 12 ans ;
- l'usage est déconseillé pour certaines catégories de populations et parmi elles ont été citées :
  - les personnes à risque de cinétose, de claustrophobie ou d'épilepsie ;
  - les personnes ayant des pertes d'équilibre, un fort vertige ou des phobies susceptibles d'être activées par l'usage des dispositifs ou une forte appréhension avant usage ;
  - celles qui ont des problèmes visuels (pas de perspective 3D, troubles accommodation / convergence, fusion, binocularité...) ;
  - les personnes dont l'écartement inter-pupillaire n'est pas compatible avec les réglages possibles sur les casques ;
  - les femmes enceintes ;
  - les personnes sensibles aux migraines ;
  - les personnes ayant faim (avant un repas).

## **6.1.4 Résultats des enquêtes par échantillonnage**

### **6.1.4.1 Les études exploitées**

Deux études récentes permettent de préciser la diffusion des technologies de réalité virtuelle, augmentée et mixte et les usages actuels.

La plus récente et la plus large est l'étude commanditée par l'Anses dans le cadre de la présente expertise. Cette étude a été réalisée en ligne du 26 août au 9 septembre 2019 par le cabinet *OpinionWay* auprès d'un échantillon de 776 français âgés de 18 ans et plus ayant déjà fait l'expérience de la réalité virtuelle ou augmentée (issus d'un échantillon national représentatif de 2970 français âgés de 18 ans et plus) et 122 enfants âgés de 6 à 17 ans ayant déjà fait l'expérience de la réalité virtuelle ou augmentée. L'enquête visait trois objectifs :

- identifier les personnes concernées et les situations d'exposition ;
- connaître les interfaces utilisées ;
- identifier et recenser les éventuels symptômes ressentis après ou pendant l'exposition.

Ce sondage ayant été réalisé sur un échantillon de la population française ayant fait l'expérience de la RV ou de la RA, ses résultats doivent être interprétés en tenant compte des marges d'incertitudes, notamment pour les tendances globales :

- un seuil de confiance à 95 % avec une marge d'erreur de 1,53 à 3,52 points pour l'échantillon de 776 adultes ;
- un seuil de confiance à 90 % avec une marge d'erreur de 3,26 à 7,47 points au plus pour l'échantillon de 122 enfants.

Une autre étude, commanditée par le CNC, apporte quelques informations complémentaires – et parfois divergentes – à prendre en compte pour tenter d'estimer l'exposition en France en tenant compte de la variété des usages. Cette étude se focalise cependant sur la seule RV, qui plus est essentiellement centrée sur l'utilisation d'un casque. Cette étude a été réalisée par l'IFOP en février 2019 à partir d'un échantillon représentatif (méthode des quotas âge, sexe, CSP, région, taille d'agglomération) de 1 003 français de plus de 15 ans et un sur-échantillon de 100 personnes ayant déjà eu une expérience en réalité virtuelle (dans le sens restreint d'expérience avec un casque dédié). L'étude visait (1) à évaluer la notoriété et la perception de la RV et (2) avoir un retour d'expérience des utilisateurs de RV et des expériences immersives.

#### 6.1.4.2 Au-delà du faible nombre d'études, une difficulté pour évaluer l'exposition liée au caractère émergent de la technologie

Plusieurs difficultés rendent *a priori* difficile l'évaluation de l'exposition de la population à la RV/RA.

La première est le faible nombre voire l'absence d'études concernant certains usages, populations ou dispositifs entrant dans le champ de la saisine.

La seconde est directement liée au caractère émergent des technologies considérées, c'est-à-dire au fait qu'il s'agit de technologies en évolution, encore peu et/ou mal connues et répondant à des usages et des besoins encore incomplètement cernés. Il en découle d'une part un périmètre variable du champ de la RV/RA/RM suivant les études : par exemple, certaines applications peuvent être considérées comme entrant dans le champ de la réalité virtuelle uniquement au motif qu'elles utilisent un casque, ou d'autres parce qu'elles relèvent d'une expérience immersive, ce qui induit un premier facteur de variation entre les résultats des études. Ainsi, selon les études, les critères de sélection voire les consignes ne recourent pas forcément la définition de la RA/RV/RM telle qu'entendue par le groupe de travail. Il en découle d'autre part une variabilité d'interprétation des consignes pour celles et ceux – *a priori* encore en nombre significatif – qui connaissent mal, voire ne connaissent pas, les dispositifs et les usages de la réalité virtuelle et augmentée à propos desquels ils/elles sont interrogées. L'enquête du CNC montre par exemple que seules 42,5 % des personnes interrogées connaissent le terme « VR », cette expression étant connue surtout par les hommes (52,2 % versus 33,7 % des femmes), les jeunes (70,4 % chez les 15-24 ans vs 20,6 % chez les 65 ans et plus) et les joueurs de jeux vidéo réguliers (59,3 %).

Pour pallier ces difficultés, l'étude de l'Anses s'est appuyée sur une définition précise de la RV/RA associée à des illustrations typiques des différents types de dispositifs et d'usages présentée dans le questionnaire.

#### 6.1.4.3 Résultats

***Au moins un quart des français de 18 ans et plus, et les enfants d'un(e) français(e) sur 3 sont ou ont été exposés à la RV ou RA, une exposition croissante ces dernières années***

L'étude de l'Anses menée fin 2019 rapporte que 26 % des français de 18 ans et plus ont déjà fait l'expérience de la réalité virtuelle ou augmentée. Selon l'étude, 33 % des français ayant des enfants entre 6 et 17 ans déclarent que leurs enfants ont déjà fait l'expérience de la RV/RA.

L'étude du CNC menée en février 2019 - qui ne prend pas en compte la réalité augmentée<sup>29</sup>, rapportait quant à elle une proportion, plus élevée, de 41 % des adultes de plus de 18 ans ayant eu au moins une utilisation de la RV avec un casque, contre moitié moins en 2016 (21 %). Cependant, ces usages incluent toutes les utilisations d'un casque, dont par exemple le visionnage de contenu sans interaction. Au-delà de la divergence d'estimation, qui s'explique éventuellement par une différence dans le périmètre de l'étude et l'interprétation par les sondés des usages rattachés à la RV et à la RA, cette seconde étude souligne la croissance continue de la part de population exposée ces dernières années.

Ainsi, l'exposition peut être évaluée comme correspondant à au moins un quart des français âgés de plus de 18 ans – voire plus selon le CNC – et aux enfants d'environ un(e) français(e) sur 3.

**Le profil des adultes utilisateurs de RA/RV/RM : plutôt jeunes (âge moyen de 40 ans), masculin appartenant aux catégories socio-professionnelles les plus favorisées (CSP+), habitant dans une grande ville, ayant des enfants et maîtrisant bien les nouvelles technologies**

Les utilisateurs français de RA/RV/RM sont caractérisés par une surreprésentation des classes d'âges les plus jeunes (18-24 ans : 17 % chez les utilisateurs *contre* 11 % dans la population française ; 25-34 ans : 25 % chez les utilisateurs *contre* 15 % dans la population française ; 35-49 ans : 32 % chez les utilisateurs *contre* 25 % dans la population française, cette dernière catégorie représente ainsi près du tiers des utilisateurs, *cf.* Tableau 13), des hommes (57 % des utilisateurs *contre* 48 % dans la population française), des CSP+ (43 % *contre* 28 %), ayant des enfants (49 % *contre* 43 %), habitant plus en Île-de-France (26 % *contre* 19 %) et plutôt dans l'agglomération parisienne (24 % *contre* 17 %) et dans des agglomérations de 100 000 habitants et plus (34 % *contre* 30 %). Par ailleurs, il s'agit d'utilisateurs ayant une meilleure maîtrise des outils technologiques en comparaison à l'ensemble des français. En effet, 62 % déclarent très bien maîtriser les *smartphones* (*contre* 42 % des français(es)), 48 % les tablettes (*contre* 31 % des français(es)) ou encore 25 % les montres connectées (*contre* 10 % des français(es)).

**Tableau 13 : Répartition par âges des adultes ayant déjà eu l'expérience de la réalité virtuelle ou augmentée.**

		Tranches d'âges (ans)				
		18-24	25-34	35-49	50-64	65 et +
<b>Adultes (N = 776)</b>	<b>Effectif</b>	133	197	252	125	69
	<b>Proportion</b>	19 %	24 %	32 %	16 %	9 %

Pour les trois quarts d'entre eux, l'exposition a eu lieu durant les 12 derniers mois, et cela qu'il s'agisse d'un usage privé ou professionnel. Dans environ 45 % des cas, cette exposition a eu lieu depuis moins de 6 mois.

<sup>29</sup> La question posée était « Vous, personnellement, avez-vous déjà utilisé un casque de réalité virtuelle, type *Oculus Rift PC*, *Playstation VR*, *HTC Vive*, *Samsung Gear VR* ou *Google Cardboard* (masque en carton à monter soi-même, de marque *Google* ou autre) ?

**Le profil des enfants et des jeunes utilisateurs : dès 6 ans, les 9-11 ans et 14-15 ans étant les classes d'âges les plus représentées**

Parmi les 122 enfants interrogés ayant déjà été exposés à la RV ou à la RA, 55 % sont des garçons. La moyenne d'âge des enfants est de 12,7 ans ; les tranches d'âges les plus représentées sont celles des 9-11 ans et des 14-15 ans (cf. Tableau 14).

**Tableau 14 : Répartition par âges des enfants ayant déjà eu l'expérience de la réalité virtuelle ou augmentée.**

		Tranches d'âges (ans)				
		6-8	9-11	12-13	14-15	16-17
<b>Enfants (N = 122)</b>	<b>Effectif</b>	11	36	16	36	23
	<b>Proportion</b>	9 %	30 %	13 %	29 %	19 %

**Les adultes ont surtout des usages personnels, impliquant la RV dans 6 cas sur 7 et la RA dans la moitié des cas, et une répartition différenciée selon l'usage personnel ou professionnel**

Tous usages et dispositifs confondus, l'étude de l'Anses montre chez les adultes une forte dominante des usages privés personnels (n = 612 ; 79 % des usagers et 21 % des français) contre seulement 8 % (n = 247) dans le cadre professionnel. L'expérience dans le cadre professionnel est associée dans les deux tiers des cas à l'existence concomitante d'une expérience dans le domaine personnel (n = 164) soit 21 % des usagers ou 6 % des français) ayant eu une expérience de réalité virtuelle et augmentée. Seuls 11 % des usagers (n = 83) déclarent une expérience restreinte à leur seul contexte professionnel.

L'exposition déclarée concerne essentiellement le domaine de la RV (n = 665 ; 86 % des usagers et environ 22 % de la population française) et en proportion moindre la RA (n = 426 ; 55 % des usagers et environ 14 % de la population française), avec un recouvrement de 315 répondants ayant déclaré une exposition à la fois à la RA et à la RV (soit 41 % de l'échantillon exposé ou environ 11 % de la population française ; cf. Tableau 15). Globalement, les usages de type RV seule dominant chez les usagers ayant uniquement un usage personnel (57 %), suivis par l'association RV et RA (28 %). Chez les usagers au seul titre professionnel, on observe une répartition assez similaire avec la RV seule (53 %) suivie par la RA seule (30 %). De façon différente, c'est l'association RV et RA qui domine chez les usagers déclarant une utilisation à la fois dans le cadre personnel et professionnel (94 %).

**Tableau 15 : Répartition des usagers adultes par type d'usage et type de technologie impliquée (effectif et %).**

	RV seule	RV & RA	RA seule	Total
<b>Usages personnels uniquement</b>	299 57 %	147 28 %	83 16 %	529 100 %
<b>Usages personnels et professionnels</b>	7 4 %	154 94 %	3 2 %	164 100 %
<b>Usages professionnels uniquement</b>	44 53 %	14 17 %	25 30 %	83 100 %
<b>Total</b>	350 45 %	315 41 %	111 14 %	776 100 %

**Fréquence d'utilisation dans le domaine personnel : en moyenne de 15 % (adultes) à 20 % (enfants) jouent tous les jours ou une à deux fois par semaine, avec des variations suivant la classe d'âge et des fréquences moindres pour les autres types d'application**

Dans un contexte personnel, 10 à 16 % des 693 adultes rapportent utiliser la RV/RA de 1 à 2 fois par semaine voire tous les jours selon le type d'application (cf. Tableau 16). La proportion la plus forte d'utilisation fréquente concerne les jeux vidéo 3D seuls, les jeux vidéo immersifs seuls et les jeux de RA en extérieur. La fréquence d'utilisation est moindre au niveau des applications de santé et des salles immersives, probablement du fait du caractère spécifique des premières et d'une moindre facilité d'accès pour les secondes.

**Tableau 16 : Fréquence d'utilisation des applications de RA ou RV par les adultes utilisateurs (N = 693).**

Applications	Fréquence de l'utilisation		
	Au moins 1 fois*	Au moins 1 fois / mois*	Au moins 1 à 2 fois / semaine*
Jeux vidéo 3D seul	48 %	31 %	16 %
Jeux vidéo 3D en réseau	38 %	27 %	14 %
Jeux vidéo immersifs seul	59 %	30 %	16 %
Jeux vidéo immersifs en réseau	38 %	27 %	14 %
Jeux de RA ou RV dans des lieux recevant du public	69 %	25 %	14 %
Jeux de RA en extérieur	52 %	32 %	16 %
Application en santé et de rééducation	29 %	22 %	12 %
Salle immersive 3D	41 %	22 %	10 %

\* Il ne s'agit pas de catégories exclusives, les adultes utilisant au moins une à deux fois par semaine les applications sont également comptabilisés dans les deux autres catégories ; de même les adultes expérimentant au moins une fois par mois sont également comptabilisés dans la catégorie « au moins une fois ».

Chez les enfants, l'usage le plus fréquent, concernant la répétition de l'utilisation, est le jeu vidéo 3D seul suivi par les jeux vidéo 3D en réseau, les jeux immersifs avec lunettes ou

casques en réseau ainsi que les jeux de RA en extérieurs (cf. Tableau 17) avec 29 à 42 % des enfants qui déclarent les utiliser au moins une fois par mois et 20 à 26 % qui déclarent les utiliser au moins une fois par semaine. La proportion d'utilisateurs fréquents du jeu vidéo seul est significativement plus élevée chez les enfants par rapport aux adultes ; par ailleurs, tous types de jeux vidéo confondus, la proportion d'enfants utilisateurs fréquents est significativement supérieure à celle observée chez les adultes (20 % vs 15 %), avec des classes d'âges où se trouvent une proportion d'utilisateurs fréquents particulièrement élevée (30 % des 12-13 ans et 27 % des 14-15 ans jouent tous les jours ou une à deux fois par semaine).

**Tableau 17 : Fréquence d'utilisation des applications de RA ou RV par les enfants utilisateurs (N=122).**

Applications	Fréquence de l'utilisation		
	Au moins 1 fois*	Au moins 1 fois / mois*	Au moins 1 à 2 fois / semaine*
Jeux vidéo 3D seul	55 %	42 %	26 %
Jeux vidéo 3D en réseau	37 %	30 %	20 %
Jeux vidéo immersifs seul	55 %	35 %	16 %
Jeux vidéo immersifs en réseau	40 %	29 %	20 %
Jeux de RA ou RV dans des lieux recevant du public	79 %	18 %	11 %
Jeux de RA en extérieur	56 %	35 %	17 %
Application en santé et de rééducation	17 %	13 %	6 %
Salle immersive 3D	33 %	16 %	10 %

\* Il ne s'agit pas de catégories exclusives, les enfants utilisant au moins une à deux fois par semaine les applications sont également comptabilisés dans les deux autres catégories ; de même les enfants expérimentant au moins une fois par mois sont également comptabilisés dans la catégorie « au moins une fois ».

***Fréquence d'utilisation dans le domaine professionnel : un quart des adultes usagers de la RV/RA y sont exposés de façon hebdomadaire voire quotidienne***

Chez les adultes, la fréquence d'utilisation est globalement similaire pour l'ensemble des applications professionnelles (cf. Tableau 18). En effet, 25 à 28 % des adultes utilisent au moins une fois par semaine des applications pour l'éducation ou la formation, les jeux vidéo RV ou RA, les applications en santé ou de rééducation, les applications pour la conception, la maintenance ou la réparation, ou encore les applications pour la gestion des stocks.

**Tableau 18 : Fréquence d'utilisation des applications de RA ou RV dans le domaine professionnel.**

Applications	Fréquence de l'utilisation		
	Au moins 1 fois*	Au moins 1 fois / mois*	Au moins 1 à 2 fois / semaine*
Jeux vidéo en réalité virtuelle/augmentée	60 %	43 %	25 %
Applications pour l'éducation et la formation	70 %	48 %	<b>28 %</b>
Application pour la conception, la maintenance ou la réparation	61 %	36 %	25 %
Application en santé et de rééducation	52 %	41 %	27 %
Applications pour la gestion de stock	47 %	41 %	27 %

\* Il ne s'agit pas de catégories exclusives, les enfants utilisant au moins une à deux fois par semaine les applications sont également comptabilisés dans les deux autres catégories ; de même les enfants expérimentant au moins une fois par mois sont également comptabilisés dans la catégorie « au moins une fois ».

***La durée d'utilisation dans le domaine personnel : autour de 1h30 pour les adultes et un peu plus pour les enfants ; dans le domaine professionnel : une durée très variable (de 45 minutes à 1h51 minutes) selon l'application***

Dans le cadre des usages personnels, le temps consacré par les adultes à une utilisation est en moyenne d'un peu moins d'1h30 pour l'ensemble des applications (de 1h21 à 1h38) à l'exception des jeux vidéo immersifs réalisés seul avec casque ou lunettes pour lesquels la durée moyenne est de 1h06 (cf. Tableau 19 et

Tableau 20). Les enfants consacrent quant à eux un peu plus de 1h30 (de 1h35 à 1h54) en moyenne à chaque utilisation des jeux vidéo 3D (seul ou en réseau), des jeux immersifs avec lunettes ou casques (seul ou en réseau) et aux jeux de RA en extérieur. Pour les autres applications, le temps moyen consacré à chaque utilisation est plus court, bien que supérieur à une heure : 1h15 pour les jeux de RA ou RV dans des lieux recevant du public, 1h19 pour les applications en santé et rééducation et 1h06 pour les salles immersives 3D (CAVE).

Concernant les usages professionnels, le temps moyen par utilisation est de 1h51 pour les jeux vidéo, de 1h27 pour les applications de gestion des stocks, de 1h24 pour celles de santé ou de rééducation et est de moins d'une heure pour les applications pour la conception, la maintenance ou la réparation et pour celles pour l'éducation et la formation (temps moyen par utilisation de 45 minutes et 53 minutes, respectivement). Le format du questionnaire ne permettaient pas d'aller dans le détail de l'activité des participants ; toutefois il est permis de formuler quelques hypothèses interprétatives, notamment relativement à l'usage professionnel des jeux vidéo qui peut regrouper plusieurs situations différentes : usages de jeux sérieux, développement de jeux, évaluation de jeux et activités dans des salles d'arcades ou de réalité virtuelle, mise aux points de dispositifs et d'interfaces en lien avec la réalité virtuelle ou augmentée, etc.

**Tableau 19 : Durées d'utilisation selon le type d'usage et la population (réponses à la question « Pour chacune de ces formes de RV/RA, quelle est en moyenne votre durée d'utilisation/de pratique ? »)**

Applications expérimentées au moins une fois	Type d'usage et population		
	Adultes usages prof.	Adultes usages perso.	Enfants
Jeux de RA ou RV dans des lieux recevant du public		1h26	1h15
Jeux vidéo en RA/RV	1h51		
Jeux vidéo immersifs (avec casque ou lunette) seul		1h06	1h09
Jeux de RA en extérieur (Pokemon go, Harry Potter Wizard Unite)		1h26	1h54
Jeux vidéo 3D (Nintendo, 3DS...) seul		1h36	1h44
Jeux vidéo 3D (Nintendo, 3DS...) en réseau		1h38	1h35
Salle immersive 3D		1h24	1h06
Jeux vidéo immersifs en réseau		1h33	1h37
Application en santé et de rééducation	1h24	1h21	1h19
Application pour la conception, la maintenance ou la réparation	45min		
Application pour l'éducation, la formation	53min		
Application pour la gestion de stock	1h27		

**Tableau 20 : Répartition en quartiles des durées d'utilisation en minutes (durée la plus haute déclarée) selon le type d'usage et la population (Réponses à la question « Pour chacune de ces formes de RV/RA, quelle est en moyenne votre durée d'utilisation/de pratique ? »).**

Applications expérimentées au moins une fois	Durée d'utilisation en minutes par type de population		
	Adultes usages prof. p25/p50/p75	Adultes usages perso. p25/p50/p75	Enfants p25/p50/p75
Jeux de RA ou RV dans des lieux recevant du public		20/60/85	20/60/120
Jeux vidéo en RA/RV	20/60/125		
Jeux vidéo immersifs (avec casque ou lunette) seul		20/60/90	30/60/80
Jeux de RA en extérieur (Pokemon go, Harry Potter Wizard Unite)		25/60/120	30/60/120
Jeux vidéo 3D (Nintendo, 3DS...) seul		30/60/120	40/60/120

Applications expérimentées au moins une fois	Durée d'utilisation en minutes par type de population		
	Adultes usages prof. p25/p50/p75	Adultes usages perso. p25/p50/p75	Enfants p25/p50/p75
Jeux vidéo 3D (Nintendo, 3DS...) en réseau		25/60/120	60/60/120
Salle immersive 3D		15/60/120	18/60/120
Jeux vidéo immersifs en réseau		25/60/120	30/60/120
Application en santé et de rééducation	20/60/135	15/60/85	15/60/120
Application pour la conception, la maintenance ou la réparation	15/60/127		
Application pour l'éducation, la formation	15/60/180		
Application pour la gestion de stock	15/60/180		

La valeur p50 représente la durée médiane, c'est-à-dire la durée la plus haute déclarée par la moitié des participants. Le tableau met ainsi en évidence que quels que soient les usages et la population considérée, la médiane est à 60 minutes ; en d'autres termes, la moitié des répondants déclare une durée d'au plus 60 minutes. La valeur p25 correspond au premier quartile, c'est-à-dire la valeur la plus haute pour le premier quart de la distribution. Si l'on considère l'utilisation des jeux de RA RV dans des lieux recevant du public chez les enfants, le premier quartile est à 20 minutes ; en d'autres termes, un quart des enfants ayant répondu à cette question joue au plus 20 minutes (complémentairement, trois quart joue au moins 20 minutes). Enfin, la valeur p75 représente le troisième quartile. En reprenant le même exemple que précédemment, on en déduit que les trois quarts des enfants jouent au plus 120 minutes, et complémentairement qu'un quart joue au moins 120 minutes.

#### 6.1.4.4 Les types de dispositifs utilisés

##### **Un focus sur le matériel utilisé pour le jeu et la possession de casques par les ménages français**

Selon l'étude par sondage du CNC réalisée en février 2019, l'ordinateur et le *smartphone* sont les matériels les plus utilisés (respectivement 56 % et 55,4 %) pour le jeu, suivi ensuite par la console de jeu (47,1 %).

Selon la même étude, 6,5 % des français (contre 2 % en 2016) déclarent posséder et utiliser un casque de RV type *Occulus rift PC*, *Playstation VR*, *HTC Vive*, *Samsung Gear VR* ou *Google CardBoard*. En 2019, ce sont en proportion les jeunes de 25 à 34 ans qui sont les plus nombreux à posséder et utiliser un casque (15,9 %), suivis par les 35-49 ans (8,7 %) et les 18-24 ans (6,1 %). La répartition était différente en 2016, où les premiers utilisateurs étaient situés dans la tranche 18-24 ans (8 %), à quasi égalité avec la tranche 25-34 ans (7 %). Avec respectivement 55 % et 51 %, les tranches d'âge 15-24 et 25-34 ans sont celles pour lesquelles la plus grande proportion est retrouvée, correspondant à plus de la moitié de la population pour chacun de ces groupes. On note également une progression chez les plus âgés, qui passent de 10 à 28,4 % de personnes concernées pour cette tranche d'âge entre 2016 et 2019.

**Le smartphone, les visio-casques dédiés, les consoles de jeu et les ordinateurs constituent les interfaces les plus fréquentes, avec des variations suivant l'âge et le type d'usage personnel ou professionnel ; en moyenne, les usagers utilisent trois types d'interfaces différents**

Sur la base de l'étude de l'Anses, les dispositifs techniques les plus cités par l'ensemble des usagers, adultes et enfants, sont par ordre décroissant le *smartphone*, les visiocasques dédiés, les consoles de jeux et l'ordinateur (cf. Tableau 21). Les autres dispositifs sont mentionnés par moins d'un tiers des usagers déclarés, le dispositif le moins cité étant les salles immersives. Aussi bien les adultes que les enfants déclarent utiliser en moyenne trois types d'interfaces.

L'ordinateur (dans le cadre de la vie professionnelle) et le *smartphone* (dans le cadre de la vie privée) sont les supports le plus fréquemment utilisés par les adultes (respectivement 43 % et 45 %) contre la console de jeux pour les enfants (48 %). À l'inverse, la console de jeux est l'interface la moins utilisée dans un cadre professionnel (19 %) tandis que ce sont le visiocasque conçu à partir d'un smartphone (par exemple *Google cardboard*, *DayDream*) et les salles immersives (respectivement 23 et 17 %) qui sont les moins mobilisées dans le cadre d'un usage personnel par les adultes et les enfants.

**Tableau 21 : Types de supports de RA ou de RV utilisés par les adultes (usages professionnels ou personnels) et les enfants.**

	Adultes usages prof. (N = 247)	Adultes usages perso. (N = 693)	Enfants (N = 122)
Smartphone	34 %	45 %	40 %
Visiocasque dédié à la réalité virtuelle ( <i>Samsung Gear VR</i> , <i>Oculus Go</i> , <i>Occulus Rift...</i> )	40 %	37 %	38 %
Console de jeux ( <i>Playstation</i> , <i>Xbox...</i> )	19 %	39 %	48 %
Ordinateur	43 %	34 %	25 %
Ecrans	38 %	32 %	22 %
Casque/ lunette connectées pour la réalité augmentée	28 %	31 %	38 %
Tablette	33 %	28 %	25 %
Visiocasque conçu à partir d'un smartphone (par exemple <i>Google cardboard</i> , <i>DayDream</i> )	31 %	25 %	28 %
Salle immersive (CAVE)	26 %	23 %	17 %
Autre	4 %	3 %	1 %

Suivant l'âge et l'activité, des différences significatives apparaissent. Chez les adultes, les usages personnels se distinguent des usages professionnels par un recours plus important au *smartphone* (45 % vs 34 % ;  $z = 2,8214$ ,  $p < 0,005$ ), aux consoles de jeux (39 % vs 19 % ;  $z = 5,4589$ ,  $p < 0,0001$ ) et par une utilisation moindre de l'ordinateur (34 % vs 43 % ;  $z = -2,3731$ ,  $p < 0,017$ ). La comparaison entre enfants et adultes dans le cadre des usages personnels pointe essentiellement une utilisation plus importante des écrans par les adultes (32 % vs 22 % ;  $z = 2,1790$ ,  $p < 0,03$ ).

**Les différentes formes de jeux, applications les plus expérimentées dans un contexte personnel, chez les adultes comme chez les enfants ; dans le contexte professionnel, ce sont les applications éducatives, pour la conception, la maintenance ou la réparation et enfin le jeu qui sont les plus expérimentées**

Dans le cadre personnel, 70 % des 693 adultes utilisateurs ont expérimenté des jeux de RV ou RA dans des lieux recevant du public, 58 % des jeux vidéo immersifs avec lunettes ou casques seuls et 52 % ont eu l'expérience d'un jeu de RA en extérieur<sup>30</sup>. L'expérience des autres types d'applications concerne moins de la moitié des usagers. Avec 30 %, les applications en santé et de rééducation sont les moins représentées aujourd'hui (cf. Tableau 22).

Avec 79 % des enfants concernés, les jeux de RA ou RV dans des lieux recevant du public constituent comme pour les adultes le type d'application le plus expérimenté, dans une proportion significativement plus grande que les adultes ( $z = 1,9950$ ,  $p < 0,05$ ). Le jeu de RA en extérieur arrive en deuxième position avec 57 % des enfants de l'échantillon déclarant l'avoir expérimenté. Le jeu vidéo seul, immersif (avec casque ou lunette) ou 3D (type *Nintendo 3DS*...) vient ensuite (55 %). Comme chez les adultes, les applications en santé et de rééducation sont les moins représentées (18 %) avec une proportion significativement encore plus faible que chez les adultes ( $z = -2,6975$ ,  $p < 0,007$ ).

La proportion d'enfants ayant expérimenté au moins une fois ces différentes applications est variable selon les classes d'âges (cf. Tableau 22). Il peut être noté que ce sont les jeux de RA ou de RV dans les lieux recevant du public qui ont été expérimentés les plus largement par les enfants de toutes les tranches d'âge (entre 72 % et 82 % des enfants de chaque tranche d'âge).

**Tableau 22 : Proportion d'enfants ayant expérimenté au moins une fois les applications de RA ou RV par tranches d'âges (N = 122).**

Applications	Tranches d'âges (ans)				
	6-8	9-11	12-13	14-15	16-17
Jeux vidéo 3D seuls	27 %	<b>56 %</b>	50 %	<b>67 %</b>	52 %
Jeux vidéo 3D en réseau	18 %	28 %	37 %	<b>45 %</b>	<b>48 %</b>
Jeux vidéo immersifs seul	18 %	53 %	<b>62 %</b>	<b>64 %</b>	56 %
Jeux vidéo immersifs en réseau	9 %	33 %	<b>56 %</b>	<b>47 %</b>	44 %
Jeux de RA ou RV dans des lieux recevant du public	<b>82 %</b>	81 %	81 %	72 %	<b>82 %</b>
Jeux de RA en extérieur	27 %	50 %	50 %	<b>67 %</b>	<b>69 %</b>
Application en santé et de rééducation	9 %	<b>22 %</b>	<b>31 %</b>	8 %	17 %
Salle immersive 3D	18 %	28 %	<b>56 %</b>	<b>39 %</b>	22 %

<sup>30</sup> Ces résultats sont à rapprocher du sondage du CNC de février 2019 montrant que les français sont près de 72 % à déclarer jouer aux jeux vidéo au moins une fois par mois, entre une fois par semaine et une fois par mois, ou au moins une fois par semaine, toutes tranches d'âge confondues. Ce sondage soulignait aussi la faible différence entre hommes et femmes (écart de 3 points de % avec 73,2 % d'hommes contre 70 % de femmes).

**Un peu moins d'un tiers des usagers adultes a ressenti des symptômes associés à l'exposition, avec des proportions plus fortes chez les utilisateurs ayant un usage personnel et professionnel et chez ceux utilisant la RV et la RA**

Spontanément, 29 % des adultes et 30 % des enfants déclarent avoir ressenti des symptômes soit pendant soit après l'exposition à la RV ou la RA.

Ce chiffre global doit être précisé. D'une part, les adultes ayant un usage à la fois personnel et professionnel déclarent proportionnellement plus avoir eu des symptômes (49 %) que les répondants ayant uniquement un usage personnel (24 %) ou professionnel (23 % ;  $\chi^2$  (2, N = 776) = 40,79,  $p < 0,000$  ;  $V^2 = 0,053$ ). D'autre part, les adultes utilisant exclusivement la RV ou la RA présentent moins fréquemment des symptômes (respect. 17 % et 24 %) que ceux déclarant utiliser les deux technologies (39 % ;  $\chi^2$  (2, N = 776) = 26,67,  $p < 0,000$  ;  $V^2 = 0,034$ ).

De plus, lorsque qu'une liste de 11 symptômes (maux de tête, vertiges, fatigue visuelle, désorientation, nausées, pâleur, sueurs, chutes, vomissements, somnolence et chocs suite à un déplacement) est présentée aux participants, les usagers sont plus nombreux à déclarer en avoir ressenti un par rapport aux réponses spontanées précédentes. En effet, cela concerne alors 50 % des adultes et 41 % des enfants (cf. Tableau 23). Ainsi, on note en particulier que les utilisateurs ayant un usage à la fois personnel et professionnel ne sont qu'un tiers à ne rapporter aucun symptôme contre plus de la moitié des utilisateurs dans les autres groupes. On observe aussi que plus d'un quart des membres de ce groupe rapporte 3 symptômes et plus consécutifs à une exposition à la RA/RV.

**Tableau 23 : Nombre de symptômes rapportés par les adultes et les enfants sur la base de la présentation d'une liste détaillée.**

Nombre de symptômes différents recensés	Adultes usages prof. Uniquement (N = 83)	Adultes usages prof. et perso. (N = 164)	Adultes usages perso. uniquement (N = 529)	Adultes ensemble (N = 776)	Enfants (N = 122)
Aucun	54 %	32 %	55 %	50 %	59 %
1	23 %	25 %	19 %	21 %	17 %
2	17 %	16 %	12 %	13 %	13 %
3 et+	6 %	27 %	14 %	16 %	11 %

**6.1.4.5 Une convergence de symptômes ressentis les plus fréquents (vertiges, maux de tête, désorientation et nausées) ; les jeunes adultes, les femmes et les usagers à double titre, professionnel et personnel, apparaissent plus touchés**

**Introduction**

Dans un premier temps, les usagers ayant indiqué avoir ressenti des symptômes étaient sollicités au travers d'une question ouverte sur la nature de ces symptômes. Les adultes et les enfants évoquent spontanément des vertiges (35 % et 38 %, respectivement) et des maux de tête (26 % et 32 %, respectivement). Les nausées sont davantage rapportées chez les adultes (24 % versus 11 % chez les enfants) tandis que les douleurs aux yeux sont davantage soulignées chez les enfants (30 % versus 19 % chez les adultes).

Dans un deuxième temps, une liste de 11 symptômes était présentée à l'ensemble des usagers (cf. Tableau 24). Les principaux symptômes rapportés par les adultes sont alors les

maux de tête, les vertiges, la fatigue visuelle, la désorientation et les nausées, chacun touchant entre 14 et 18 % des adultes.

Des différences notables apparaissent chez les adultes selon que l'usage de la RV/RA est professionnel ou personnel uniquement, ou bien les deux. Ainsi, le groupe d'utilisateurs ayant un usage à la fois professionnel et personnel rapporte plus fréquemment que les autres l'expérience de maux de têtes (35 %), de nausées (23 %), de pâleur (12 %), de sueurs (13 %), de chutes (9 %), de vomissements (7 %), de somnolence (7 %) et de chocs suite à un déplacement (6 %). Des analyses complémentaires montrent que les jeunes entre 18 et 24 ans rapportent plus fréquemment que les autres l'expérience de maux de têtes (35 %) et de la fatigue visuelle, tandis que le groupe des 25-34 ans rapportent plus fréquemment l'existence de vertiges (24 %), de pâleur (11 %), de sueurs (10 %), de chutes (9 %), de vomissements (7 %) et de chocs (5 %). Enfin, il est également observé que les femmes indiquent plus fréquemment des vertiges (23 %) et des nausées (19 %).

Les enfants indiquent les mêmes symptômes que les adultes, mais selon un ordre de fréquence un peu différent (fatigue visuelle, maux de tête, vertiges et désorientation), à l'exception des nausées dont l'occurrence apparaît significativement plus faible.

**Tableau 24 : Types de symptômes ressentis par les utilisateurs selon le type d'usage (personnel vs professionnel) et la population (adultes vs enfants).**

	<b>Adultes usages prof. Uniquement (N = 83)</b>	<b>Adultes usages prof. et perso. (N = 164)</b>	<b>Adultes usages perso. uniquement (N = 529)</b>	<b>Adultes ensemble (N = 776)</b>	<b>Enfants (N = 122)</b>
Fatigue visuelle	15 %	20 %	15 %	16 %	19 %
Maux de tête	7 %	35 %	16 %	18 %	16 %
Nausées	6 %	23 %	12 %	14 %	5 %
Vomissements	4 %	7 %	2 %	3 %	2 %
Pâleur	2 %	12 %	5 %	6 %	7 %
Sueurs	7 %	13 %	4 %	6 %	4 %
Vertige	17 %	16 %	18 %	17 %	14 %
Désorientation	14 %	19 %	15 %	15 %	11 %
Somnolence	1 %	6 %	1 %	2 %	2 %
Chute	7 %	9 %	3 %	5 %	2 %
Choc	2 %	7 %	1 %	2 %	1 %
Énervement, irritabilité				-	2 %

### **Les interfaces associées par les usagers à la survenue des symptômes ressentis : le plus souvent le visiocasque dédié et les lunettes connectées, en particulier chez les enfants**

La proportion d'usagers adultes ou enfants associant les symptômes ressentis à l'un ou l'autre des types d'interfaces varie entre 8 % et 43 % (cf. Tableau 25). Ainsi, si aucune interface n'est épargnée, les symptômes semblent apparaître plus souvent suite à une exposition avec un visiocasque dédié à la RV (29 % des adultes et 30 % des enfants), et avec un casque ou des lunettes connectées pour la RA, en particulier chez les enfants (43 % des enfants et 22 % des adultes).

**Tableau 25 : Interfaces citées comme associées à des symptômes chez les adultes et enfants ayant déclaré en avoir ressenti.**

	Adultes (N = 227)	Enfants (N = 37)
Smartphone	21 %	11 %
Console de jeux ( <i>Playstation, Xbox...</i> )	13 %	24 %
Visiocasque dédié à la réalité virtuelle ( <i>Samsung Gear VR, Oculus Go, Oculus Rift...</i> )	<b>29 %</b>	<b>30 %</b>
Ordinateur	17 %	14 %
Ecrans	17 %	14 %
Casque/ lunette connectées pour la réalité augmentée	<b>22 %</b>	<b>43 %</b>
Tablette	16 %	11 %
Visiocasque conçu à partir d'un <i>smartphone</i> (par exemple <i>Google cardboard, DayDream</i> )	15 %	22 %
Salle immersive (CAVE)	14 %	8 %

### **La préexistence de troubles tels que le mal des transports, les migraines, les troubles de l'équilibre et vertiges, et les troubles auditifs semble prédisposer à l'expérience de symptômes lors d'une exposition à la RA/RV**

L'étude de l'Anses met en effet en évidence que les adultes souffrant dans leur vie quotidienne de troubles tels que le mal des transports, les migraines, les troubles de l'équilibre, les vertiges et les troubles auditifs apparaissent plus sujets que les autres à ressentir des symptômes pendant ou après l'exposition à la RV ou à la RA, que ce soit les adultes (80 % vs 60 %) ou les enfants (59 % vs 31 %).

### **Limiter le temps d'exposition, rester assis ou aller prendre l'air : stratégies dominantes pour contrer les symptômes**

Pour limiter ou faire disparaître les symptômes ressentis, l'étude de l'Anses souligne que les usagers mentionnent trois principales actions : limiter le temps d'exposition (30 % des adultes et 32 % des enfants), à rester assis (30 % des adultes et 32 % des enfants) et à passer du temps en plein air après l'exposition (26 % des adultes et 36 % des enfants).

***La majorité des symptômes apparaît pendant ou immédiatement après l'exposition, et disparaît généralement très rapidement***

Aussi bien chez les adultes que chez les enfants, la majorité des symptômes apparaît pendant ou immédiatement après l'exposition et disparaît immédiatement ou quelques minutes après l'exposition. Les symptômes qui persistent davantage de temps sont les maux de tête qui ne disparaissent que quelques heures après l'exposition pour 40 % des adultes et 57 % des enfants et la fatigue visuelle qui ne disparaît que quelques heures après l'exposition pour 32 % des adultes et 26 % des enfants.

**6.1.5 Conclusions**

L'étude de l'Anses a permis de préciser les caractéristiques des utilisateurs actuels de de la RV ou de la RA en France. Chez les adultes, ce sont plus souvent des hommes (57 %) plutôt jeunes (âge moyen de 40 ans), de catégorie socio-professionnelle supérieure (43 %) et ayant une bonne maîtrise des outils technologiques. Chez les enfants, ce sont plutôt des garçons (55 %), jeunes adolescents ayant en moyenne 12,7 ans.

L'étude de l'Anses permet aussi d'estimer les durées d'exposition et apprécier la variété et la répartition des usages. Qu'elle concerne la RA ou la RV, la durée moyenne d'utilisation dépasse une heure autant pour les adultes que pour les enfants. La RV est davantage utilisée dans la vie personnelle que la RA tandis que dans le cadre professionnel, on observe un usage assez similaire des deux technologies. Dans la vie personnelle, l'usage hebdomadaire est principalement associé aux jeux vidéo, surtout chez les enfants. Le *smartphone* est le premier support d'utilisation chez les adultes tandis qu'il s'agit de la console de jeu chez les enfants. Toutefois, les adultes, comme les enfants, utilisent en moyenne 3 types différents d'interfaces. Dans le cadre professionnel, l'usage hebdomadaire est relatif à des applications liées à la formation, la santé ou la gestion des stocks et le *smartphone* est moins utilisé au profit de l'ordinateur, des visiocasques ou des écrans.

Sur le plan des conséquences sur la santé, entre un tiers et la moitié des utilisateurs déclarent avoir ressenti des symptômes au cours ou suite à une exposition à la RV ou à la RA, selon la façon dont est réalisée la mesure. Les symptômes qui sont le plus déclarés spontanément sont les vertiges et les maux de tête. Les symptômes apparaissent principalement pendant ou immédiatement après l'exposition et disparaissent très rapidement après, à l'exception des maux de tête et de la fatigue visuelle qui semblent persister davantage dans le temps.

Les types d'usages et de technologies mis en œuvre semblent constituer des facteurs déterminants de la survenue de symptômes. Ainsi, les adultes ayant un usage à la fois professionnel et personnel, et ceux exposés à la fois à la RV et la RA exhibent proportionnellement plus de symptômes que les autres usagers. Deux types d'interfaces sont plus souvent spontanément associées à la survenue des symptômes : les casques dédiés à la RV et les lunettes connectées de RA, en particulier chez les enfants pour ces dernières. Toutefois, des symptômes sont évoqués aussi en association avec les autres types d'interfaces évaluées, en proportion moindre.

Les résultats de l'étude suggèrent également l'effet possible de facteurs individuels dans la survenue de symptômes. En effet, d'une part la préexistence de troubles tels que le mal des transports, les migraines, les troubles de l'équilibre et vertiges, et les troubles auditifs s'accompagnent proportionnellement de plus de symptômes ressentis par les usagers de la RV/RA. D'autre part, certains groupes d'usagers apparaissent plus sensibles, en particulier les femmes et les jeunes adultes.

Limiter le temps d'exposition, rester assis et passer du temps en plein air sont les principales actions prises aujourd'hui par les usagers pour prévenir ou faire disparaître ces symptômes.

## 6.2 Caractérisation des rayonnements émis par les casques de réalité virtuelle

### 6.2.1 Introduction

Au-delà de l'exposition à des contenus de réalité virtuelle, les casques de réalité virtuelle (casques ou téléphones utilisés) peuvent conduire à une exposition à des agents physiques des personnes qui les utilisent. En effet, les casques, qui sont des appareils électriques, émettent en raison du courant qui les alimente un champ électromagnétique. Ils peuvent aussi émettre un rayonnement radioélectrique lié à une communication sans fil. Par ailleurs, l'écran émet de la lumière, dont une partie est bleue, et cette lumière présente également une modulation temporelle.

Dans le but de préciser l'exposition des personnes à ces agents physiques lors de l'utilisation de casques de réalité virtuelle, un certain nombre de mesures ont été effectuées sur des casques de réalité virtuelle et sur des téléphones utilisés pour expérimenter la réalité virtuelle et augmentée.

Ces mesures ont porté sur :

- les champs électromagnétiques générés par les émetteurs radiofréquences (Wi-Fi, *Bluetooth*, 4G, 5G, etc.) mesurés au niveau de la tête de l'utilisateur et les perturbations électromagnétiques générées potentiellement par les circuits, capteurs et équipements électroniques intégrés dans les casques ;
- la modulation temporelle de la lumière émise par les écrans à LED ;
- la quantité de lumière bleue émise (mesures issues de l'expertise Anses sur les LED (Anses, 2019)).

Nous présentons ci-dessous les résultats de ces mesures de manière synthétiques. Une présentation plus approfondie peut-être trouvée en Annexe 5.

### 6.2.2 Sélection des casques et *smartphones*, réalisation des mesures

La sélection des casques de réalité virtuelle à mesurer a été réalisée par le CSTB et le laboratoire LMC2 de l'université Descartes, en fonction des casques disponibles au sein du laboratoire et de critères de représentativité des modèles choisis. La sélection devait notamment permettre de tester à la fois des casques filaires et non filaires, des modèles anciens et plus récents, des capteurs intégrés dans le casque ou des capteurs externes. Ainsi, neuf casques de réalité virtuelle ont été sélectionnés.

La sélection des *smartphones* a été réalisée par le CSTB, en accord avec l'Anses, en fonction des appareils accessibles et des systèmes d'exploitation utilisés.

Les deux campagnes de mesures ont été réalisées en parallèle sur deux journées consécutives en septembre 2019 et en juin 2020.

### 6.2.3 Contenus utilisés au cours des essais

#### 6.2.3.1 Modulation temporelle

La modulation temporelle de la lumière se définit comme la fluctuation du niveau lumineux de l'éclairage, potentiellement perceptible visuellement selon sa fréquence. Pour la caractérisation de la modulation temporelle des casques, plusieurs contenus ont été utilisés :

- une scène entièrement blanche, envoyée dans le casque ;
- et pour un des casques (autonome) :
- une montagne russe en dynamique, cf. Figure 77 ;

- une vidéo RV/RA ;
- une simple image blanche sans moteur 3D.



Figure 77 : une montagne russe en dynamique.

Pour les *smartphones*, une application est utilisée pour produire du contenu visuel 3D sur l'écran sous la forme de deux sous-images. Une image blanche sans moteur RV/RA a aussi été utilisée pour ces mesures.

#### 6.2.3.2 Champs électromagnétiques

Pour les mesures de champs électromagnétiques rayonnés, la scène de réalité virtuelle envoyée dans le casque est une modélisation de la gare RER Saint-Michel à Paris en 3D, avec des textures et du son (scène réalisée dans le cadre d'un projet du LMC2<sup>31</sup> en collaboration avec la SNCF). Dans cette scène, plusieurs événements se succèdent (avatars animés qui se déplacent, passage de train qui rentre en gare, etc.) et l'utilisateur peut se déplacer sur le quai. L'environnement est texturé avec des lumières en temps réel et précalculées (cf. Figure 78).



Figure 78 : modélisation de la gare RER Saint-Michel en 3D.

Source : projet du LMC2 en collaboration avec la SNCF.

### 6.2.4 Résultats

#### 6.2.4.1 Modulation temporelle de la lumière

##### ***Niveau observé pour les casques***

---

<sup>31</sup> Laboratoire Mémoire, Cerveau & Cognition (LMC2) de l'équipe Inserm (CPN UMR 894) situé à l'Institut de Psychologie de l'Université Paris Descartes.

Tous les casques testés présentent une très forte modulation temporelle périodique d'amplitude de l'ordre de 100 %. Cette modulation est toujours présente pour tous les casques testés dans cette étude, même lorsque les images sont stationnaires. Les mesures effectuées dans la présente étude confirment la conclusion d'une étude précédente effectuée par le CSTB pour l'Anses en mai 2017 sur un seul modèle de casque.

Deux casques ont des formes d'onde ayant un rapport cyclique égal à 0,5, ce qui signifie que les durées de « noir » sont égales aux durées d'éclairement lumineux.

Tous les autres casques ont une forme d'onde de type pulsée avec un rapport cyclique inférieur à 50 %, de l'ordre de 2 % à 10 %, ce qui signifie que la durée du « noir » est 4 à 9 fois plus importante que la durée de l'éclairement. On peut donc considérer que l'éclairement de l'œil est réalisé en mode « impulsionnel ».

Pour tous les casques sauf un (un ancien modèle qui n'est plus commercialisé), les éclairagements de l'œil droit et de l'œil gauche sont parfaitement en phase.

Dans cette étude, trois indices ont été utilisés. Il est important de noter que ces indices ont été définis pour des sources lumineuses relativement ponctuelles situées dans le centre du champ de vision, et non pour des sources étendues illuminant une grande partie du champ de vision, comme c'est le cas des afficheurs caractérisés dans cette étude. Les indices normalisés (voir le rapport du CSTB en Annexe 5) de visibilité des effets de la modulation temporelle sont les suivants :

- Pst-Im (indice de visibilité du papillotement normalisé par l'*International Electrotechnical Commission* (IEC) et la *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA<sup>32</sup>)) ;
- SVM (indice de visibilité de l'effet stroboscopique normalisé par l'IEC et la NEMA) ;
- FI (*flicker index* normalisé par l'IESNA).

Pour tous les casques testés, ces trois indices ont des valeurs largement supérieures aux seuils de visibilité définis pour un observateur moyen (Pst-Im = 1, SVM = 1, FI = 10 %), ce qui indique que les modulations temporelles mesurées sont très probablement détectables par le système neuro-visuel humain, bien que les fréquences de modulation soient supérieures à la fréquence critique de fusion.

### **Niveau observé pour les téléphones**

Les mesures réalisées avec des *smartphones* munis d'application de RV en 3D ont montré que :

- la modulation temporelle de la lumière émise est soit nulle soit très faible, et dans ce dernier cas probablement indétectable. Deux *smartphones* ont une modulation temporelle quasiment nulle. Un *smartphone* présente une faible modulation temporelle avec un taux d'environ 3 % à une fréquence dominante de 60 Hz ;
- lors d'utilisation des applications de réalité virtuelle en 3D, la modulation temporelle des écrans de deux smartphones ne change pas : elle reste très faible voire indétectable. En revanche, l'utilisation d'une application de RV sur le dernier *smartphone 2016* augmente la modulation temporelle à un taux de 11 %, avec toujours une fréquence dominante de 60 Hz.

---

<sup>32</sup> Organisme de normalisation implanté à Washington (USA) qui publie des standards techniques.

#### 6.2.4.2 Champs électromagnétiques

L'ensemble des casques de réalité virtuelle ou augmentée vendus dans le commerce doivent être conformes à la directive RED (2014/53/UE) relative à la mise sur le marché des équipements radioélectriques, en matière de compatibilité électromagnétique et d'exposition des personnes (normes EN 50360, 50361, 5071). Les mesures réalisées ne visaient pas à vérifier cette conformité, mais à investiguer et analyser les rayonnements électromagnétiques générés par l'utilisation de ces casques au niveau de la tête de l'utilisateur.

Les sources d'émission potentielles de champs électromagnétiques identifiées sont d'une part les émetteurs radiofréquences qui transmettent du contenu entre le casque et l'ordinateur ou les capteurs externes (type *Bluetooth* ou Wi-Fi, émetteur 3G ou 4G) et d'autre part l'électronique embarquée dans le casque (écran, capteurs, composants, cartes et circuits).

La caractérisation des niveaux d'exposition de la tête de l'utilisateur en matière de restrictions de base (recommandation européenne 1999/519/CE) nécessiterait de réaliser une évaluation de la densité de courant électrique ou, selon la fréquence, du débit d'absorption spécifique, sur l'ensemble de la bande de fréquences entre quelques kHz et 6 GHz. Cela n'est techniquement pas possible.

Suite à la réalisation de mesures exploratoires sur un casque, le CSTB a déterminé que :

- la circulation de courant électrique dans les composants, cartes et circuits peut générer un rayonnement de champs électromagnétiques dans les bandes de fréquences dites « intermédiaires », entre quelques kHz et quelques MHz ;
- les émetteurs radiofréquences installés dans le casque (3G, 4G, Wi-Fi) pourraient générer des champs électromagnétiques, de façon équivalente à un téléphone mobile ou un carte Wi-Fi entre 700 MHz et 6 GHz.

Ces mesures exploratoires ont permis la mise au point du banc d'essai avec des sondes isotropiques (correspondant donc à ces bandes de fréquences) placées à l'intérieur d'un support représentant une tête sur lequel est placé le casque de réalité virtuelle.

Les résultats sont identiques pour l'ensemble des neuf casques mesurés avec l'identification de divers signaux rayonnés dans les bandes de fréquences intermédiaires, entre 9 kHz et 30 MHz environ (voir rapport CSTB en Annexe 5). Ces signaux correspondent à des champs électromagnétiques générés par les courants électriques circulant dans les composants, cartes et circuits électroniques intégrés dans les casques (processeur, écran, capteurs, etc.). Les niveaux mesurés sont très largement inférieurs aux valeurs limites d'exposition.

## **7 Aspects éthiques liés à l'usage de la réalité virtuelle et/ou augmentée**

### **7.1 Objectifs, méthode et cadre de travail**

#### **7.1.1 Rappel des objectifs**

L'objectif de ce chapitre est double. En premier lieu, il s'agit d'identifier et d'analyser les études proposant un questionnement d'ordre éthique dans le cadre de l'exposition à des dispositifs de réalité virtuelle et de réalité augmentée. En second lieu, il s'agit également d'identifier les questionnements d'ordre éthique qui n'ont pas été étudiés en envisageant, alors, des effets potentiels de l'exposition à des environnements virtuels et augmentés sur l'utilisateur lui-même, mais également sur autrui et, plus généralement, sur le plan sociétal.

L'analyse des questionnements éthiques identifiés par les études, mais également des questionnements non identifiés, permet de distinguer deux niveaux d'interrogation. Le premier concerne des questionnements éthiques relatifs à des dispositifs technologiques de première génération utilisant un écran, et d'autres des dispositifs utilisant un casque de réalité virtuelle. En effet, si les dispositifs de réalité virtuelle et augmentée peuvent être légitimement considérés comme des technologies au même titre que le web ou la télévision par exemple, il est, par ailleurs, important d'en souligner leur impact spécifique réel et potentiel.

Afin de circonscrire le champ d'analyse de ce chapitre, il est important de préciser que les dispositifs de réalité virtuelle et augmentée peuvent, dans le contexte de recherche scientifique, être utilisés non pas en tant qu'objet d'étude ou de recherche sur le plan éthique, mais en tant que techniques permettant de simuler des situations où la conduite éthique des sujets est impliquée selon une approche expérimentale. Dans cette seconde éventualité, les questionnements en jeu ne sont pas relatifs à l'utilisation de ces technologies, puisque celles-ci sont mises en œuvre de façon maîtrisée, mais aux réactions des sujets exposés à des situations impliquant un jugement éthique, comme par exemple le test de soumission à l'autorité de Milgram, ou le dilemme du tramway... réalisés en réalité virtuelle.

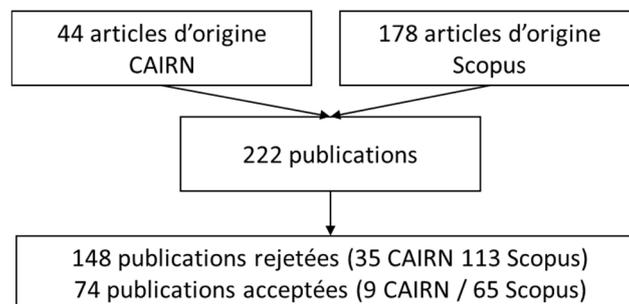
#### **7.1.2 Méthode de travail**

Afin de mettre en exergue les interrogations éthiques en lien avec l'usage des dispositifs de réalité virtuelle et de réalité augmentée, le présent chapitre s'est appuyé sur la littérature scientifique disponible. Pour ce faire, plusieurs requêtes ont été développées et implémentées au travers des bases de données Scopus et CAIRN, cette dernière étant davantage spécialisée sur les travaux en sciences humaines et sociales (cf. Tableau 26).

**Tableau 26 : Requête bibliographique Scopus et Cairn - éthique et réalité virtuelle / réalité augmentée (09/01/2019)**

Scopus	TITLE-ABS ( "Virtual reality" OR "Augmented reality" OR "Mixed Reality" OR "Immersive" OR "Virtual environment" OR "Head mounted displays" OR "Helmet Mounted displays" OR "HMD" OR "Near-to-eye display" OR "Wearable display" OR "Smart-phone based VR" OR "Mobile AR" OR "Gesture based interaction" OR "Multi Users Virtual Environment" OR "MUVE" OR "Massively Multi-Player Online Role-Playing Game" OR "MMORPG" OR "Oculus rift" OR "Google Cardboard" OR "Google glasses" OR "Nintendo switch" OR "HTC Vive" OR "Hololens" OR "serious game") AND TITLE-ABS ( "Ethic*" OR "Moral") AND PUBYEAR > 2010 AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "re" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) OR LIMIT-TO ( LANGUAGE , "French" ) )
CAIRN	Virtual reality OU Augmented reality OU Mixed Reality ET Ethic* OU Moral   Filtre : « dix dernières années » + « revue »

Un tri sur le titre et le résumé a été effectué par les membres du groupe de travail afin d'identifier les publications d'intérêt pour l'expertise (cf. Figure 79).

**Figure 79 : Sélection des publications d'intérêt concernant l'éthique.**

Les publications retenues ont fait l'objet d'une analyse par l'intermédiaire d'une grille standardisée (cf. Tableau 27). Cette grille d'analyse s'inspire de la grille mobilisée pour les autres analyses bibliographiques conduites dans le cadre de cette expertise, et de la grille proposée par la commission d'éthique de l'Académie des technologies, relative à l'étude des enjeux éthiques des technologies. Cette grille n'a pas fait l'objet d'une publication.

Tableau 27 : Grille d'analyse des publications d'intérêt concernant les enjeux éthiques de la réalité virtuelle et réalité augmentée

INFO PUBLICATION			PERTINENCE DE LA		INFO ETUDE				POPULATION D'ETUDE								
Auteurs	Titre	Journal	oui/non	Justificatif en cas de "non"	Quel type de publication ? (article, revue)	Quel domaine ? RA ? RV ? Mixte ?	Approche théorique vs. approche expérimentale	Quel est l'objectif visé ?	Age moyen	Nb F	Nb H	Pop total	Volontaire sain ? (oui/non)	catégorie socio-professionnelle			
<b>CONTEXTE</b>			<b>LE CONTENU EST IL MARQUE PAR :</b>														
Quel contexte d'utilisation (loisir, sante, education, production ...)	Quelle expérience ? Quel type de tâche	Language grossier*	discrimination*	drogue* / addiction	peur*	jeux de hasard*	sexe*	violence*	consommation	politique	l'humain	dépersonnalisation et déréalisation	culture	Légalité	Sécurité	non respect d'autrui	religion
<b>MODIFICATION DES RELATIONS</b>			<b>REMISE EN QUESTION DE VALEUR STRUCTURANTE</b>			<b>DISPOSITIF MOBILISE / EVOQUE</b>											
au niveau de la sphère privée ?	au niveau de la sphère professionnelle ?	au niveau des relations entre individus ?	Liberté	Egalité	Fraternité	Casque/HMD oui/non	Cave oui non	Lunette de RA ? (oui/non)	Ecran/Multi écran oui/non	Autre dispositif que visuel ?	Il y a-t-il une interaction ? Si oui, quel type, sinon mettre non	Quelles sont les modalités sensorielles (visuel/audio/retour d'effort) ?					
<b>questions éthiques</b>		<b>CONCLUSION DE L'ETUDE</b>	<b>QUALITE DE L'ETUDE</b>			<b>COMMENTAIRES</b>											
* domaine de controverse * interrogations ?		Conclusions de l'étude	Conclusion sur la qualité de l'étude : Bonne qualité ? Limites méthodologiques mineures ? Limites méthodologiques majeures ?			Commentaires											

### 7.1.3 Cadre : éthique, droit et morale

L'éthique constitue l'ensemble des jugements de valeur exprimés par des propositions normatives (du genre « C'est bien » / « C'est mal ») et/ou prescriptives (du genre « Tu ne tueras point »). Elle fixe pour cela des propositions qui ne sont ni ontologiques ou descriptives (c'est-à-dire désignant ce qui est ou n'est pas), ni de l'ordre du possible (désignant ce qui peut être ou ne pas être), mais des propositions qui relèvent de l'ordre de ce qui doit être, à savoir le devoir. Autrement dit, l'éthique relève du légitime (le juste) sans nécessairement relever du légal (la loi) car tout ce qui est légal n'est pas nécessairement légitime. Parallèlement, l'éthique peut être légitime mais illégale. Ainsi, le droit ne peut pas fonder l'éthique mais, éthiquement parlant, l'éthique devrait fonder le droit. En ce sens, ce chapitre n'a pas vocation à examiner sur le plan du droit ce qui relève du légal et de l'illégal.

S'agissant de la question de la distinction entre éthique et morale, même s'il n'existe pas de consensus absolu, la seconde intègre, consciemment ou inconsciemment, une dimension religieuse ou superstitieuse, ce que l'éthique ne fait pas (Spinoza, 1670). Parallèlement, à la différence de la morale qui ne cherche pas une justification rationnelle, l'éthique vise une réconciliation entre les valeurs (par exemple, liées aux croyances) et la raison (au sens de rationalité). En somme, il ne peut exister de dialogue rationnel entre deux morales (qui sont chacune ancrées dans une culture et une histoire), alors qu'il devrait être possible de discuter de la production de préceptes éthiques relatifs à un contexte, à une situation ou à une pratique particuliers. Une attitude déontologique se définit alors comme la conformité de nos actions à ces préceptes éthiques— préceptes qui peuvent, le cas échéant, concerner un type particulier d'activité, d'où l'existence de codes ou chartes de déontologie.

#### 7.1.3.1 Les trois niveaux de questionnement éthique en réalité virtuelle et augmentée

La question de l'éthique traverse l'ensemble des activités humaines. À ce titre, les dispositifs de la réalité virtuelle et augmentée ne peuvent faire l'économie de plusieurs questionnements sur le plan éthique. Ces questionnements, qui ne touchent pas les dispositifs en eux-mêmes, concernent trois domaines :

- Premièrement, en amont, ils concernent la finalité de ces dispositifs : quels objectifs ? Quels contenus ? Par exemple, sont-ils pensés pour inciter à la violence, pour attenter à la liberté de leurs utilisateurs, ou d'autres personnes ? Ces objectifs sont-ils conformes à l'éthique ? Ces questionnements sont communs à l'ensemble des problématiques d'ordre éthique touchant la technique et ne sont donc pas spécifiques à la réalité virtuelle et augmentée.
- Deuxièmement, ces questionnements concernent les usagers eux-mêmes lors de l'utilisation du dispositif, c'est-à-dire durant la phase d'exposition : leurs spécificités sont-elles prises en compte (notamment les enfants et les personnes souffrant de troubles d'ordre psychologique) et notamment leurs spécificités liées à leur sécurité ? L'utilisation du dispositif, le cas échéant, par des professionnels (psychologues ou techniciens), nécessite-elle des compétences particulières, voire une formation ? Ces questionnements sont, également, communs à l'ensemble des problématiques d'ordre éthique touchant la technique.
- Troisièmement, ces questionnements concernent les effets de l'utilisation de ces dispositifs. C'est ce troisième niveau d'interrogation qui est plus spécifique aux dispositifs de réalité virtuelle et augmentée, voire à certains jeux vidéo. En effet, les conséquences sur le plan éthique sont, globalement, de deux ordres : des effets intervenant durant l'exposition (les effets sont internes à l'environnement en réalité virtuelle et existent lors de la phase d'exposition) et/ou des effets qui se produisent dans l'environnement réel après l'exposition à la RV (les effets sont externes à

l'environnement RV et se manifestent lors de la phase post-exposition, on parle parfois de post effets).

### 7.1.3.2 Questionnements éthiques durant l'exposition

Les effets existant durant la phase d'exposition peuvent être définis de la manière suivante : ce sont les conséquences éthiques des comportements induits, à l'intérieur de l'environnement virtuel ou en réalité augmentée. Par exemple, il s'agit de se questionner sur le caractère éthique d'un environnement (contenu, *gameplay*<sup>33</sup>...) qui autoriserait, voire, aurait pour objectif, de tuer d'autres avatars. Dans ce cadre, le questionnement éthique est limité à l'environnement virtuel ou augmenté. La question éthique essentielle peut, alors, se formuler ainsi : est-il acceptable de concevoir, prescrire, commercialiser et utiliser un dispositif produisant un environnement au sein duquel l'éthique n'est pas respectée sous prétexte que cet environnement n'est pas réel ?

Certes, ce type d'interrogation est, de loin, antérieur aux dispositifs de réalité virtuelle et augmentée. Les enfants peuvent jouer à la guerre avec des armes factices et feindre de tuer, d'être blessés voire tués. Or, ils se situent, alors, dans une aire intermédiaire d'expérience (Winnicott, 1971) qui se caractérise par une forte mobilisation de la faculté d'imagination. En revanche, dans un environnement de réalité virtuelle ou augmentée, l'expérience vécue n'est pas imaginaire – imaginée par l'utilisateur. En effet, premièrement, elle est vécue sur un mode perceptif car l'environnement est perçu et non imaginé par l'utilisateur. Deuxièmement, elle est vécue sur un mode prescriptif car les règles ne sont pas inventées par l'utilisateur, elles lui sont prescrites par l'environnement.

Par conséquent, deux interrogations d'ordre éthique, au moins, se posent.

En premier lieu, le potentiel immersif de ces dispositifs (grâce notamment au 3D stéréoscopique et à la possibilité d'interactions en temps réel) n'est-il pas en mesure de rendre crédible, voire « réel », pour l'utilisateur, non seulement l'environnement perçu, mais également les interactions et les conséquences des actions produites sur cet environnement ? Pour le dire autrement, l'utilisateur n'est-il pas plus enclin à croire, par exemple, qu'il tue un autre avatar dans un environnement virtuel que lorsqu'il s'imagine le faire simplement par sa propre production d'images mentales ? Comment juger alors sur le plan éthique le comportement d'un utilisateur qui met à mort un avatar, sachant que la situation est très différente selon que la personne « tue » un avatar en n'imaginant pas l'utilisateur qui est derrière, ou qu'il le fait avec une représentation de celui-ci (Tisseron et Tordo, 2013) ?

Par ailleurs, ces questionnements se posent dans un contexte qui doit, notamment dans les environnements virtuels ludiques de type jeux vidéo, être précisé. En effet, les joueurs de jeux vidéo qui utilisent un avatar meurent aussi un très grand nombre de fois et se familiarisent rapidement avec l'idée que l'avatar frappé d'un « coup mortel » qui s'immobilise dans le jeu, tombe et disparaît (il est alors dit par les observateurs extérieurs au jeu qu'il est « tué », mais son « cadavre » s'efface très vite). Or, il se réincarne immédiatement dans un autre espace, de telle façon qu'on est plus proche ici de la règle du jeu de l'oie dans laquelle un joueur peut être renvoyé à la case départ que d'une situation dans laquelle la mise à mort consisterait à écarter un joueur de la vie, donc ici de la partie (Tisseron, 2009).

En second lieu, le fait que l'environnement fixe un objectif et que l'utilisateur ne puisse agir que selon certaines règles prescrites, soulève une autre question : comment évaluer sur le

---

<sup>33</sup> Le terme *gameplay* désigne, selon le site *Oxford Living Dictionaries*, les caractéristiques d'un jeu vidéo que sont l'intrigue et la façon dont on y joue, par opposition aux effets visuels et sonores. Il peut aussi se traduire par jouabilité et renvoie ainsi à différents aspects d'un jeu vidéo : ses règles, leurs applications concrètes dans une partie, les possibilités prévues par l'environnement du personnage virtuel.

plan éthique un utilisateur qui adhère à des règles imposées par l'environnement lorsque ces règles diffèrent ou entrent en conflit avec l'éthique dans le cadre de la vie quotidienne ? Par exemple, de nombreux jeux ne permettent pas à l'utilisateur de respecter la liberté et/ou la sécurité des autres avatars, de telle façon que le joueur peut agir de manière non éthique pour se conformer au *gameplay*, parce que les algorithmes ne lui donnent pas la possibilité de faire alliance avec les avatars générés par l'ordinateur – appelés *PNG*, pour « personnages non joueurs » (Coussieu, 2014). Qui est responsable des potentiels agissements non conformes à l'éthique ? Ceux qui conçoivent le dispositif (les concepteurs) ? Ceux qui recommandent ou incitent à l'utiliser (les prescripteurs) ? Ceux qui le commercialisent (les distributeurs) ? Ou ceux qui l'utilisent ?

Il est important de préciser toutefois que la plupart des jeux traditionnels créent des univers parallèles qui imposent des règles différentes de celles de la vie courante<sup>34</sup>. Mais le caractère non seulement interactif, mais aussi immersif des environnements de réalité virtuelle, confère une crédibilité, voire un réalisme à l'environnement, aux avatars et aux actions produites par l'utilisateur qui peuvent, potentiellement, être, sur le plan éthique, plus problématiques que le contexte d'un jeu traditionnel.

Globalement donc – et cela confère une spécificité du questionnement éthique appliqué à la réalité virtuelle et augmentée – les questionnements éthiques durant l'exposition font émerger l'alternative suivante : doit-on ou ne doit-on pas permettre à l'utilisateur de faire le choix de respecter les préceptes éthiques de la vie quotidienne dans un environnement virtuel ou augmenté, parallèlement à la possibilité de faire des choix non éthiques ? Et s'il est important de permettre à l'utilisateur de le faire, faut-il imposer aux fabricants que ces principes puissent être respectés ?

### 7.1.3.3 Questionnements éthiques post-exposition

Si, lors de l'exposition, les effets demeurent, en théorie, limités à l'environnement de réalité virtuelle et augmentée, les effets post-exposition impliquent d'autres enjeux éthiques.

Dans le premier cas (durant l'exposition), ce que nous appelons « effet » est caractérisé de la manière suivante : il s'agit de conséquences sur le plan éthique qui demeurent circonscrites au contexte d'exposition (durant un temps limité et dans un espace virtuel ou augmenté délimité).

Dans le second cas (après l'exposition), ce que nous appelons « effet » est caractérisé de la manière suivante : il s'agit de conséquences sur le plan éthique qui modifient la relation du sujet à son environnement au sens large (sa relation à autrui, sa manière d'agir en fonction de certaines circonstances, ses croyances, ses attitudes, etc.).

La question éthique qui en découle est la suivante : la transgression, le cas échéant, par l'utilisateur interagissant avec l'environnement virtuel ou augmenté durant l'exposition, des préceptes éthiques régissant la vie quotidienne constitue-t-elle une cause susceptible de produire de telles transgressions dans certaines conditions réelles et en fonction de certains publics ? Pour le dire simplement, dans quelle mesure l'exposition à un environnement de réalité virtuelle ou augmentée par exemple violent produit-il, chez l'utilisateur, des comportements réellement violents post-exposition ?

La légitimité, *a priori*, de cette question, se fonde sur l'existence et l'efficacité de dispositifs de réalité virtuelle et augmentée utilisés, par exemple, à des fins d'ordre thérapeutique (par exemple soigner les phobies). En somme, si certains dispositifs sont en mesure de modifier le comportement post-exposition d'un utilisateur – à des fins thérapeutiques – comment nier

---

<sup>34</sup> e.g. au *Monopoly*, nul n'est censé prêter de l'argent alors que toute la société est basée sur le crédit : tout joueur en difficulté doit être ruiné le plus vite possible sinon la partie ne s'arrête jamais.

l'existence d'effets sur le comportement en général par exemple de l'utilisateur – en l'occurrence néfastes – des dispositifs de réalité virtuelle et augmentés ?

Certes, dans le cas de dispositifs ayant pour objectif une réhabilitation relevant, par exemple, d'une thérapie, la finalité de l'exposition est de modifier le comportement post-exposition. Donc, les tâches à réaliser sont conçues de telle sorte à ce que les changements cognitifs et comportementaux de l'utilisateur puissent être exportés du virtuel vers le réel. Ainsi, l'efficacité du dispositif est estimée en fonction des effets attendus après l'exposition (par exemple disparition du trouble). Cela n'est pas nécessairement le cas dans d'autres environnements de type jeu vidéo par exemple où l'efficacité du dispositif est limitée au temps d'exposition (plaisir éprouvé par le joueur, score atteint). Par ailleurs, au cours d'une thérapie, la motivation de l'utilisateur est centrée sur l'apprentissage d'une désensibilisation, autrement dit sur sa capacité à surmonter un déplaisir, alors qu'elle peut concerner beaucoup d'autres domaines dans le cas d'une exposition ludique (exploration, challenge, recherche sociale...).

Malgré tout, ce n'est pas parce que le concepteur d'un dispositif ne se fixe pas des objectifs en matière d'importation de modalités cognitives et de comportements dans l'environnement réel qu'un tel phénomène d'importation n'existe pas. De tels post effets existent d'ailleurs pour d'autres médias, comme l'ont montré l'épidémie de suicides chez les lecteurs des « Souffrances du jeune Werther » de Goethe, sans parler de l'influence du cinéma sur les mises en scène criminelles.

En somme – et cela souligne, une fois encore, la spécificité du questionnement éthique appliqué à la réalité virtuelle et augmentée – il paraît légitime de souligner l'existence d'effets, au moins potentiels, de l'exposition à un environnement de réalité virtuelle ou augmentée après l'exposition, et la nécessité de recherches destinées à comparer ces post effets selon les médias audio-visuels utilisés : sont-ils différents dans le cas de la télévision, du cinéma, des écrans d'ordinateurs et des casques de réalité virtuelle ? Cette question est également intéressante du point de vue de la recherche de post effets spécifiques : si certains dispositifs de réalité virtuelle peuvent accroître l'empathie par exemple, le font-ils plus efficacement que d'autres médias, comme voir un film ou lire un livre (Bailenson, 2018) ?

## 7.2 Valeurs mises en jeu

Sans être en mesure d'identifier exhaustivement l'ensemble des facettes de l'activité humaine potentiellement impactées par l'utilisation de dispositifs de réalité virtuelle et augmentée, les effets potentiels de ces dispositifs peuvent avoir une influence sur les domaines suivants<sup>35</sup> : l'alimentation, l'éducation, la santé, l'emploi, l'économie, la vie sociale, la défense, la culture, la politique, la vie spirituelle, les questionnements philosophiques, le citoyen, les pouvoirs locaux, l'entreprise, l'État, les relations internationales...

Compte tenu du caractère récent de l'utilisation par les professionnels et par le public de ces dispositifs, une posture réflexive objective et fondée sur des études empiriques demeure encore, globalement, difficile à adopter pour tous les domaines cités. Si, sur le plan éthique, une vigilance de principe doit être proposée, elle doit éviter tout positionnement idéologiquement soit technophile, soit, au contraire, technophobe.

En somme, si la question de l'éthique dans le cadre de la réalité virtuelle et augmentée couvre un large spectre d'analyse, c'est parce que toute activité humaine est susceptible d'être évaluée en fonction de deux niveaux d'analyse. Premièrement, sur le plan des valeurs implicites ou explicites impliquées dans les actions individuelles, telles que le respect de la personne humaine, de sa liberté, de son droit à l'information. Deuxièmement, au niveau collectif ou sociétal, où il s'agit de ne pas produire d'inégalités ou d'injustices et de garantir à

---

<sup>35</sup> Académie des technologies - Grille d'évaluation éthique des technologies

chaque humain de pouvoir vivre en étant épargné par la violence. Ainsi, si, en droit, c'est-à-dire potentiellement, tout ce qui se rapporte à la volonté, à la décision, à l'action et à ses conséquences recèle une dimension éthique, comment circonscrire le champ de l'éthique dans le cadre de la réalité virtuelle et augmentée ?

Le postulat sur la base duquel les analyses proposées dans ce chapitre s'appuient peut donc être formulé de la manière suivante. L'exigence d'examiner sur le plan éthique la réalité virtuelle et augmentée s'impose pour chacune des parties impliquées à partir du moment où celle-ci touche des domaines concernés par l'éthique.

Les parties impliquées sont :

- le concepteur (*i.e.* celui qui élabore techniquement le dispositif) ;
- le financeur (*i.e.* celui qui, le cas échéant, finance le dispositif) ;
- le distributeur (*i.e.* celui qui diffuse et/ou commercialise ces dispositifs) ;
- le prescripteur (*i.e.* celui qui recommande l'utilisation de ces dispositifs) ;
- l'utilisateur (qu'il soit un particulier ou un professionnel).

Leur responsabilité éthique est impliquée à chaque fois que la réalité virtuelle ou augmentée implique :

- la personne utilisatrice, voire les animaux utilisateurs si c'est le cas<sup>36</sup> ;
- autrui, indirectement (*e.g.* famille, amis, collègues de travail, personnes à proximité de l'utilisateur durant la phase d'exposition) ;
- la vie en société (*e.g.* éviter la violence, les discriminations).

Ainsi, globalement, éthiquement parlant, l'utilisation de dispositifs de réalité virtuelle et augmentée peut avoir des effets problématiques de trois ordres :

- il peut exister un impact sur l'utilisateur lui-même, que ce soit durant la phase d'exposition ou post-exposition ;
- les dispositifs de réalité virtuelle et augmentée peuvent avoir également des conséquences sur autrui durant la phase d'exposition ou post-exposition ;
- ces dispositifs peuvent avoir également des conséquences sur la société.

### 7.2.1 Les effets problématiques potentiels sur l'utilisateur

Des effets problématiques mis en évidence par certaines études peuvent se limiter à l'utilisateur même s'il est possible de faire l'hypothèse que ces modifications en matière de croyances, attitudes ou comportement de l'utilisateur peuvent avoir des conséquences post-exposition sur autrui. Or, rigoureusement parlant, les études concernant les effets problématiques sur l'utilisateur n'envisagent pas les hypothétiques conséquences sur autrui (les études examinant de tels effets seront présentées dans la section suivante).

Ces effets peuvent concerner les éléments suivants, même s'il paraît important de considérer les potentielles variations en matière d'impact en fonction du type de dispositif et, en particulier, s'agissant, par exemple, de jeux vidéo, le contenu ou le *gameplay* (Bediou, 2018) :

- atteinte à la liberté et/ou à la sécurité de l'utilisateur (4 études) ;
- protection de la vie privée (1 étude) ;
- addiction (1 étude), troubles identitaires (1 étude), perturbation des inhibitions (1 étude) et désocialisation (4 études) ;
- divergences entre le jugement moral et les actes (1 étude).

---

<sup>36</sup> À titre d'exemple, consulter un article à propos de vaches équipées de casques de réalité virtuelle : [https://www.francetvinfo.fr/replay-radio/en-direct-du-monde/en-russie-des-casques-de-realite-virtuelle-pour-les-vaches-pour-reduire-le-stress-et-ameliorer-la-production-de-lait\\_3712241.html](https://www.francetvinfo.fr/replay-radio/en-direct-du-monde/en-russie-des-casques-de-realite-virtuelle-pour-les-vaches-pour-reduire-le-stress-et-ameliorer-la-production-de-lait_3712241.html).

### 7.2.1.1 Atteinte à la liberté et/ou à la sécurité de l'utilisateur

Il est important de souligner l'impact insidieux – car non conscient pour l'utilisateur – du *game mechanics design* sur l'utilisateur (Klemm et Pieters, 2017), c'est-à-dire des algorithmes qui déterminent son degré d'engagement et ses capacités d'interaction. En effet, l'utilisateur ne sait pas comment le programme (*software*) influence son comportement. Il croit disposer d'un espace de liberté en matière d'actions qui est, en réalité, contrôlé et limité par les objectifs du dispositif non visibles par l'utilisateur. Les objectifs fixés par le concepteur, les modalités et règles d'interaction avec l'environnement numérique ne sont pas connus par l'utilisateur. Ce fait soulève, par conséquent, la question éthique de la responsabilité des *game designers* ou, plus généralement, des concepteurs en matière de transparence des finalités des dispositifs. En d'autres termes, c'est l'asymétrie en matière d'information qui soulève un questionnement d'ordre éthique : les concepteurs ont conscience des règles à l'œuvre en matière d'interaction, or, l'utilisateur n'en a pas nécessairement conscience ou partiellement conscience. Sans verser dans un procès d'intention ou dans la réification de dystopies (e.g. *ExistenZ*, *Matrix*, *Avatar*), il est clair que les concepteurs, mais également les distributeurs ou les prescripteurs n'ont aucun intérêt à dévoiler l'envers du décor, car cela pourrait leur nuire de trois façons : sur le plan de la performance du dispositif, de ses effets sur les utilisateurs, voire sur les recettes générées par sa commercialisation. Il n'existe pas seulement des algorithmes qui structurent l'environnement virtuel ou augmenté en matière, par exemple, de contenu, de progression (dans le cadre par exemple d'un jeu vidéo ou d'un dispositif de formation), ou de liberté d'interaction, mais aussi d'autres, parfois appelés « *dark patterns* », qui exploitent les biais cognitifs des utilisateurs pour les piéger, leur faire acheter des objets ou donner des informations personnelles. Un effet collatéral de cette asymétrie de l'information peut, par exemple, se manifester dans la diffusion, sur le web, de vidéos montrant des environnements virtuels ou augmentés techniquement impossibles actuellement mais qui peuvent être crédibles pour le public<sup>37</sup>.

S'agissant d'une cible particulière – en l'occurrence des jeunes, il a été montré dans une étude portant sur 162 filles et 103 garçons âgés de 10 à 14 ans que la moralité est influencée à la fois par les valeurs de l'individu mais également par les particularités d'une situation (Siyahhan *et al.*, 2011). Ce qu'il faut retenir ici concerne essentiellement le fait que la sensibilité contextuelle augmente lorsque l'on est positionné dans une situation complexe, réaliste, où les sujets ont le sentiment d'appartenir à un groupe identifié. En somme, les environnements virtuels sont en mesure, en fonction de leur paramétrage (*i.e.* les variations en matière de contextes d'exposition possibles qu'ils permettent), d'avoir une influence non consciente sur les choix d'ordre éthique des individus concernés (et, par effet collatéral, sur les autres utilisateurs), donc sur leur degré de liberté durant la phase d'exposition.

Concernant la pratique d'un jeu en réalité augmentée, en l'occurrence *Pokémon GO*, si un article théorique envisage la possibilité que cette pratique puisse avoir des effets problématiques sur l'utilisateur en matière de liberté et de sécurité (Hussain *et al.*, 2018), une étude empirique a montré que de tels effets (par exemple violer des règles, se mettre en situation de danger, obstruer le passage des piétons, développer des habitudes et des pratiques risquées) ne sont pas déclarés par les utilisateurs (Alomar *et al.*, 2019).

### 7.2.1.2 Protection de la vie privée

Même si les effets problématiques concernant la protection de la vie privée restent de l'ordre du possible (*i.e.* ne sont pas prouvés empiriquement), ils doivent faire l'objet d'une attention particulière. Ceci est particulièrement le cas pour les environnements de réalité augmentée recourant à un dispositif de géolocalisation (Hussain *et al.*, 2018). En effet, ces dispositifs pourraient, à l'insu de l'utilisateur, permettre d'accéder, en temps réel ou lors d'une analyse

---

<sup>37</sup> Par exemple : <https://www.dailymotion.com/video/xbwa94>.

post-exposition, à des données de localisation susceptibles d'être croisées avec des données personnelles. Mais le problème est plus large, et concerne aussi les dispositifs de réalité virtuelle. D'ores et déjà, les dispositifs de jeux vidéo collectent énormément d'informations, Cela concerne les expériences de jeux telles que le temps passé, le type de jeu choisi, la géolocalisation (mais n'oublions pas que le domicile et les déplacements informent sur la catégorie sociale), les moments de jeux, le réseau de camarades retrouvés dans un jeu, etc. Mais cela concerne aussi tous les échanges d'informations entre joueurs. Dans les jeux en ligne, il est en effet fréquent que des joueurs parlent à un moment ou un autre de leur vie, de leurs parents, de leurs vacances, de leurs centres d'intérêt, etc. C'est pourquoi, en France, le choix de 15 ans est justifié par le nouveau règlement européen sur la protection des données personnelles (RGPD) qui fait obligation aux parents de donner leur autorisation lorsque des mineurs vont sur des espaces Internet susceptibles de capturer leurs données personnelles, qui sont aussi des données familiales. Les fabricants ne nient pas collecter ces données, mais expliquent les faire servir exclusivement à une amélioration des *game play*, et à des publicités destinées à aider chaque joueur dans ses choix (Tisseron, 2019).

### 7.2.1.3 Addiction, troubles identitaires, perturbation des inhibitions et désocialisation

#### **7.2.1.3.1 Addiction**

L'addiction, les troubles identitaires et la perturbation des inhibitions constituent des effets potentiels de l'exposition à la réalité virtuelle ou augmentée. Ces troubles d'ordre psychologique peuvent affecter directement l'utilisateur, mais également la nature de ses relations à autrui, notamment sa famille, ses amis, ses collègues de travail, et les personnes se trouvant à proximité de lui durant la phase d'exposition. En ce sens, ils sont en mesure de provoquer des pensées et des pratiques affectant non seulement l'unité psychologique de l'utilisateur, son bien-être et, par conséquent, son jugement et, en l'occurrence, produire des comportements éthiquement problématiques tout autant vis-à-vis de l'utilisateur lui-même (par exemple, ne plus prendre soin de soi-même) qu'indirectement vis-à-vis d'autrui (par exemple, en favorisant la désocialisation).

S'agissant de la question de l'addiction, elle dépasse très largement le domaine de la réalité virtuelle et augmentée. Si elle constitue une préoccupation légitime – relayée par les médias et l'opinion notamment – elle demeure, pour l'heure, de l'ordre de l'hypothèse. En effet, il n'existe pas, pour la communauté scientifique, « d'addiction aux écrans », mais seulement un « *gaming disorder* », traduit sur le site en français de l'OMS par « trouble du jeu vidéo », le mot « addiction » étant réservé aux situations dans lesquelles la désocialisation est complète depuis 12 mois, ce qui signifie une totale déscolarisation pour les adolescents et une absence complète d'activité professionnelle pour les adultes durant cette période. Ce trouble concernerait moins de 1 % de la population mondiale, et il reste contesté. Il n'est d'ailleurs pas reconnu par l'*American Psychiatric Association* et le DSM 5, la dernière et cinquième édition du Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux. Malgré tout, il paraît nécessaire d'être vigilant relativement à ce phénomène compte tenu du peu de recul dont nous disposons actuellement afin d'en estimer un effet (Hussaint *et al.*, 2018). Avec la réalité virtuelle ou augmentée, il est possible que la propension à s'enfermer dans l'espace généré par le dispositif soit plus importante que dans le cas d'autres activités ou dispositifs, ce qui produirait des modifications de comportement de l'utilisateur impactant la nature et l'intensité de ses relations sociales. En effet, plusieurs éléments propres à la réalité virtuelle et augmentée pourraient avoir un impact plus fort sur l'utilisateur comparé à d'autres dispositifs. Pour ne citer que quelques éléments significatifs : le caractère interactif de ces dispositifs (l'utilisateur agit et interagit dans l'environnement virtuel), la sensation d'être réellement dans l'environnement, son degré de multisensorialité, l'implication du corps (avec notamment l'immersion sensorimotrice), et, dans le cas de jeux ou d'environnements proposant une tâche à accomplir, du *challenge* à effectuer. Toutefois, il est important de préciser que les cas

« d'addiction » aux jeux vidéo, quand ils sont observés, s'accompagnent toujours de comorbidités, c'est-à-dire d'autres troubles associés. Il conviendrait donc de préciser quelles formes de co-morbidités pourraient être associées à des pratiques pathologiques de la réalité virtuelle et augmentée.

#### **7.2.1.3.2 Troubles identitaires**

Concernant un public spécifique – sujets souffrant de la maladie d'Alzheimer – et malgré la finalité éthiquement légitime puisqu'elle est thérapeutique, il apparaît que l'utilisation de *serious game* chez ces personnes peut causer des troubles de l'identité personnelle, notamment lorsque les environnements auxquels elles sont exposées sont trop réalistes (Robert *et al.*, 2014). Plus globalement, une exposition répétée à de tels environnements pourrait provoquer des troubles identitaires, voire des phénomènes de dépersonnalisation ou déréalisation chez des sujets souffrant de troubles d'ordre psychologique, voire, peut-être, chez des sujets considérés comme sains. En effet, ces environnements peuvent brouiller les frontières entre la réalité et l'illusion et peuvent, à cause de l'utilisation d'un avatar, provoquer des troubles dissociatifs, faisant naître des questions telles que : « Suis-je moi ? » ou encore « Où suis-je lorsque je suis dans un environnement virtuel ? ». L'environnement virtuel serait, en ce sens, un *pharmakon*, c'est-à-dire, à la fois ce qui est sensé provoquer un effet positif sur la santé et le bien-être de l'utilisateur et, en même temps, provoquer des effets indésirables. La question éthique se pose donc clairement dès lors que le ratio bénéfice/risque est non maîtrisé, voire privilégie les inconvénients sur les avantages.

#### **7.2.1.3.3 Troubles identitaires**

Dans le contexte d'une exposition à un jeu se déroulant dans un environnement hostile et effrayant, il a été montré qu'il peut émerger un sentiment de culpabilité face à la mise en danger d'un des autres joueurs, mais également une prise de distance de certains joueurs face aux choix éthiques qu'ils doivent faire : laisser mourir ou tuer l'avatar d'un autre joueur, dans la mesure où cela n'a aucune incidence sur la réalité (Cristofari et Guitton, 2014). L'étude montre, par ailleurs, qu'un phénomène de groupe – grégarisation des comportements – apparaît : les utilisateurs peuvent suivre et imiter le comportement d'autres utilisateurs (en réalité, de leurs avatars) afin de garantir leur sécurité quand bien même ces comportements les conduiraient à agir de manière non éthique. En ce sens, l'étude souligne le caractère potentiellement désinhibant – par l'effet de groupe couplé au caractère hostile de l'environnement – de certains environnements virtuels sur certains utilisateurs durant l'exposition.

Au-delà des comportements qui relèveraient d'une pathologie sur le plan psychologique, la fréquence accrue d'utilisation de dispositifs de type MMORPG's<sup>38</sup> pourrait provoquer (Klemm et Pieters, 2017), chez l'utilisateur, une perte des repères et habitudes usités dans la réalité (hygiène, nutrition).

Par ailleurs, même si cela est commun aux dispositifs de réalité virtuelle et augmentée et aux réseaux sociaux, il est possible de souligner le paradoxe de ces dispositifs qui permettent de communiquer, de partager, de jouer au sein d'un espace virtuel grâce à un dispositif isolant l'utilisateur sur le plan de l'environnement réel (Bauwens et Verstrynge, 2013). En effet, pour pouvoir entrer en communication avec autrui, l'utilisateur est réellement (physiquement) seul face au dispositif, ce qui peut provoquer un isolement social réel. En dépit de la pertinence de l'argument, il est important de relever que cet effet néfaste puisse être limité car rien ne prouve que cet isolement dans le réel ne soit pas compensé par la sociabilité permise par les réseaux et les environnements virtuels, en l'occurrence, multi-utilisateurs.

---

<sup>38</sup> MMORPG : *massively multiplayer online role-playing game*, (en français, JDRMM : Jeu de rôle en ligne massivement multijoueur).

La désocialisation (Bruni, 2011) peut également, à moyen ou long terme, être provoquée par le fait qu'un dispositif peut être utilisé et représenté par l'utilisateur comme ayant une finalité intrinsèque (*i.e.* en rupture avec les buts fixés dans l'environnement réel). En ce sens, il existe un risque que, dans l'hypothèse où ces dispositifs deviendraient des finalités en eux-mêmes et pas seulement des moyens, ils contribueraient à isoler l'utilisateur de son environnement physique et social en accentuant la rupture entre le virtuel et le réel. Sur le plan éthique, dans cette hypothèse, cela affecterait, chez l'utilisateur, l'ensemble des activités humaines relevant du vivre ensemble et permettant à des individus de « faire société ».

Enfin, la désocialisation pourrait être produite par une inadaptation progressive de l'utilisateur relativement à l'environnement réel (Fischer, 2018). En effet, l'intégration, notamment sensorimotrice (*e.g.* déplacements, gestes quotidiens) des dispositifs de réalité virtuelle est, aujourd'hui, limitée car le caractère immersif de l'expérience vécue par l'utilisateur ne prévoit pas ou très peu une interaction possible avec l'environnement réel durant la phase d'exposition. Les conséquences peuvent être immédiates (par exemple accidents liés à l'occultation de l'environnement réel lorsque l'utilisateur porte un casque) ou différées (par exemple modification voire perte de certains schèmes sensorimoteurs mobilisés dans l'environnement réel) (voir les parties 5.2 et 5.4).

#### 7.2.1.4 Divergences entre le jugement moral et les actes

L'exposition à un environnement extrêmement hostile pourrait entraîner une forme de divergence entre le jugement moral et les actes réels. Cristofari et Guitton (Cristofari et Guitton, 2014) mettent en évidence une dichotomie entre les résultats réels de l'action (comparés à la situation en ligne) et les jugements moraux (réflexions sur l'action post-exposition). L'utilisateur pourrait préserver sa morale, et pouvoir en témoigner, mais ses comportements s'en éloigneraient. Cette fracture serait perçue par l'utilisateur, qui ne verrait pas de raison de renoncer à ses repères moraux fondés intellectuellement, et elle pourrait être perçue douloureusement. Ces éléments engagent à formuler l'hypothèse qu'une forme de dissonance cognitive pourrait apparaître suite à de telles situations problématiques sur le plan éthique. Cela pourrait conduire à envisager de possibles effets post-exposition qui pourraient prendre la forme d'un mal-être, d'une culpabilité chez certains utilisateurs.

### 7.2.2 Les effets néfastes potentiels sur autrui

Les actions de l'utilisateur lors de la phase d'exposition peuvent produire des effets problématiques sur autrui de trois façons, pendant l'exposition elle-même, puis après :

- durant l'exposition, les actions de l'utilisateur dans l'environnement de réalité virtuelle ou augmentée ont un impact sur les autres avatars. L'effet produit demeure alors circonscrit dans le cadre de l'environnement : les conséquences n'affectent pas directement les utilisateurs mais un avatar ;
- durant l'exposition, les actions de l'utilisateur dans l'environnement de réalité virtuelle ou augmentée ont un impact sur les personnes qui sont physiquement proches de lui. L'effet se produit durant l'exposition, mais dépasse son cadre spatial puisque les actions produites dans l'environnement de réalité virtuelle ou augmentée ont un impact sur l'environnement réel de l'individu ;
- après l'exposition, les actions que l'utilisateur a accomplies dans l'environnement de réalité virtuelle ou augmentée peuvent avoir un impact sur les personnes qui vont entrer en interaction avec lui.

Ces effets peuvent concerner quatre domaines. Du fait de leurs intrications, ils seront dans ce qui suit analysés ensemble :

- atteintes à la liberté (7 études) ;
- atteintes à la sécurité (6 études) ;

- violence (5 études) ;
- illégalité (3 études).

Si, en s'appuyant sur un argumentaire théorique, il est possible d'envisager que la pratique du jeu en réalité augmentée *Pokémon GO* puisse, par les actions de l'utilisateur, porter atteinte à la liberté et à la sécurité des personnes se trouvant à proximité et conduire l'utilisateur à ne pas respecter la loi (Hussain *et al.*, 2018), une étude empirique a souligné que de tels effets n'ont pas été rencontrés. En effet, sur la base d'un questionnaire administré à 5 539 utilisateurs de *Pokémon GO*, une étude concernant les effets pouvant survenir durant la phase de jeu a montré qu'il n'existe pas d'effets néfastes déclarés sur la liberté et la sécurité des personnes ou des véhicules se trouvant à proximité des joueurs ni sur de possibles transgressions des lois (Alomar *et al.*, 2019).

Même si l'environnement est un jeu vidéo sur console et non un environnement virtuel, s'agissant de la violence potentiellement exercée sur autrui et, par conséquent, des restrictions en termes de liberté (*i.e.* la violence exerce une contrainte sur autrui) et de la mise en danger d'autrui (*i.e.* violation de l'intégrité physique et/ou morale), une étude expérimentale a exposé 70 sujets (35 hommes et 35 femmes, âge moyen 24 ans) à des stimuli et des situations relatifs à l'agressivité après 3 jours – à compter de 20 minutes par jour – de pratique soit de jeux violents, soit de jeux non violents (Hasan *et al.*, 2013). Les résultats de l'étude mettent en évidence le fait que les perceptions d'hostilité et de comportements agressifs post-exposition sont plus importants et ont augmenté au fil du temps de pratique (au cours des 3 jours consécutifs) pour les utilisateurs qui ont joué à des jeux vidéo violents, mais pas pour les joueurs de jeux vidéo non-violents. Toutefois, il semble important de faire les différences entre la modification des représentations, et celle des comportements, et également de faire la différence entre les conséquences des jeux violents coopératifs et les jeux non coopératifs, où le joueur joue seul contre tous (Lobel *et al.*, 2017), d'autant plus que la très grande majorité des jeux violents sont joués en réseau sur un mode collaboratif.

Allant, globalement, dans le même sens que les conclusions de l'étude précédente dans le contexte de jeux vidéo (*i.e.* en prouvant l'existence d'effets post-exposition de la pratique de jeux violents), une étude expérimentale a étudié deux groupes de sujets (les uns caractérisés par une pratique très fréquente des jeux vidéo violents ; les autres par une faible pratique de ce type de jeux). Ces deux groupes ont été exposés à des stimuli relatifs à l'agressivité après 25 minutes de pratique soit de jeux vidéo violents, soit de jeux non violents. Par ailleurs, un indicateur de l'état de violence des utilisateurs a été utilisé : le niveau de l'onde cérébrale P300 (Engelhardt *et al.*, 2011). Sur la base d'un échantillon constitué de 64 sujets (35 hommes et 29 femmes, âge moyen 24 ans), plusieurs résultats ont été mis en évidence, décrits ci-dessous.

En premier lieu, les sujets ayant joué à des jeux vidéo violents durant l'expérimentation sont plus agressifs que ceux ayant joué à des jeux non violents, qu'ils pratiquent fréquemment ou faiblement les jeux vidéo violents.

En second lieu, sachant que la faible amplitude de l'onde P300 est corrélée à des réactions violentes, il a été montré que :

- les images violentes (stimuli post jeu) produisent une amplitude plus faible de l'onde chez les sujets ayant des pratiques élevées de jeux vidéo violents comparé aux sujets pratiquant faiblement les jeux vidéo violents. Il n'est toutefois pas possible de savoir si jouer à des jeux violents diminuerait la réactivité à la violence ou si les sujets ayant une moindre réactivité à la violence seraient plus enclins à jouer à des jeux violents ;
- les sujets ayant une faible pratique des jeux violents ayant joué à un jeu violent lors de l'étude ont une plus faible amplitude de P300 que ceux qui ont joué à un jeu non violent ;

- lorsqu'ils sont exposés à des images violentes, les sujets ayant une forte pratique des jeux violents ont une plus faible amplitude de P300, qu'ils aient joué à un jeu violent ou non violent lors de l'étude.

En d'autres termes, le fait d'avoir joué à un jeu violent lors de l'étude n'a pas rendu les sujets pratiquant fréquemment les jeux violents plus violents encore.

Par ailleurs, une étude empirique souligne le fait que l'exposition de sujets à un environnement effrayant au sein duquel le joueur doit, pour la survie de son avatar, prendre des décisions pouvant mettre en péril la vie des autres avatars, pourrait conduire l'utilisateur à choisir de sacrifier les autres avatars (Cristofari et Guitton, 2014). Il est, néanmoins, possible de relativiser ces résultats. En effet, des études sur les catastrophes ont montré que ce qui domine, en situation de drames collectifs, ce sont les comportements d'entraide et de solidarité, comme si chacun se souvenait tout d'un coup qu'il ne peut pas s'en sortir seul. Le fait que le joueur fasse autrement avec les avatars pourrait être lié au fait qu'il joue à expérimenter d'autres solutions, parce que les algorithmes ne lui permettent pas de faire alliance avec les autres. Or, nous n'avons pas connaissance du spectre d'actions possibles permises dans le cadre de l'environnement proposé dans cette étude, d'autant plus qu'aucun environnement n'offre l'éventail de choix possibles dans le monde réel.

Sur le plan strictement théorique, force est de constater qu'au niveau des effets néfastes durant l'exposition liés à la pratique d'un jeu vidéo permettant à l'utilisateur de ne respecter ni la liberté, ni la sécurité des autres avatars – voire, parfois d'exercer de la violence à leur rencontre, ni les lois de l'environnement réel, le joueur peut agir de manière non éthique pour se conformer au *gameplay* (Coussieu, 2014). Même si l'article ne prouve pas empiriquement ce type de comportement, la pratique de tels comportements dans le cadre de jeux vidéo atteste de ce phénomène et questionne tout autant la responsabilité du concepteur, du financeur, du distributeur, du prescripteur et de l'utilisateur.

Or, contrairement aux travaux présentés précédemment, une étude conduite sur la base d'un questionnaire administré à 148 sujets (âge moyen 19 ans) dans le contexte de l'utilisation d'un jeu vidéo violent, les auteurs concluent à l'absence d'effets relativement à la perception de la violence chez les utilisateurs (Farrar *et al.*, 2013). Malgré tout, l'étude souligne des variations en matière d'agressivité en fonction des sujets exposés. Il est, en conséquence, important de prendre en compte les différences sur le plan de la réception de tels jeux en fonction des sujets qui y sont exposés.

Dans le même sens, des effets post-exposition à un contexte violent peuvent varier en fonction, d'une part, de la nature du stimulus (films violents vs jeux vidéo violents), mais également, en matière de variations interindividuelles et du genre chez les jeunes joueurs (Polman *et al.*, 2008). En effet, les auteurs ont montré que les garçons (vs les filles) qui ont joué à des jeux vidéo violents se sont comportés de façon plus agressive plus tard dans la journée que les garçons qui regardent des films violents. Par conséquent, l'effet des jeux vidéo violents sur l'agressivité semble être plus grande que l'effet de la violence télévisée.

### 7.2.3 Les effets problématiques potentiels sur la société

Les effets sur la société sont envisagés dans le cadre de 5 études portant respectivement sur :

- les pressions exercées sur les valeurs sociales ;
- l'exacerbation d'une représentation paranoïde des interactions sociales ;
- la *gamification* de la culture ;
- les inégalités sociales en matière de formation et d'outils à destination des professionnels de la santé et de soins aux patients ;
- une instrumentalisation possible par des praticiens des dispositifs de réalité virtuelle dans le cadre d'une approche thérapeutique à des fins commerciales.

### 7.2.3.1 Les pressions exercées sur les valeurs sociales

Même si l'analyse demeure strictement théorique, la vigilance est requise relativement aux transformations imposées par les technologies au cadre axiologique, c'est-à-dire au système de valeurs morales structurant la société (Royackers *et al.*, 2018). En effet, cette contribution souligne le fait que la vague de numérisation (internet des objets, robotique, biométrie, technologies persuasives, réalité virtuelle et augmentée, plateformes numériques) exerce une pression sur les valeurs publiques fondamentales structurant les sociétés démocratiques. Elle tend notamment à réduire la sphère de l'intimité, à encourager le renoncement à certaines libertés dans l'espoir d'un gain de sécurité, à donner une place considérable aux diverses formes de discriminations *via* Internet et à accroître les inégalités entre ceux qui maîtrisent ces technologies et ceux qui ne les maîtrisent pas. Ceux qui auront la capacité de comprendre ces enjeux et d'en estimer les risques sauront prendre du recul et s'en protéger. Mais pour la plupart des citoyens, il n'est pas possible de réaliser cette expertise. La question principale devient alors celle de l'information à donner aux utilisateurs pour leur permettre d'agir de manière éclairée, ou de se faire aider.

### 7.2.3.2 L'exacerbation d'une représentation agressive des interactions sociales

Même si cette contribution ne s'appuie pas sur des éléments de preuve empiriques (O'Brolcháin *et al.*, 2016), l'article pointe les dangers de la convergence des réalités virtuelles (RV) et des réseaux sociaux (SN) –appelée VRSN par les auteurs. Elle menacerait à la fois la vie privée et l'autonomie. Les menaces sur la vie privée concerneraient les informations, les personnes et les associations. Les menaces sur l'autonomie concerneraient les libertés, l'accès aux connaissances et à l'authenticité des informations. En même temps, la crainte de ces menaces pourrait conduire les utilisateurs à s'habituer à une vie sous surveillance et à modifier la représentation sociale de la liberté et des relations, des individus entre eux et des individus avec les organisations (entreprises, administrations, partis politiques).

Ce phénomène serait semblable à celui identifié par les travaux menés par George Gerbner (Gerbner, 1995), qui ont montré que la mise en scène de la violence à la télévision augmentait significativement la demande de présence policière, et habituaient les populations à accepter une élévation des contrôles de leurs déplacements et de leurs activités. Les spectateurs qui se perçoivent comme vulnérables ont en effet tendance à s'identifier aux victimes et à demander une protection accrue.

Ainsi, le développement des technologies de la réalité virtuelle et augmentée, pointé parfois (à tort ou à raison) par les médias comme un danger pour les libertés pourrait, au-delà de l'indispensable vigilance qu'il implique, accentuer des croyances et des pratiques d'autoprotection, voire de demande de protection accrue par les services de l'état ou des entreprises privées.

### 7.2.3.3 La gamification de la culture

Même si la posture de la contribution (Champion, 2016) demeure idéologiquement marquée – par une prise de position critique à l'égard des nouvelles technologies, les auteurs soulèvent une interrogation qui n'est pas dénuée de pertinence : l'utilisation de *serious game* à finalité culturelle est-elle cohérente (et favorable) avec (à) la culture ? En effet, si la culture est, par définition, une activité qui est en elle-même sa propre finalité et pas le moyen d'atteindre un but extrinsèque, recourir à un *serious game* – ou, plus globalement, à un jeu – afin de valoriser la culture ne constitue-t-il pas, paradoxalement, un frein à l'accès à la culture en tant qu'activité dénuée de finalité extrinsèque ? En somme, la diffusion de la culture auprès du public grâce

à de tels dispositifs ne risque-t-elle pas d'augmenter un phénomène de *gamification* de la culture<sup>39</sup> ?

#### 7.2.3.4 Les inégalités sociales en matière de formation et d'outils à destination des professionnels de la santé et de soins aux patients

Toute introduction de technologies innovantes peut faire surgir des inégalités quant à leur accès et à leur utilisation. Touchant à la fois la sphère professionnelle et la sphère privée, une contribution théorique pointe les inégalités sociales qui peuvent apparaître dans le contexte de l'utilisation de la réalité virtuelle ou augmentée dans le cadre de la sphère médicale. En effet, certains praticiens ou certaines cliniques proposent à leurs patients des soins en s'appuyant sur des dispositifs de réalité virtuelle ou augmentée alors que d'autres praticiens ou centres de santé ne les proposent pas pour des raisons d'ordre économique (Iserson, 2018). Ces inégalités concernent, alors, non seulement, l'accès à la formation et à l'utilisation de ces dispositifs par les professionnels de la santé, mais, également, par voie de conséquence, l'accès aux soins par les patients.

#### 7.2.3.5 Une instrumentalisation de dispositifs thérapeutiques à des fins commerciales

En dépit d'un échantillon réduit (4 hommes, 3 femmes avec une ancienneté de leur pratique allant de 8 à 20 ans), une étude (Klein et Borelle, 2019) s'appuyant sur une série d'entretiens avec des psycho-praticiens (psychothérapeutes, psychanalystes, psychologues et psychiatres) ayant recours à la thérapie par exposition à la réalité virtuelle souligne que : « Les professionnels rencontrés (...) ont été informés tôt de l'existence de la thérapie par exposition à la réalité virtuelle et ont investi rapidement dans cette possibilité, parfois à la demande de leurs patients. Pour certains praticiens, cette technologie leur a permis de proposer une nouvelle offre à moindre coût pour élargir leur patientèle ». Même si les professionnels de santé interrogés prennent des précautions – notamment suite à quelques erreurs – en n'immergeant pas le patient dès la première séance, force est de constater que les motivations sont, sur le plan éthique, problématiques en regard des motivations de certains praticiens. Sans aller jusqu'à violer l'article 5 du code de déontologie médicale (article R.4127-5 : Le médecin ne peut aliéner son indépendance professionnelle sous quelque forme que ce soit), il apparaît que, au-delà de la santé des patients, des motifs d'ordre mercantile peuvent conduire des professionnels de santé à utiliser les dispositifs de réalité virtuelle plutôt que de recourir à d'autres méthodes ou protocoles moins « vendeurs » pour leur patientèle. Des études sont nécessaires pour connaître l'efficacité de ces méthodes à long terme, notamment relativement à la qualité de l'accompagnement assuré par le thérapeute durant les séances.

## 7.3 Prospective

Dès lors que la recherche met en évidence, avec un niveau de preuve au moins suffisant, voire avéré, l'existence d'effets problématiques de l'utilisation de dispositifs de réalité virtuelle ou augmentée, il n'est plus possible, pour les acteurs impliqués, d'ignorer l'existence de tels effets. En conséquence, la connaissance d'effets néfastes potentiels devrait exiger sur le plan éthique, une prise en compte de ces effets par les acteurs impliqués dans la mise sur le marché de ces dispositifs mais également une prise en compte de la part des utilisateurs qui devront, pour cela, être parfaitement informés.

---

<sup>39</sup> Cette critique exclut, en revanche, les productions artistiques qui utilisent des dispositifs de réalité virtuelle ou augmentée étant donné que l'objectif de ces dispositifs ne s'inscrit pas dans une logique de diffusion de la culture, mais de pratique professionnelle – en l'occurrence artistique.

Au regard des études analysées, il est pertinent d'envisager quelques effets problématiques sur le plan éthique qui ne sont pas directement mentionnés dans la littérature. Ainsi, sans verser dans une posture technophobe, ni prétendre à l'exhaustivité, il est important de souligner certains effets néfastes potentiels sur le plan éthique.

### 7.3.1 Atteinte à la vie privée et à la propriété intellectuelle et industrielle

Même si aucune législation n'existe concernant l'utilisation des dispositifs de réalité virtuelle et augmentée en France, ces technologies sont régies par le Code de la propriété intellectuelle (cf. Législation applicable à la réalité virtuelle et/ou augmentée). Or, principalement dans le cadre de l'utilisation de dispositifs en réalité augmentée (c'est-à-dire d'un environnement réel dont la perception est augmentée d'éléments de synthèse), les utilisateurs doivent avoir conscience que le caractère hybride de l'environnement implique de prêter une attention particulière aux éléments présents dans l'environnement réel. En effet, deux problèmes se posent.

D'une part, certains éléments peuvent porter atteinte à la vie privée des personnes : le droit à l'intimité (prendre une photo de quelqu'un sans son consentement) et le droit à l'image (diffuser l'image de quelqu'un sans son consentement) seraient bafoués en cas de présence d'une personne sur un support en réalité augmentée diffusé sans son autorisation, sans compter que son image pourrait alors être exploitée par des personnes ou des entreprises à des fins qui échapperaient à celui qui a diffusé l'information.

D'autre part, les dispositifs de réalité augmentée offrent la possibilité à l'utilisateur d'enregistrer et de diffuser des éléments qui peuvent être détenus par une marque. Par exemple, le fait de prendre en photo et de diffuser certains environnements en réalité augmentée qui comportent des produits détenus par des entreprises ou des logos de marque n'est, actuellement, pas encadré par une législation. C'est le cas des filtres en réalité augmentée proposés par *Snapchat*. En l'absence de cadre légal, c'est à l'utilisateur de prendre conscience du fait que, par exemple, la présence d'un logo de marque sur un support (photo d'un environnement augmenté) le conduit à s'approprié (volontairement ou non) l'image de la marque présente sur le support et, le cas échéant, de bénéficier de l'image de la marque ou de détourner l'image de marque sans l'accord de son propriétaire.

### 7.3.2 Nécessité d'une approche écologique des dispositifs de réalité virtuelle et augmentée

Si la plupart des travaux sur les impacts des écrans au sens large se sont centrés jusqu'ici sur les corrélations entre, d'un côté, leur contenu et le temps passé à les utiliser, et, de l'autre, les comportements de leurs usagers, notamment en matière d'agressivité, de désensibilisation à la violence et de troubles de l'attention, il est essentiel de prendre en compte de nombreux autres facteurs susceptibles de faire varier leur impact sur l'utilisateur. En ce sens, il paraît nécessaire de recommander aux professionnels (principalement aux concepteurs et aux personnes utilisant ces dispositifs dans le cadre de leur activité professionnelle) de considérer ces dispositifs et leurs effets dans le cadre d'une perspective écologique (Bateson 1976). Par écologie, il faut entendre que tout processus mental émerge de l'interaction complexe entre différents éléments d'un système. Un système qui intègre donc non seulement ses éléments, mais également les relations (ou influences réciproques) qu'ils entretiennent entre eux. En ce sens, la conception de dispositifs de réalité virtuelle ou augmentée doit s'opérer selon une approche holiste, relationnelle et pragmatique qui ne se réduise pas seulement à des travaux conduits dans le cadre d'expérimentations conduites en laboratoire, mais en contexte d'utilisation.

Sans prétendre à l'exhaustivité, voici les facteurs essentiels qui doivent être pris en considération afin d'envisager le spectre le plus large possible en matière d'effets néfastes potentiels :

- les modalités de l'interaction avec l'environnement ;
- le contexte d'utilisation (à l'école, à la maison, sur le lieu de travail, à l'extérieur, pour les devoirs, pour les loisirs, en situation professionnelle, en mode mono ou multi-utilisateurs) ;
- le cas échéant, la situation d'apprentissage éventuelle (formelle ou informelle, au domicile, en classe, sur le lieu de travail, dans le cadre d'une formation professionnelle, avec un dispositif adapté ou non aux apprentissages) ;
- l'entourage de proximité (c'est-à-dire la structure de l'environnement familial ou professionnel) ;
- les caractéristiques de l'utilisateur (enfants, personnes âgées, personnes souffrant de troubles d'ordre psychologique...).

Ce dernier point relatif aux caractéristiques de l'utilisateur est particulièrement important en matière d'effets potentiels sur le plan éthique. En effet, si un adulte ne souffrant pas de troubles d'ordre psychologique ou cognitif est en mesure d'estimer si ses choix sont conformes à l'éthique, un enfant ou un adolescent ne possède pas nécessairement cette capacité de jugement. Sans s'appuyer sur une revue de la littérature relative au développement moral, il apparaît, sur la base des travaux fondateurs de Kohlberg (Kohlberg 1981), que la socialisation concernant le jugement moral implique l'existence d'une capacité limitée à produire des jugements conformes à l'éthique en fonction du stade de développement de l'individu. En effet, le premier niveau de développement dit pré-conventionnel, subsume deux stades qui manifestent que l'enfant n'a pas encore intégré les conventions morales. Au premier stade (4-7 ans), la moralité de l'enfant se réduit à la simple obéissance. Le corollaire est que ce qui est immoral est ce qui est puni. Au second stade (8-11 ans) l'enfant considère qu'une action juste est celle qui peut satisfaire ses besoins. Dans le niveau dit conventionnel, sa conduite cherche à se conformer aux attentes de son groupe d'appartenance lors du premier stade (12-16 ans). Ce n'est que lors des stades ultérieurs que ses jugements peuvent se référer à une éthique partagée par la société au sein de laquelle il vit.

Même si les travaux fondateurs de Kohlberg souffrent de quelques limites, ils engagent au moins à exercer une vigilance relative à l'exposition des enfants à des contenus non conformes à l'éthique durant certaines étapes de leur développement, compte tenu du fait que leur référentiel sur le plan éthique est en construction.

Par ailleurs, des expériences menées avec des adultes ont montré que nous avons tendance à déduire de la similarité physique une similarité de caractère et d'intentions (Mackinnon *et al.*, 2011), et à préférer ceux qui nous ressemblent, que ce soit par la coiffure, le port de lunettes, la couleur de peau ou tout autre caractère. C'est ce que Martin Hoffman (Hoffman, 2008) a appelé le « biais de familiarité ». Ce biais est inné. Un très jeune enfant confronté à une situation immorale choisit le plus souvent de récompenser le personnage ayant un comportement moral, sauf lorsque l'examineur a choisi de donner au personnage immoral une apparence qui évoque l'enfant. Ainsi, lorsqu'un très jeune enfant est invité à choisir entre venir en aide ou récompenser un personnage dans un conflit, il a plutôt tendance à choisir celui qui lui ressemble (Bloom, 2013), par exemple par la couleur de son T-shirt, plutôt que celui qui a un comportement « éthique ». C'est l'un des buts de l'éducation de tenter de réduire ce biais.

Ainsi, sur le plan éthique, considérer, *a priori*, l'ensemble des utilisateurs comme un public homogène en matière de réception est problématique. Il est donc recommandé de concevoir et d'utiliser sur le plan professionnel des dispositifs en prenant en compte les particularités des utilisateurs et la complexité de son environnement.

### **7.3.3 Effets problématiques potentiels sur les comportements prosociaux : exercer une vigilance raisonnable**

La limitation des comportements prosociaux (c'est-à-dire de comportements orientés vers autrui et son bien-être), voire une tendance à la désocialisation de l'utilisateur ou à une inclinaison accrue au recours à la violence, ont fait l'objet de publications dont le niveau de preuve ne permet pas toujours d'attester systématiquement de l'existence de tels effets. Touchant majoritairement les dispositifs de type jeux vidéo, la question des effets néfastes sur les comportements prosociaux, se manifestant, par exemple, par la désocialisation ou encore l'agressivité, requiert d'adopter une posture vigilante. Sans même faire l'hypothèse de l'existence d'effets néfastes de l'exposition à des environnements virtuels éthiquement questionnant sur les représentations et les comportements des utilisateurs post-exposition, il est nécessaire que des recherches soient conduites afin d'estimer si de tels effets existent et, le cas échéant, de les caractériser et d'en mesurer les conséquences à court, moyen et long terme, en distinguant ce qui relève de la représentation, qui peut être inhibée, du comportement, qui peut s'accompagner, ou non, d'une modification des représentations.

### **7.3.4 Le cas de dispositifs éthiquement sensibles par nature : le secteur de la santé**

L'utilisation de dispositifs de réalité virtuelle ou augmentée soulève des questionnements éthiques liés aux spécificités de certains secteurs d'activités et, en particulier, dans le champ de la santé.

Si toutes ces questions ne sont pas nécessairement abordées dans la littérature académique, elles demeurent pourtant centrales sur le plan de l'éthique de la pratique médicale utilisant des dispositifs de réalité virtuelle ou augmentée. Sans prétendre apporter une réponse à ces interrogations, il paraît important de souligner quelques enjeux essentiels :

- étant donné le caractère attractif et, le cas échéant, performant (diffusé par les médias) de certains dispositifs de réalité virtuelle ou augmentée, les praticiens de santé peuvent être enclins à recourir à l'utilisation de dispositifs à des fins essentiellement mercantiles (augmentation de la patientèle) ;
- compte tenu de la complexité de ces dispositifs, le praticien de santé est-il en mesure d'informer de manière satisfaisante le patient des effets indésirables potentiels de ce type de dispositif ?;
- comment le praticien de santé peut-il échapper à l'incohérence inhérente à l'utilisation de ce type de dispositifs ? En effet, le praticien de santé doit respecter une double exigence contradictoire : l'exigence de performance du dispositif (par exemple faire croire au patient qu'il est dans un environnement « réel » afin d'optimiser sa sensation d'être présent dans l'environnement) et l'exigence d'informer le patient concernant le caractère fictif de cet environnement ;
- à la différence de praticiens dont l'activité est dépendante de dispositifs techniques complexes mais qui bénéficient, dans le cadre de leur formation, de compétences relatives au fonctionnement de ces dispositifs (par exemple diplôme d'études spécialisées en radiologie), le praticien qui utilise des dispositifs de réalité virtuelle ou augmentée ne reçoit pas de formation relative au fonctionnement et aux effets de ces dispositifs ;
- cette dépendance de la pratique médicale à une technologie est, également, problématique sur le plan éthique, car les dispositifs de réalité virtuelle ou augmentée sont produits par des professionnels hors du champ de la santé, donc pas nécessairement soumis à un code de déontologie.

### **7.3.5 De la nécessité d'un cadre éthique pour les professionnels**

Si l'utilisateur peut, dans le cadre de l'utilisation de dispositifs de réalité virtuelle ou augmentée, être confronté à des choix qui sont problématiques sur le plan éthique, sa conduite ne peut raisonnablement pas être cadrée par une déontologie même s'il est souhaitable que l'utilisateur prenne conscience que certaines actions produites lors de l'exposition ne sont pas exemptes de difficultés sur le plan de l'éthique.

Parallèlement, la responsabilité du concepteur, dont les choix en matière de création de l'environnement virtuel ou augmenté peuvent également soulever des questions éthiques (e.g. contenu violent), est nécessairement engagée. Qui plus est, ces potentielles questions éthiques touchent non seulement le concepteur, mais également d'autres acteurs.

En effet, qui est responsable, le cas échéant, des potentiels agissements non conformes à l'éthique ? Ceux qui conçoivent le dispositif (les concepteurs) ? Ceux qui le financent le cas échéant ? Ceux qui recommandent ou incitent à l'utiliser (les prescripteurs) ? Ceux qui le commercialisent (les distributeurs) ? Ou ceux qui l'utilisent dans le cadre de leur activité professionnelle (e.g. les professionnels de santé, les formateurs) ? Ceux qui ne légifèrent pas pour encadrer l'utilisation et le contenu des dispositifs ?

Comment, dans ce contexte, proposer un cadre qui permette aux acteurs professionnels de prendre des décisions conformes à l'éthique ?

La conception de l'éthique proposée par la théorie procédurale de la justice (Rawls, 1971) constitue une piste qui peut s'avérer pertinente. Cette théorie se fonde sur trois postulats :

- l'éthique doit permettre de prendre des décisions et non pas de tenter de dériver les décisions sur la base d'une morale abstraite et donc inopérante ;
- l'éthique doit être consensuelle et non absolue, donc non fondée sur une transcendance ;
- l'éthique doit tenter de dépasser le relativisme historique et culturel par l'émergence d'un consensus entre l'ensemble des acteurs impliqués, en l'occurrence, les concepteurs, les financeurs, les prescripteurs, les distributeurs et les utilisateurs (professionnels et particuliers).

Le principe de l'éthique procédurale de Rawls est le suivant : le caractère juste d'un précepte éthique, d'une décision ou d'une action est garanti par le caractère juste du contexte, de la situation ou des conditions dans lesquelles ce précepte, cette décision ou cette action sont choisis. En somme, c'est la procédure suivie pour prendre une décision qui rend la décision juste (d'où l'expression « justice procédurale »). Or, à quelles conditions ce contexte est-il juste ?

Ce contexte est éthiquement pertinent à condition que chacun des acteurs ignore (ou se met en position artificielle de feindre d'ignorer) ses propres caractéristiques, ce qui neutralise, temporairement et artificiellement, toute tentative de prendre une décision qui pourrait l'avantager. Ce contexte est dénommé par Rawls, la situation originelle sous voile d'ignorance. Concrètement, ni les concepteurs, ni les financeurs, ni les prescripteurs, ni les distributeurs, ni les utilisateurs ne peuvent chercher à maximiser leur intérêt puisqu'ils se placent dans une position où ils ignorent le statut qu'ils occupent au sein de l'ensemble des acteurs.

Même si Rawls envisage que ces prises de décision puissent être prises par un seul individu se mettant dans la position du voile d'ignorance, il est souhaitable que des représentants de l'ensemble des acteurs impliqués participe à ce processus de prise de décision. Idéalement, il peut être recommandé de constituer un groupe de représentants d'acteurs permettant, a minima, de donner un avis sur le plan éthique relatif à la mise sur le marché d'un dispositif de réalité virtuelle et augmentée, voire de labelliser un dispositif qui serait conforme aux préceptes éthiques consensuellement élaborés. Par ailleurs, afin de permettre aux

concepteurs et aux financeurs de participer à la mise sur le marché de dispositifs de réalité virtuelle et augmentée conformes à l'éthique, un code de déontologie pourrait être élaboré.

## 7.4 Conclusions

Les études analysées permettent d'identifier trois principaux types d'effets problématiques liés à l'utilisation de la réalité virtuelle et augmentée sur le plan éthique.

En premier lieu, des effets problématiques sur l'utilisateur : atteinte à sa liberté et/ou à sa sécurité (4 études), protection de la vie privée (1 étude), addiction (1 étude), troubles identitaires (1 étude), perturbation des inhibitions (1 étude), désocialisation (4 études) et divergences entre le jugement moral et les actes (1 étude).

En second lieu, des effets problématiques sur autrui : atteinte à la liberté d'autrui (7 études), atteinte à sa sécurité (6 études), à son intégrité physique due à des comportements violents (5 études) et illégalité (3 études).

En dernier lieu, des effets sur le plan sociétal : des pressions exercées sur les valeurs sociales, l'exacerbation d'une représentation paranoïde des interactions sociales, la *gamification* de la culture, l'existence d'inégalités sociales en termes de formation et d'outils à destination des professionnels de la santé et de soins aux patients et une instrumentalisation possible par des praticiens de santé des dispositifs de réalité virtuelle et augmentée à des fins commerciales.

Par ailleurs, une vigilance doit être exercée relativement à des effets potentiellement problématiques qui, sans bénéficier d'un niveau de preuve suffisant dans la littérature ni être nécessairement abordés dans les études, doivent être considérés sur le plan au moins prospectif. En effet, l'utilisation de dispositifs de réalité virtuelle et augmentée peuvent porter atteinte à la vie privée et à la propriété intellectuelle et industrielle. En outre, il est recommandé d'adopter une approche écologique des dispositifs de réalité virtuelle et augmentée. Il est également recommandé d'exercer une vigilance raisonnable concernant les effets problématiques potentiels sur les comportements prosociaux, et de prendre conscience que le secteur de la santé constitue un domaine d'application de la réalité virtuelle et augmentée promis à un développement considérable et éthiquement sensible. Enfin, il paraît aujourd'hui nécessaire d'élaborer un cadre éthique pour chacune des catégories professionnelles impliquées dans la conception, la commercialisation et l'utilisation de la réalité virtuelle et augmentée.

## 8 Conclusions du groupe de travail

Les usages de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée (RV/RA) se sont largement développés ces dernières années avec un spectre large d'applications (loisirs, santé, formation, industrie, ...), poussés par les évolutions technologiques et tirés par le potentiel entrevu de ces technologies. Les atouts revendiqués de la réalité virtuelle et augmentée mis en avant, qui ne sont qu'évoqués dans ce rapport, laissent envisager une forte pénétration sur le marché et un usage par des populations de tous âges dans toutes les sphères de l'activité humaine. Néanmoins, les effets sanitaires néfastes observés dans la pratique et rapportés dans la littérature scientifique nécessitent que leur niveau de preuve soit évalué et que des recommandations soient établies le cas échéant.

La réalité virtuelle (RV) et la réalité augmentée (RA) désignent des formes spécifiques d'interaction humain-machine. Dans le cas de la RA, il s'agit d'une interaction avec des objets virtuels générés par des moyens informatiques permettant d'enrichir l'information véhiculée par les objets et l'environnement réels. Dans le cas de la RV, l'utilisateur est en interaction et en immersion dans un monde virtuel entièrement généré par ordinateur, au moyen d'interfaces sensori-motrices.

La RV et la RA ont été définies et présentées dans le cadre de cette expertise notamment à l'aide d'un panorama composé de trois axes :

- une classification des applications et des contextes d'utilisation ;
- une présentation des dispositifs et interfaces de ces technologies (interfaces visuelles, dispositifs auditifs, interfaces haptiques) ;
- une présentation des contenus sous différents angles (scènes et stimuli, expérience vécue par l'utilisateur, modalités d'interactions avec le dispositif).

Par la suite, et de manière à mieux comprendre les effets potentiels néfastes de la réalité virtuelle et augmentée sur la santé humaine, les mécanismes physiologiques mis en jeu lors de l'interaction avec ces technologies ont été décrits, tant pour les aspects visuels que pour le système vestibulaire et le système nerveux périphériques, notamment le système nerveux autonome. Les risques pour la santé associés à l'usage de la RV/RA ont été abordés selon les trois points suivants :

- l'exposition de la population à la RV et/ou la RA ;
- les effets sanitaires néfastes liés à la RV et/ou la RA ;
- les questionnements éthiques que soulève l'utilisation de ces technologies.

### Exposition de la population à travers l'usage de la RV et/ou RA

Peu de données sont disponibles concernant l'exposition de la population générale et professionnelle à la RV et/ou RA. Quelques études ont été recensées et des sondages ont été menés par l'Agence pour documenter ce volet. L'expertise a ainsi permis de :

- préciser les caractéristiques des utilisateurs de la RV ou de la RA en France.

Chez les adultes, ce sont plus souvent des hommes (57 %) avec un âge moyen de 40 ans, de catégorie socio-professionnelle supérieure (43 %) et ayant une bonne maîtrise des outils technologiques. Chez les enfants, ce sont plutôt des garçons (55 %), âgés de 12,7 ans en moyenne. Plus globalement, les classes d'âges les plus représentées sont 9-11 ans et 12-14 ans.

- donner de premières évaluations de l'exposition, dans la sphère professionnelle et privée, en matière de temps d'exposition, de contenus visionnés et de dispositifs utilisés.

Qu'elle concerne la RA ou la RV, la durée moyenne d'une séance d'utilisation dépasse une heure pour la quasi-totalité des usages (de 1h06 à 1h54 selon le type d'application) et la durée médiane se situe à 1 heure, aussi bien pour les adultes que pour les enfants. Dans la vie personnelle, la RV est davantage utilisée que la RA, tandis que dans le cadre professionnel, on observe un usage assez similaire des deux technologies.

Dans la vie personnelle, l'usage hebdomadaire est principalement associé aux jeux vidéo, surtout chez les enfants. Le *smartphone* est le premier support utilisé par les adultes tandis qu'il s'agit de la console de jeu chez les enfants. Toutefois, les adultes, comme les enfants, utilisent en moyenne 3 types d'interfaces différents, les plus cités étant le *smartphone*, les visiocasques dédiés et les consoles de jeux.

Dans le cadre professionnel, l'usage hebdomadaire est relatif à des applications liées à la formation, la santé ou la gestion des stocks et le *smartphone* est moins utilisé au profit de l'ordinateur, des visiocasques ou des écrans.

### Effets sanitaires néfastes liés à une exposition à la RV et/ou RA

Une recherche bibliographique a permis d'identifier plus de 300 publications, sur la période de janvier 2010 à janvier 2020, s'intéressant aux effets sanitaires néfastes éventuels de la RV et/ou RA.

En effet, les technologies de RV/RA peuvent avoir des effets positifs sur la santé et être utilisés dans un cadre thérapeutique, mais ici, les travaux d'expertise avaient pour objectif d'évaluer le niveau de preuve associé aux potentiels effets sanitaires néfastes uniquement.

Les grandes catégories d'effets sanitaires documentés dans la littérature scientifique recensée sont :

- les effets liés à l'ergonomie des interfaces de RV et/ou RA (troubles musculo squelettiques, accidentologie<sup>40</sup>, effets liés à l'hygiène des interfaces, effets liés au niveau sonore des interfaces) ;
- la cybercinétose : nausées, vomissements, maux de tête, inconfort général, effets visuels, effets physiologiques (cardiaques, gastriques, respiratoires, cutanés, ...), effets vestibulaires (vertiges) ;
- les effets sanitaires liés à la coordination sensori-motrice consécutifs à l'exposition ;
- les effets neurologiques (crises d'épilepsie) ;
- les effets sur le développement (émotionnel, cognitif, du système visuel et auditif) ;
- les effets psychologiques et psychosociaux (risques émotionnels, déréalisation, dépendance à l'égard de l'interface et du contenu, effets liés au contenu (violence, rapport à la sexualité, ...), isolement social) ;
- les effets liés à la modification de la représentation de soi (par le biais d'avatars) ;
- les effets liés aux agents physiques émis par les dispositifs de RV et/ou RA (effets liés à la lumière bleue et à la modulation temporelle de la lumière émises, effets liés aux champs électromagnétiques émis).

La qualité méthodologique des publications identifiées a ensuite été évaluée. Ce corpus de publications s'intéresse dans sa très grande majorité aux effets sur la cybercinétose lors d'une exposition à la réalité virtuelle. Le niveau de preuve de l'existence de chaque effet sanitaire

---

<sup>40</sup> On entend ici par accident les chutes ou heurts liés par exemple à un déficit d'éclairage ou encore à l'occultation ou l'encombrement de l'espace environnant.

recensé lié à l'exposition à la RV/RA a été évalué à partir des études de qualité suffisante. Les résultats de cette évaluation sont présentés ci-après.

### **Effets sanitaires suffisamment documentés**

Pour ce qui concerne la RV, certains effets sanitaires étaient suffisamment documentés pour permettre au groupe de travail de les mettre en évidence et d'évaluer le niveau de preuve associé :

- la cybercinétose incluant les effets sur le système périphérique, les effets sur la posture et l'équilibre et les effets visuels ;
- les effets survenant seulement après l'exposition (modification de capacités sensorimotrices et perceptives) ;
- les effets liés aux agents physiques : effets liés à la lumière bleue, effets liés à la modulation temporelle de la lumière (maux de tête, fatigue visuelle, ...), effets liés aux champs électromagnétiques émis par les dispositifs.

L'intensité de ces effets dépend des dispositifs d'exposition (interface) et du contenu proposé, mais également de la sensibilité individuelle de chacun.

### **Cybercinétose**

#### *Symptômes et mesures physiologiques*

La cybercinétose regroupe un ensemble de symptômes qui peuvent être éprouvés lors d'une exposition à la réalité virtuelle : pâleur, sensation de malaise, troubles visuels, désorientation, maux de tête, fatigue, vertiges, nausées, vomissements, tachycardie, hypersalivation. La cybercinétose concerne entre 30 et 50 % des utilisateurs, selon les types de populations (cf. sondage *OpinionWay* pour l'Anses), et peut apparaître très rapidement après le début de l'expérience (en moins de 5 minutes). La possibilité d'apparition de la cybercinétose est très dépendante du contenu (tour de montagnes russes, ou au contraire paysage calme, ...), du champ visuel sollicité (plus il est large, plus les symptômes peuvent être augmentés), ou encore de l'interface visuelle et du mode d'interaction.

Les symptômes visuels, fréquents dans la cybercinétose, peuvent être de la fatigue oculaire, des troubles oculomoteurs, des migraines et céphalées liés à la fatigue oculaire, une vision trouble pendant et après l'exposition, un inconfort visuel, une sensation de sécheresse oculaire, des brûlures oculaires et des larmoiements. Ces symptômes sont en général temporaires et disparaissent dans les minutes ou heures qui suivent l'exposition.

Quelques études mettent en évidence une augmentation de l'instabilité posturale pendant ou après l'exposition à la réalité virtuelle, pouvant aller jusqu'à la perte d'équilibre lorsque le contenu est provocateur (montagne russe). Si le risque de perte d'équilibre diminue très vite au cours même de l'exposition, la persistance de l'instabilité posturale après exposition est encore mal documentée.

Les expériences de RV induisent également des effets sur les systèmes nerveux central et autonome, selon des mécanismes encore assez méconnus. La combinaison de mesures subjectives (*via* des questionnaires validés) et objectives (mesures physiologiques) permet d'évaluer la sévérité des symptômes de cybercinétose ressentis lors d'une expérience en réalité virtuelle. Il existe une corrélation entre la sévérité subjective des symptômes et leur manifestation sur le plan physiologique (variables cardiaques, neurologiques et sensorielles, cutanées, digestives, respiratoires, ...). En général, les effets augmentent avec le temps d'exposition et/ou les contenus provocants (situation virtuelle, vitesse ou sens de navigation, ...), mais diminuent avec la répétition des séances et donc l'habituation.

Les mécanismes d'apparition de ces effets sont complexes, multifactoriels et mal compris à ce jour. Il semblerait que les personnes ayant une instabilité posturale préalable à l'exposition développent plus de symptômes.

#### *Contextes favorisant l'apparition de la cybercinétose*

L'analyse des études recensées a permis de mettre en évidence l'existence de facteurs technologiques et de facteurs individuels comme étant liés à un risque accru d'apparition de cybercinétose, même si les liens ne sont ni compris ni maîtrisés. L'hétérogénéité des facteurs pris en compte, des temps et modalités d'exposition, de l'utilisation des différents questionnaires (e.g. pendant l'exposition, avant et après, après uniquement), limite la possibilité de conclure sur les conditions d'apparition de la cybercinétose.

Parmi les facteurs technologiques, le mode de navigation est souvent incriminé dans les facteurs causaux, mais les éléments de preuve apportés par les études disponibles ne permettent pas de conclure quant à son implication directe. Par contre, la présence d'un flux d'air (environnement correctement aéré), d'une musique agréable ou d'un parfum agréable a un effet bénéfique sur l'intensité de la cybercinétose.

Le mode de diffusion du rendu visuel peut également augmenter la sévérité des symptômes ressentis. L'utilisation d'un visiocasque, par exemple, est liée à une cybercinétose plus prononcée (en matière de sévérité des symptômes), sans toutefois pouvoir distinguer le rôle du rendu stéréoscopique, du mouvement actif de la tête, ou encore du type de contrôle sur l'environnement visuel.

La limitation des mouvements ou des techniques de respiration aident également à réduire la sévérité des symptômes chez les personnes sensibles.

Enfin, peu d'études s'intéressent aux facteurs technologiques autres que visuels qui sont potentiellement contributifs à l'apparition de la cybercinétose. Malgré tout, il a été démontré que le rendu auditif d'un mouvement alors que l'on est statique peut provoquer l'apparition de cybercinétose.

La susceptibilité au mal des transports, l'expérience d'utilisation de la RV et l'acuité des systèmes sensoriels ont un lien avec l'apparition de la cybercinétose. De plus, certaines personnes peuvent être plus sensibles que d'autres à l'apparition de la cybercinétose, comme les personnes anxieuses, les personnes dont l'âge se situe entre 12 et 50 ans (période de plus grande sensibilité multi-sensorielle), les femmes en milieu de cycle menstruel, les femmes enceintes, les personnes sensibles au mal des transports, les personnes sujettes aux migraines.

Lorsque ces personnes sont soumises à des expositions, elles doivent, pour réduire le risque d'apparition de symptômes, éviter la visualisation de mouvements rapides et multidimensionnels (sur plus de deux axes, accélérations, flux en sens avant et arrière), les mouvements du corps, et éviter les visiocasques. Limiter les mouvements du corps en s'asseyant, par exemple, sur un siège avec dossier permet également de limiter les symptômes.

Le groupe de travail conclut que les éléments de preuve disponibles dans les études expérimentales chez l'humain sont suffisants pour conclure à l'existence d'un lien entre l'exposition à la RV et l'apparition de la cybercinétose. La cybercinétose est donc un effet avéré de l'exposition à la RV. Les symptômes semblent réversibles, néanmoins le groupe de travail s'interroge sur leur durée de persistance.

### ***Les effets de modification de capacités sensorimotrices et perceptives survenant seulement après l'exposition***

L'expertise a soulevé l'existence d'effets néfastes survenant après l'exposition liés aux incongruences sensorielles lors de l'exposition : modification de capacités sensorimotrices et perceptives.

Le groupe de travail conclut que l'effet de l'exposition à la RV et les effets sur l'habileté manuelle et sur la capacité à orienter son corps est avéré. Ces effets peuvent perdurer plusieurs heures après l'exposition, et on suppose que le retour à des performances existant avant exposition dépend du type d'incongruence vécue.

### ***Effets liés aux agents physiques***

Une campagne de mesure sur des visiocasques<sup>41</sup> de réalité virtuelle a été entreprise lors de cette expertise et a permis de documenter les niveaux de champs électromagnétiques émis et de caractériser la modulation temporelle de la lumière issue des visiocasques.

Les champs électromagnétiques émis par les dispositifs de RV sont générés par les émetteurs radiofréquences (Wi-Fi, *Bluetooth*, 4G, 5G, etc.) et par des perturbations électromagnétiques potentiellement générées par les circuits, capteurs et équipements électroniques intégrés dans les casques. Les niveaux de champs mesurés sur les casques de RV sont faibles et bien inférieurs aux valeurs limites d'exposition réglementaires.

Par contre, tous les casques testés présentent une très forte modulation temporelle de la lumière avec des taux de modulation de l'ordre de 100 % dans une gamme de fréquence allant de 70 à 90 Hz. Le groupe de travail rappelle que l'expertise de l'Anses publiée en 2019 portant sur les effets sanitaires des LED avait conclu que : « l'effet de la modulation temporelle de la lumière (dans la bande de fréquences de 1 à 80 Hz) sur le déclenchement de crises d'épilepsie est avéré » et que « l'effet de la modulation temporelle (dans la bande de fréquence de 50 à 120 Hz) de la lumière sur la fatigue visuelle, le déclenchement de maux de tête, de migraines est possible ».

Les niveaux de luminance de la lumière émise par les écrans de dispositifs de RV sont faibles, mais cette lumière peut être riche en bleu. Or, toute exposition à de la lumière riche en bleu avant le coucher peut interférer avec la régulation des rythmes circadiens. Par ailleurs, les conséquences d'une exposition de longue durée et à courte distance des yeux sont encore incertaines. Les enfants et les adolescents ayant un cristallin en cours de maturation, filtrant très mal la lumière bleue, sont donc des populations plus sensibles à l'ensemble des dispositifs émettant de la lumière bleue.

### ***Effets sanitaires néfastes pour lesquels il n'est pas possible de conclure (manque de données)***

Pour la RV/RA, le manque de données dans la littérature scientifique (pas d'études ou trop peu d'études selon les effets) n'a pas permis pas de conclure à l'existence d'effets sanitaires néfastes pour les effets suivants :

- effets liés à l'ergonomie, par exemple troubles musculo-squelettiques (TMS), survenue d'accidents (pas d'études en RV, trop peu d'études en RA avec une focalisation sur la seule RA mobile) ;
- effets psychologiques et psychosociaux (trop peu d'études) ;
- effets de la représentation de soi dans le monde virtuel (trop peu d'études) ;
- effets neurologiques (pas d'études) ;

---

<sup>41</sup> Seuls des visiocasques avec écrans intégrés ont été testés, les visiocasques utilisant des *smartphones* n'ont pas été testés.

- effets sur le développement (pas d'études longitudinales).

En ce qui concerne les effets liés à l'ergonomie, les études disponibles, dont le nombre est faible, comportent des limites méthodologiques. Focalisées sur la RA en situation de mobilité, ces études rapportent une prévalence faible des atteintes musculo-squelettiques, analogue à celle observée pour d'autres formes d'activité physique légère à modérée se déroulant en extérieur. Les rares synthèses s'intéressant à la RV ou la RA fournissent des données qualitatives sur la variété d'atteintes physiques, sans toutefois renseigner sur leur prévalence. Ces atteintes sont de types blessures, fractures, atteintes au niveau des tendons. Une autre dimension examinée concerne l'impact en matière de charge de travail.

En ce qui concerne les effets de la représentation de soi dans le monde virtuel (avatar), le sujet est investigué depuis peu en raison des progrès technologiques récents en matière de visiocasques, de rendu réaliste et de puissance de calcul. Les études sont très parcellaires et s'intéressent essentiellement à des situations où les caractéristiques de l'avatar sont imposées à l'utilisateur. Néanmoins, elles semblent indiquer que le sentiment d'incarnation dans un humain virtuel (avatar) a une influence. Cette influence, pas simplement liée à des critères de plaisir ou de réalisme, semble être bien réelle et se traduit par des modifications du comportement. Si les études montrent principalement des modifications du comportement, considérées comme « positives » (comportement plus social, moins sensible aux stéréotypes de genre ou racistes), ces modifications pourraient également être « néfastes », même si cela n'a pas été étudié directement, pour des motifs éthiques. Elles peuvent donc être considérées comme problématiques et les données disponibles suffisent à souligner une nécessaire vigilance.

En ce qui concerne les autres effets psychologiques ou psychosociaux, un ensemble très restreint d'études portant sur l'évaluation des effets psychologiques potentiellement nocifs attribués à la RV a été identifié. Les études se sont en particulier penchées sur l'éventualité d'une altération du rapport au réel. Les quelques études évaluant les idéations paranoïaques après exposition en RV ne permettent pas de statuer sur un possible effet néfaste spécifique à la RV. Bien qu'il existe une étude montrant qu'il est possible d'induire des symptômes assimilables à de la déréalisation avec la RV, ceux-ci ne seraient pas forcément néfastes et pourraient même participer au bien-être de la personne. La question de l'exposition à des contenus violents a également été abordée, mais sans qu'il soit possible de faire la distinction entre les effets des contenus violents et les effets du dispositif de RV.

Il n'existe pas de données concernant des effets neurologiques néfastes d'une exposition à la RV/RA.

Pour ce qui concerne les effets néfastes sur le développement, il n'existe pas d'étude longitudinale permettant de juger des effets sur le long terme d'une exposition à la RV/RA. Néanmoins, le groupe de travail s'interroge sur les effets d'une exposition à la RV/RA pendant l'enfance ou l'adolescence sur le développement (dans l'ensemble de ses dimensions, psychologique, visuel, sensori-moteur, ...).

### **Populations sensibles**

Le groupe de travail a identifié, au travers des études analysées, des groupes de populations sensibles à une exposition à la RV et/ou RA figurant ci-dessous.

La RV/RA est utilisée sur certaines de ces populations dites sensibles dans un contexte de rééducation thérapeutique, pour diminuer les symptômes décrits, dans un cadre médical averti des risques. Il convient dans ce cadre de porter une attention particulière aux recommandations du groupe de travail.

- les populations sensibles à l'exposition à la RA/RV en raison d'une pathologie préexistante qui implique un dysfonctionnement du système nerveux autonome :
  - les personnes souffrant de certaines pathologies cardiaques (angor, insuffisance cardiaque, troubles du rythme, troubles de conduction cardiaque non contrôlé) ou métaboliques avérées (diabète compliqué de neuropathie), hypertension artérielle non contrôlée) ;
- les populations *a priori* davantage sensibles à la cybercinétose de par leur état physiologique et aux conditions de déstabilisation liées à la RA/RV, dues aux difficultés d'intégration multi sensorielle :
  - les femmes enceintes ;
  - les personnes souffrant de troubles vestibulaires (pathologies otolithiques, réflexe vestibulo-oculaire anormal notamment aux fréquences moyennes et rapides) ;
  - les personnes souffrant du mal des transports ;
  - les personnes présentant des anomalies de la statique posturale et/ou de l'équilibre dynamique avec troubles de la proprioception (troubles cervicaux, troubles ostéo-articulaires importants, personnes souffrant de la maladie de parkinson, personnes âgées, ...) ;
  - les personnes sujettes à des troubles oculomoteurs (strabisme, trouble de la convergence, anisophorie, anisométrie (trouble de la réfraction asymétrique), amblyopie relative (différence de perception visuelle entre les deux yeux), amétropie non corrigée) ;
  - les personnes souffrant de pathologies ou d'anomalies oculaires ;
  - les personnes sujettes aux migraines ;
  - les personnes au tempérament anxieux ou sujettes à des crises d'anxiété.
- les populations davantage sensibles aux rayonnements lumineux émis par les dispositifs, de par leur âge ou leurs conditions médicales :
  - les nourrissons, les enfants, les adolescents, les jeunes adultes (cristallin clair) ; les personnes aphakes (absence de cristallin) et pseudo-phakes (cristallin artificiel) ; les personnes souffrant de pathologies ou d'anomalies oculaires ;
  - les personnes souffrant de troubles du sommeil ;
  - les personnes souffrant d'épilepsie photosensible.

## Aspects éthiques

La revue de la littérature portant sur les aspects éthiques avait pour objectif d'examiner les études proposant un questionnement d'ordre éthique dans le cadre de l'exposition des utilisateurs à des dispositifs de RV et de RA, ainsi que sur les effets sur autrui et sur le plan sociétal. Les conclusions portant sur les effets sanitaires ainsi que les questionnements éthiques sont rapportés ci-dessous, ainsi que des recommandations pour un usage adapté.

La littérature relative aux questionnements d'ordre éthique soulevés par la RV/RA est hétérogène sur le plan de sa légitimité scientifique. De nombreuses publications se contentent d'affirmer, sans le prouver, un certain nombre de thèses qui dérivent généralement d'une posture idéologique (par exemple technophobie). En somme, il existe peu d'études fondées, soit sur une approche de terrain, soit sur une argumentation rationnelle ou une démonstration.

Sans reprendre le détail des conclusions du chapitre consacré à l'éthique, quelques éléments de réflexion émergent. En effet, il serait pertinent de conduire une réflexion plus approfondie et concertée en présence des acteurs impliqués (concepteurs, financeurs, distributeurs, prescripteurs, utilisateurs professionnels et particuliers) à propos de plusieurs interrogations fondamentales.

Est-il acceptable, sur le plan éthique, que des environnements virtuels ou augmentés puissent échapper aux questionnements éthiques sous prétexte qu'ils n'appartiennent pas à l'environnement physique ? Pour le formuler différemment, les acteurs impliqués (du concepteur à l'utilisateur final) doivent-ils prendre pour cadre de référence de leurs décisions et de leurs actions dans la RV/RA les préceptes éthiques qui guident, le cas échéant, leur choix et leurs actes dans l'environnement physique ? Cette question trouve évidemment un prolongement dans la possibilité qui doit être laissée à l'utilisateur de faire dans les mondes virtuels, des choix en accord avec sa philosophie personnelle, et à ne pas le contraindre à choisir entre deux éventualités également condamnables à ses yeux (par exemple, dans une fuite, un compagnon nous ralentit : j'ai le choix entre l'abandonner ou le tuer. L'aider à marcher n'est pas dans les options que me propose le concepteur...).

Est-il acceptable, sur le plan éthique, que les acteurs impliqués ne prennent pas en compte les effets (avérés et/ou potentiels) de l'exposition à un environnement virtuel ou augmenté pouvant survenir dans les suites de l'exposition ? La responsabilité de ces acteurs s'arrête-t-elle aux « frontières » spatiales et temporelles de l'environnement virtuel ou augmenté ou ne doit-elle pas être étendue au-delà (dans l'environnement physique pendant et après l'exposition) ? Le cas échéant, comment borner cette responsabilité dans l'espace et dans le temps et à qui l'attribuer ?

Par ailleurs, l'existence de postures idéologiques (par exemple, technophiles vs technophobes) diffusées dans les médias, dans certains ouvrages et présentes dans les discours du public contribuent à la cacophonie relative au rapport bénéfices risques liés à la RV/RA. L'idée que l'exposition à des dispositifs de RV provoquerait des phénomènes de dépendance et d'addiction constitue un exemple d'opinion infondée sur le plan scientifique. En revanche, une connaissance des comorbidités en présence chez un sujet souffrant d'addiction permettrait d'exercer une vigilance plus grande fondée sur une étude plus systématique de ce type de comportement. En somme, une éthique d'une information scientifiquement fondée doit (re-)trouver sa place afin de garantir que les décisions des acteurs puissent être encadrées par des préceptes éthiques. Notamment celles du concepteur qui crée un environnement prescrivant des actions éthiquement contestables, celles d'un professionnel utilisant un dispositif auprès du public sans l'informer des effets néfastes possibles, et celles d'un utilisateur dont le comportement est éthiquement questionnable.

## **Recommandations du groupe de travail**

Le groupe de travail a souhaité formuler un certain nombre de recommandations visant à informer la population, à encadrer les usages en vue de la protéger et à améliorer les connaissances dans le domaine des effets sanitaires potentiels liés à une exposition à la réalité virtuelle et augmentée.

### *Recommandations visant à informer les populations sur les effets sanitaires*

Dans la mesure où le groupe de travail a identifié des effets sanitaires avérés, ou pour lesquels il n'est pas encore possible de conclure, il convient d'informer la population (professionnels et particuliers), par des moyens adaptés, que l'usage de la RV/RA peut :

- conduire à l'apparition de cybercinétose et de ses symptômes liés, certains pouvant persister après l'exposition ;

- avoir des conséquences au niveau sensorimoteur (par exemple : habileté manuelle ou capacité à orienter son corps) après une exposition ;
- avoir, dans le cas de l'usage d'avatar, de possibles répercussions sur leur comportement pendant et après l'exposition ;

Dans ce contexte, il convient d'informer la population sur les précautions à adopter :

- prendre un temps de repos après l'exposition, notamment avant l'usage d'un véhicule ou l'utilisation d'outils ou de machines ;
- arrêter immédiatement son exposition en cas d'apparition de symptômes, sauf en cas d'utilisation dans un cadre thérapeutique ou professionnel accompagné ;

Enfin, il convient de conseiller aux populations sensibles de limiter leur exposition.

*Recommandations à visée réglementaire ou d'encadrement des usages visant à protéger les populations en limitant la survenue des effets :*

- protéger les populations les plus sensibles (*cf.* ci-dessus) en rendant obligatoire leur information et en limitant les temps d'exposition, voire en limitant l'accès à la RV/RA ;
- encadrer, en dehors de l'usage privé, l'utilisation des technologies par :
  - le recours à des lieux adaptés présentant notamment une salle permettant un temps de repos après l'exposition pour limiter le risque d'accidents liés à une désadaptation temporaire à l'environnement réel ;
  - la surveillance par des personnes averties des risques de telle sorte que les personnes utilisant la RV/RA ne constituent pas un danger pour eux ou pour d'autres personnes (salle de RV, espace suffisant, ...) ;
  - un moyen pour l'utilisateur d'arrêter son exposition à tout moment, dans la mesure où l'expérience de RV et/ou RA peut affecter le bien-être de la personne ;
  - une information sur les tranches d'âges préconisées pour les contenus utilisés (par exemple en utilisant la normalisation).

Et plus spécifiquement dans le cadre professionnel :

- imposer des alternatives à la RV dans le monde professionnel, la RV n'étant pas adaptée à tous ;
- encourager la création de formation des utilisateurs des dispositifs RA/RV (formateurs, personnels de santé, ...).

*Recommandations d'études et de travaux de recherche :*

De façon générale, de manière à pouvoir mieux exploiter les résultats issus de travaux de recherche dans l'évaluation des risques sanitaires liés à l'exposition à la RV/RA, il convient d'améliorer la reproductibilité des études et la description des dispositifs technologiques et des procédures dans les publications scientifiques (caractérisation de l'exposition, des dispositifs utilisés, temps d'exposition, etc.).

Une meilleure documentation des effets sanitaires pour lesquels il n'a pas été possible de conclure est nécessaire, ainsi qu'une meilleure compréhension des mécanismes d'apparition associés :

- investiguer les risques psychologiques et psychosociaux liés à l'usage de la RV/RA ; effets sur le développement d'une exposition des enfants ; effets neurologiques potentiels ;
- mieux comprendre les effets de l'incarnation dans un avatar ;

- mieux documenter les effets consécutifs à l'exposition ou survenant après l'exposition ;
- identifier plus précisément les facteurs techniques (interfaces, durée d'exposition, contexte et type d'usage...) et les facteurs inter-individuels impliqués dans la survenue des différents effets délétères sur la santé ;
- analyser les contenus grands publics des technologies de RV pour juger des incongruences subies et des possibles effets après l'exposition.

Plus spécifiquement sur la cybercinétose, il convient de mener des études complémentaires qui permettraient de :

- mieux documenter les facteurs individuels pouvant favoriser l'apparition de la cybercinétose ;
- investiguer les mécanismes d'apparition de la cybercinétose et leur lien avec les différents paramètres technologiques ;
- étudier la possibilité de mettre en œuvre des tests avant l'exposition visant à mesurer l'organisation posturale et les oscillations spontanées du corps, dans le but de prédire si une personne sera sujette ou non à la cybercinétose.

En matière d'exposition, un effort reste à mener pour obtenir une meilleure caractérisation des populations exposées et des usages :

- mieux connaître les usages pour évaluer de façon plus pertinente les risques associés ;
- mieux connaître la population et les durées d'exposition ;
- mieux documenter l'exposition de la population aux différents agents physiques : lumière bleue, modulation temporelle.

Une prise en compte des aspects éthiques :

- conduire une réflexion à propos des problématiques éthiques impliquées dans l'exposition à la RV/RA, en premier lieu ;
- en second lieu, engager une réflexion concernant les dispositions légales qui pourraient encadrer l'utilisation de dispositifs de RV/RA.

**Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail (et par le comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ») : 11 décembre 2020.**

## 9 Bibliographie

- Aardema, Frederick, Kieron O'Connor, Sophie Côté, et Annie Taillon. 2010. « Virtual Reality Induces Dissociation and Lowers Sense of Presence in Objective Reality ». *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking* 13 (4): 429-35. <https://doi.org/10.1089/cyber.2009.0164>.
- Akdal, Gülden, Aynur Ozge, et Gül Ergör. 2013. « The Prevalence of Vestibular Symptoms in Migraine or Tension-Type Headache ». *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation* 23 (2): 101-6. <https://doi.org/10.3233/VES-130477>.
- Aldaba, Cassandra N., Paul J. White, Ahmad Byagowi, et Zahra Moussavi. 2017. « Virtual reality body motion induced navigational controllers and their effects on simulator sickness and pathfinding ». *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS 2*: 4175-78. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2017.8037776>.
- Alharbi, Ahmad A., Eric G. Johnson, Abdulaziz A. Albalwi, Noha S. Daher, Tim K. Cordett, Oluwaseun I. Ambode, et Fahad H. Alshehri. 2017. « Effect of visual input on postural stability in young adults with chronic motion sensitivity: A controlled cross-sectional study ». *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation* 27 (4): 225-31. <https://doi.org/10.3233/VES-170534>.
- Allen, Brian, Taylor Hanley, Bas Rokers, et C. Shawn Green. 2016. « Visual 3D motion acuity predicts discomfort in 3D stereoscopic environments ». *Entertainment Computing* 13: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2016.01.001>.
- Almeida, Ana, Francisco Rebelo, Paulo Noriega, et Elisangela Vilar. 2017. « Virtual Reality Self Induced Cybersickness: An Exploratory Study ». *Advances in Intelligent Systems and Computing* 588: 26-33. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-60582-1>.
- Alomar, Noura, Mansour Alsaleh, et Abdulrahman Alarifi. 2019. « Behavioral consequences of Pokémon GO: The exaggerated picture ». *Computers in Human Behavior* 90 (janvier): 223-45. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.08.040>.
- Anderson, Heather A., Gloria Hentz, Adrian Glasser, Karla K. Stuebing, et Ruth E. Manny. 2008. « Minus-Lens-Stimulated Accommodative Amplitude Decreases Sigmoidally with Age: A Study of Objectively Measured Accommodative Amplitudes from Age 3 ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 49 (7): 2919-26. <https://doi.org/10.1167/iovs.07-1492>.
- Anses. 2014. « Effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en vision stéréoscopique « 3Ds » - Rapport d'expertise collective », 2014.
- Atkinson, J., O. Braddick, et J. French. 1980. « Infant Astigmatism: Its Disappearance with Age ». *Vision Research* 20 (11): 891-93. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(80\)90070-x](https://doi.org/10.1016/0042-6989(80)90070-x).
- Atkinson, Janette, Oliver Braddick, Marko Nardini, et Shirley Anker. 2007. « Infant Hyperopia: Detection, Distribution, Changes and Correlates-Outcomes from the Cambridge Infant Screening Programs ». *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry* 84 (2): 84-96. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e318031b69a>.
- Bach, Cédric, et Dominique Scapin. 2004. « Obstacles and Perspectives for Evaluating Mixed Reality Systems Usability ». *Mixer workshop, Proceedings of IUI-CADUI Conference*, janvier.
- Banakou, Domna. 2017. « The Impact of Virtual Embodiment on Perception, Attitudes, and Behaviour ». Thèse de doctorat, Barcelone, Espagne: Universitat de Barcelona. <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/119902>.
- Banks, M. S. 1980. « The Development of Visual Accommodation during Early Infancy ». *Child Development* 51 (3): 646-66.
- Barberia, Itxaso, Ramon Oliva, Pierre Bourdin, et Mel Slater. 2018. « Virtual Mortality and Near-Death Experience after a Prolonged Exposure in a Shared Virtual Reality May Lead to Positive Life-Attitude Changes ». Édité par Pedro Antonio Valdes-Sosa. *PLOS ONE* 13 (11): e0203358. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203358>.

- Barbero, Erika M., Diane M. Carpenter, Joetta Maier, et Daniel S. Tseng. 2018. « Healthcare Encounters for Pokémon Go: Risks and Benefits of Playing ». *Games for Health Journal* 7 (3): 157-63. <https://doi.org/10.1089/g4h.2017.0180>.
- Barot, C., D. Lourdeaux, J.-M. Burkhardt, K. Amokrane, et D. Lenne. 2013. « V3S: A Virtual Environment for Risk-Management Training Based on Human-Activity Models ». *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 22 (1): 1-19. [https://doi.org/10.1162/PRES\\_a\\_00134](https://doi.org/10.1162/PRES_a_00134).
- Barrett, . 2012. « Ganong's Review of Medical Physiology, 26e | AccessMedicine | McGraw-Hill Medical ». 2012. <https://accessmedicine.mhmedical.com/book.aspx?bookID=2525>.
- Bauwens, Joke, et Karl Verstrynge. 2013. « Digital Technology, Virtual Worlds, and Ethical Change ». *Techné: Research in Philosophy and Technology*. 1 mars 2013. <https://doi.org/10.5840/techné20131717>.
- Bediou, Benoit, Deanne M. Adams, Richard E. Mayer, Elizabeth Tipton, C. Shawn Green, et Daphne Bavelier. 2018. « Meta-Analysis of Action Video Game Impact on Perceptual, Attentional, and Cognitive Skills ». *Psychological Bulletin* 144 (1): 77-110. <https://doi.org/10.1037/bul0000130>.
- Bem, Daryl J. 1972. « Self-Perception Theory11Development of Self-Perception Theory Was Supported Primarily by a Grant from the National Science Foundation (GS 1452) Awarded to the Author during His Tenure at Carnegie-Mellon University. » In *Advances in Experimental Social Psychology*, édité par Leonard Berkowitz, 6:1-62. Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2601\(08\)60024-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2601(08)60024-6).
- Benoit, Michel, Rachid Guerchouche, Pierre David Petit, Emmanuelle Chapoulie, Valeria Manera, Gaurav Chaurasia, George Drettakis, et Philippe Robert. 2015. « Is it possible to use highly realistic virtual reality in the elderly? A feasibility study with image-based rendering ». *Neuropsychiatric Disease and Treatment* 11: 557-63. <https://doi.org/10.2147/NDT.S73179>.
- Bertrand, Philippe, Jérôme Guegan, Léonore Robieux, Cade Andrew McCall, et Franck Zenasni. 2018. « Learning Empathy Through Virtual Reality: Multiple Strategies for Training Empathy-Related Abilities Using Body Ownership Illusions in Embodied Virtual Reality ». *Frontiers in Robotics and AI* 5 (mars): 26. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00026>.
- Biocca, Frank. 1997. « The Cyborg's Dilemma: Progressive Embodiment in Virtual Environments ». *Journal of Computer-Mediated Communication* 3 (2): 0-0. <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00070.x>.
- Birch, E. E., et S. Salomão. 1998. « Infant Random Dot Stereoacuity Cards ». *Journal of Pediatric Ophthalmology and Strabismus* 35 (2): 86-90.
- Birch, E. E., et W. H. Swanson. 1992. « Probability Summation of Acuity in the Human Infant ». *Vision Research* 32 (10): 1999-2003. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(92\)90059-r](https://doi.org/10.1016/0042-6989(92)90059-r).
- Blade, Richard A., et Mary Lou Padgett. 2002. « Virtual environments standards and terminology ». In *Handbook of Virtual Environments Design, Implementation, and Applications*, 55-68. CRC Press.
- Bloom, Paul. 2013. *Just babies: The origins of good and evil*. Just babies: The origins of good and evil. New York, NY, US: Crown Publishers/Random House.
- Bobier, W. R., A. Guinta, S. Kurtz, et H. C. Howland. 2000. « Prism Induced Accommodation in Infants 3 to 6 Months of Age ». *Vision Research* 40 (5): 529-37. [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(99\)00196-0](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(99)00196-0).
- Bos, Jelte E., Sjoerd C. de Vries, Martijn L. van Emmerik, et Eric L. Groen. 2010. « The effect of internal and external fields of view on visually induced motion sickness ». *Applied Ergonomics* 41 (4): 516-21. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.11.007>.
- Bourgeois-Bougrine, Samira, Peter Richard, Jean-Marie Burkhardt, Benjamin Frantz, et Todd Lubart. 2020. « The Expression of Users' Creative Potential in Virtual and Real Environments: An Exploratory Study ». *Creativity Research Journal* 32 (1): 55-65. <https://doi.org/10.1080/10400419.2020.1712162>.

- Bowman, Doug A., Joseph L. Gabbard, et Deborah Hix. 2002. « A survey of usability evaluation in virtual environments: classification and comparison of methods ». *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 11 (4): 404–424. <https://doi.org/10.1162/105474602760204309>.
- Brandt, T., P. Bartenstein, A. Janek, et M. Dieterich. 1998. « Reciprocal Inhibitory Visual-Vestibular Interaction. Visual Motion Stimulation Deactivates the Parieto-Insular Vestibular Cortex ». *Brain: A Journal of Neurology* 121 ( Pt 9) (septembre): 1749-58. <https://doi.org/10.1093/brain/121.9.1749>.
- Brémond-Gignac, Dominique, Henri Copin, Alexandre Lapillonne, Solange Milazzo, et European Network of Study and Research in Eye Development. 2011. « Visual Development in Infants: Physiological and Pathological Mechanisms ». *Current Opinion in Ophthalmology* 22 Suppl (avril): S1-8. <https://doi.org/10.1097/01.icu.0000397180.37316.5d>.
- Bruckman, Amy, et Mitchel Resnick. 1995. « The MediaMOO Project: Constructionism and Professional Community ». *Convergence: The International Journal of Research into New Media Technologies* 1 (1): 94-109. <https://doi.org/10.1177/135485659500100110>.
- Bruni, Luis. 2011. « Cognitive Sustainability in the Age of Digital Culture ». *TripleC* 9 (octobre): 473-82. <https://doi.org/10.31269/vol9iss2pp473-482>.
- Buisine, Stéphanie, et Jérôme Guegan. 2020. « Proteus vs. social identity effects on virtual brainstorming ». *Behaviour & Information Technology* 39 (5): 594-606. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2019.1605408>.
- Burkhardt, Jean-Marie. 2003. « Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques ». *Le travail humain* Vol. 66 (1): 65-91.
- Cahour, Béatrice, Pascal Salembier, et Moustapha Zouinar. 2016. « Analyzing lived experience of activity ». *Le travail humain* Vol. 79 (3): 259-84.
- Champion, Erik. 2016. « Entertaining the Similarities and Distinctions between Serious Games and Virtual Heritage Projects ». *Entertainment Computing* 14 (mai): 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2015.11.003>.
- Champney, Roberto K., Kay M. Stanney, Phillip A. K. Hash, Linda C. Malone, Robert S. Kennedy, et Daniel E. Compton. 2007. « Recovery from Virtual Environment Exposure: Expected Time Course of Symptoms and Potential Readaptation Strategies ». *Human Factors* 49 (3): 491-506. <https://doi.org/10.1518/001872007X200120>.
- Chan, Li-Wei, Hui-Shan Kao, Mike Y. Chen, Ming-Sui Lee, Jane Hsu, et Yi-Ping Hung. 2010. « Touching the void: direct-touch interaction for intangible displays ». In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2625–2634. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/1753326.1753725>.
- Cheung, B. S., I. P. Howard, J. M. Nedzelski, et J. P. Landolt. 1989. « Circularvection about Earth-Horizontal Axes in Bilateral Labyrinthine-Defective Subjects ». *Acta Oto-Laryngologica* 108 (5-6): 336-44. <https://doi.org/10.3109/00016488909125537>.
- Choi, Youjin, Jeongmi Lee, et Sung-Hee Lee. 2020. « Effects of Locomotion Style and Body Visibility of a Telepresence Avatar ». In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 1-9. Atlanta, GA, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.00017>.
- Ciner, E. B., E. Schanel-Klitsch, et C. Herzberg. 1996. « Stereoacuity Development: 6 Months to 5 Years. A New Tool for Testing and Screening ». *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry* 73 (1): 43-48. <https://doi.org/10.1097/00006324-199601000-00007>.
- Ciuffreda, K. J., et S. C. Hokoda. 1983. « Spatial Frequency Dependence of Accommodative Responses in Amblyopic Eyes ». *Vision Research* 23 (12): 1585-94. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(83\)90172-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(83)90172-4).
- Ciuffreda, Kenneth J., Neera Kapoor, Daniella Rutner, Irwin B. Suchoff, M. E. Han, et Shoshana Craig. 2007. « Occurrence of Oculomotor Dysfunctions in Acquired Brain Injury: A Retrospective Analysis ». *Optometry (St. Louis, Mo.)* 78 (4): 155-61. <https://doi.org/10.1016/j.optm.2006.11.011>.

- Ciuffreda, Kenneth J., Daniella Rutner, Neera Kapoor, Irwin B. Suchoff, Shoshana Craig, et M. E. Han. 2008. « Vision Therapy for Oculomotor Dysfunctions in Acquired Brain Injury: A Retrospective Analysis ». *Optometry (St. Louis, Mo.)* 79 (1): 18-22. <https://doi.org/10.1016/j.optm.2007.10.004>.
- Clemes, Stacy A., et Peter A. Howarth. 2005. « The menstrual cycle and susceptibility to virtual simulation sickness ». *Journal of Biological Rhythms* 20 (1): 71-82. <https://doi.org/10.1177/0748730404272567>.
- Collins, WE, et JM Lentz. 1977. « Some psychological correlates of motion sickness susceptibility ». *Aviat Space Environ Med* 48 (7): 587-94.
- Conradi, Jessica, et Thomas Alexander. 2012. « On the effect of free vs. Restricted interaction during the exploration of virtual environments ». *Work* 41 (SUPPL.1): 2201-7. <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0442-2201>.
- Corriveau Lecavalier, Nick, Émilie Ouellet, Benjamin Boller, et Sylvie Belleville. 2018. « Use of immersive virtual reality to assess episodic memory: A validation study in older adults ». *Neuropsychological Rehabilitation*, 1-19. <https://doi.org/10.1080/09602011.2018.1477684>.
- Courten, C. de, et L. J. Garey. 1983. « [Morphological development of the primary visual pathway in the child] ». *Journal Francais D'ophtalmologie* 6 (2): 187-202.
- Coussieu, Wilfried. 2014. « L'expérience d'Autrui dans les jeux vidéo : du design à la médiation numérique de l'intersubjectivité ? » *Psychologie Clinique* N° 37 (1): 67-81.
- Cristofari et Guitton. s. d. « Surviving at Any Cost: Guilt Expression Following Extreme Ethical Conflicts in a Virtual Setting ». Consulté le 17 février 2021. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0101711>.
- CSA Conseil Supérieur de l'Audiovisuel. 2016. « Etat des lieux du marché de la réalité virtuelle », 2016.
- Curtis, P., et D.A. Nichols. 1994. « MUDs grow up: social virtual reality in the real world ». In *Proceedings of COMPCON '94*, 193-200. San Francisco, CA, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/CMPCON.1994.282924>.
- Cutting, James, et Peter Vishton. 1995. « Perceiving layout and knowing distances: The interaction, relative potency, and contextual use of different information about depth ». In *Percept. Space Mot*, 5:69-177.
- D'Amour, Sarah, Jelte E. Bos, et Behrang Keshavarz. 2017. « The efficacy of airflow and seat vibration on reducing visually induced motion sickness ». *Experimental Brain Research* 235 (9): 2811-20. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5009-1>.
- Dartt, Darlene A. 2009. « Neural Regulation of Lacrimal Gland Secretory Processes: Relevance in Dry Eye Diseases ». *Progress in Retinal and Eye Research* 28 (3): 155-77. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2009.04.003>.
- Day, Brian, Elham Ebrahimi, Leah S. Hartman, Christopher C. Pagano, Andrew C. Robb, et Sabarish V. Babu. 2019. « Examining the effects of altered avatars on perception-action in virtual reality ». *Journal of Experimental Psychology: Applied* 25 (1): 1-24. <https://doi.org/10.1037/xap0000192>.
- De Leo, Gianluca, Leigh A. Diggs, Elena Radici, et Thomas W. Mastaglio. 2014. « Measuring sense of presence and user characteristics to predict effective training in an online simulated virtual environment ». *Simulation in Healthcare* 9 (1): 1-6. <https://doi.org/10.1097/SIH.0b013e3182a99dd9>.
- Dennison, M. S., A. Z. Wisti, et M. D'Zmura. 2016. « Use of physiological signals to predict cybersickness ». *Displays* 44 (septembre): 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2016.07.002>.
- Dennison, Mark S., A. Zachary Wisti, et Michael D'Zmura. 2016. « Use of physiological signals to predict cybersickness ». *Displays* 44: 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2016.07.002>.
- Dewez, Diane, Rebecca Fribourg, Ferran Argelaguet, Ludovic Hoyet, Daniel Mestre, Mel Slater, et Anatole Lecuyer. 2019. « Influence of Personality Traits and Body Awareness on the Sense of

- Embodiment in Virtual Reality ». In *2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 123-34. Beijing, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2019.00-12>.
- Dicke, Christina, Viljakaisa Aaltonen, et Mark Billingham. 2009. « Occurrence of simulator sickness in spatial sound spaces and 3d auditory displays ». *Proceedings of the 15th International Conference on Auditory Display (ICAD2009)*, 1-8.
- Diels, Cyriel, et Peter A. Howarth. 2013. « Frequency characteristics of visually induced motion sickness ». *Human Factors* 55 (3): 595-604. <https://doi.org/10.1177/0018720812469046>.
- Dieterich, M., et T. Brandt. 2000. « Brain Activation Studies on Visual-Vestibular and Ocular Motor Interaction ». *Current Opinion in Neurology* 13 (1): 13-18. <https://doi.org/10.1097/00019052-200002000-00004>.
- Dillenbourg, Pierre, P. Jermann, D. Schneider, D. Traum, et C. Bui. 1997. « The design of MOO agents: Implications from a study on multi-modal collaborative problem solving ». In *Proceedings of the 8th World Conference on Artificial Intelligence in Education (AI-ED 97)*, 15-22.
- Dodge, R. 1923. « Thresholds of Rotation ». *Journal of Experimental Psychology* 6 (2). <https://doi.org/10.1037/h0076105>.
- Dogston. 2004. « Variation and extrema of human interpupillary distance ». *Proc. SPIE 5291, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI, (21 May 2004)*, 2004.
- Dong, Xiao, Ken Yoshida, et Thomas A. Stoffregen. 2011. « Control of a Virtual Vehicle Influences Postural Activity and Motion Sickness ». *Journal of Experimental Psychology: Applied* 17 (2): 128-38. <https://doi.org/10.1037/a0024097>.
- Draper, Mark H., Erik S. Viirre, Thomas A. Furness, et Valerie J. Gawron. 2001. « Effects of image scale and system time delay on simulator sickness within hea ... ». *Human Factors* 43 (1): 129-46.
- Ducheneaut, Nicolas, et Robert J. Moore. 2004. « Gaining more than experience points: Learning social behavior in multiplayer computer games ». In *Conference proceedings on human factors in computing systems (CHI2004): Extended Abstracts*.
- Ducheneaut, Nicolas, Nicholas Yee, Eric Nickell, et Robert J. Moore. 2006. « "Alone Together?": Exploring the Social Dynamics of Massively Multiplayer Online Games ». In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '06*, 407. Montréal, Québec, Canada: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1124772.1124834>.
- Engelhardt, Christopher R., Bruce D. Bartholow, Geoffrey T. Kerr, et Brad J. Bushman. 2011a. « This Is Your Brain on Violent Video Games: Neural Desensitization to Violence Predicts Increased Aggression Following Violent Video Game Exposure ». *Journal of Experimental Social Psychology* 47 (5): 1033-36. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2011.03.027>.
- . 2011b. « This Is Your Brain on Violent Video Games: Neural Desensitization to Violence Predicts Increased Aggression Following Violent Video Game Exposure ». *Journal of Experimental Social Psychology* 47 (5): 1033-36. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2011.03.027>.
- Farrar, Kirstie M., Marina Krcmar, et Rory P. McGloin. 2013. « The Perception of Human Appearance in Video Games: Toward an Understanding of the Effects of Player Perceptions of Game Features ». *Mass Communication and Society* 16 (3): 299-324. <https://doi.org/10.1080/15205436.2012.714440>.
- Fischer, Matthias. 2018. « The future of health debates? A design thinking sketch of the VR Health Arena ». *Health and Technology* 8 (mars): 281-290. <https://doi.org/10.1007/s12553-018-0220-z>.
- Flanagan, Moira B., James G. May, et Thomas G. Dobie. 2005. « Sex Differences in Tolerance to Visually-Induced Motion Sickness ». *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 76 (7): 642-46.
- Fox, Jesse, Sun Joo (Grace) Ahn, Joris H. Janssen, Leo Yeykelis, Kathryn Y. Segovia, et Jeremy N. Bailenson. 2015. « Avatars Versus Agents: A Meta-Analysis Quantifying the Effect of Agency on Social Influence ». *Human-Computer Interaction* 30 (5): 401-32. <https://doi.org/10.1080/07370024.2014.921494>.

- Fox, Jesse, Jeremy N. Bailenson, et Liz Tricase. 2013. « The Embodiment of Sexualized Virtual Selves: The Proteus Effect and Experiences of Self-Objectification via Avatars ». *Computers in Human Behavior* 29 (3): 930-38. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.12.027>.
- Freeman, D., K. Pugh, C. Green, L. Valmaggia, G. Dunn, et P. Garety. 2007. « A measure of state persecutory ideation for experimental studies ». *Journal of Nervous and Mental Disease* 195 (9): 781-84. <https://doi.org/10.1097/NMD.0b013e318145a0a9>.
- Freitag, Sebastian, Benjamin Weyers, et Torsten W. Kuhlen. 2016. « Examining Rotation Gain in CAVE-like Virtual Environments ». *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 22 (4): 1462-71. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2016.2518298>.
- Fuchs, Arnaldi, Guitton, Moreau. 2006. « Le traité de la réalité virtuelle Volume 4 - Les applications de la réalité virtuelle - Presses des Mines ». 2006. <https://www.pressesdesmines.com/produit/le-traite-de-la-realite-virtuelle-volume-4-les-applications-de-la-realite-virtuelle/>.
- Gaggioli, A., F. Mantovani, G. Castelnuovo, B. Wiederhold, et G. Riva. 2003. « Avatars in Clinical Psychology: A Framework for the Clinical Use of Virtual Humans ». *CyberPsychology & Behavior* 6 (2): 117-25. <https://doi.org/10.1089/109493103321640301>.
- Gallagher, M., R. Dowsett, et E. R. Ferre. 2019. « Vection in virtual reality modulates vestibular-evoked myogenic potentials ». *Eur J Neurosci* 50 (10): 3557-65. <https://doi.org/10.1111/ejn.14499>.
- « Gamer Crashes Car into Tree While Playing Pokémon Go ». 2016. The Independent. 14 juillet 2016. <https://www.independent.co.uk/life-style/gadgets-and-tech/gaming/pokemon-go-car-crash-new-york-a7137261.html>.
- Garau, Maia, Mel Slater, Vinoba Vinayagamoorthy, Andrea Brogni, Anthony Steed, et M. Angela Sasse. 2003. « The Impact of Avatar Realism and Eye Gaze Control on Perceived Quality of Communication in a Shared Immersive Virtual Environment ». In *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '03*, 529. Ft. Lauderdale, Florida, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/642611.642703>.
- Gavani, A. M., D. M. Hodgson, et E. Nalivaiko. 2017. « Effects of visual flow direction on signs and symptoms of cybersickness ». *PLoS One* 12 (8): e0182790. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182790>.
- Gavani, A. M., K. V. Nesbitt, K. L. Blackmore, et E. Nalivaiko. 2016. « Profiling subjective symptoms and autonomic changes associated with cybersickness ». *Auton Neurosci* 203 (mars): 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.12.004>.
- Gavani, A. M., F. R. Walker, D. M. Hodgson, et E. Nalivaiko. 2018. « A comparative study of cybersickness during exposure to virtual reality and "classic" motion sickness: are they different? » *Journal of Applied Physiology* 125 (6): 1670-80. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00338.2018>.
- Gavani, Alireza Mazloumi, Keith V. Nesbitt, Karen L. Blackmore, et Eugene Nalivaiko. 2017a. « Profiling subjective symptoms and autonomic changes associated with cybersickness ». *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical* 203: 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.12.004>.
- . 2017b. « Profiling Subjective Symptoms and Autonomic Changes Associated with Cybersickness ». *Autonomic Neuroscience: Basic & Clinical* 203 (mars): 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.12.004>.
- Gavani, Alireza Mazloumi, Frederick R. Walker, Deborah M. Hodgson, et Eugene Nalivaiko. 2018. « A comparative study of cybersickness during exposure to virtual reality and "classic" motion sickness: Are they different? » *Journal of Applied Physiology* 125 (6): 1670-80. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00338.2018>.
- Gerbner. 1995. « Pouvoir et danger de la violence télévisée, Les cahiers de la sécurité intérieure ». *IHESI La Documentation française*, 20(2), 45-46., 1995.
- « Get ready for the 'fourth platform' | expertIP ». s.d. Consulté le 19 février 2021. <https://blog.allstream.com/get-ready-for-the-fourth-platform/>.

- Geyer, Daniel J., et Adam T. Biggs. 2018. « The persistent issue of simulator sickness in naval aviation training ». *Aerospace Medicine and Human Performance* 89 (4): 396-405. <https://doi.org/10.3357/AMHP.4906.2018>.
- Gianaros, Peter J, Eric R Muth, J Toby Mordkoff, Max E Levine, Robert M Stern, et D Ph. 2001. « A Questionnaire for the Assessment of the Multiple Dimensions of Motion Sickness ». *Aviat Space Environ Med* 72 (2): 115-19.
- Golding, J. F. 1998. « Motion Sickness Susceptibility Questionnaire Revised and Its Relationship to Other Forms of Sickness ». *Brain Research Bulletin* 47 (5): 507-16. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00091-4).
- Golding, JF, P Kadzere, et MA Gresty. 2005. « Motion sickness susceptibility fluctuates through the menstrual cycle. » *Aviat Space Environ Med* 76: 970-73.
- Golding, John F. 1998. « Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness ». *Brain Research Bulletin* 47 (5): 507-16. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00091-4).
- Golding, John F., et Michael A. Gresty. 2013. *Motion Sickness and Disorientation in Vehicles*. Oxford Textbook of Vertigo and Imbalance. Oxford University Press. <https://oxfordmedicine.com/view/10.1093/med/9780199608997.001.0001/med-9780199608997-chapter-28>.
- Gordon, G. E., et D. L. McCulloch. 1999. « A VEP Investigation of Parallel Visual Pathway Development in Primary School Age Children ». *Documenta Ophthalmologica. Advances in Ophthalmology* 99 (1): 1-10. <https://doi.org/10.1023/a:1002171011644>.
- Goulème, Nathalie, Michel Debue, Karen Spruyt, Catherine Vanderveken, Romolo Daniele De Siati, José Ortega-Solis, Jennifer Petrossi, et al. 2018. « Changes of Spatial and Temporal Characteristics of Dynamic Postural Control in Children with Typical Neurodevelopment with Age: Results of a Multicenter Pediatric Study ». *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* 113 (octobre): 272-80. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2018.08.005>.
- Graybiel, A. 1970. « Susceptibility to acute motion sickness in blind persons ». *Aerosp Med* 41 (6): 650-53.
- Grier, Rebecca A. 2015. « How High Is High? A Meta-Analysis of NASA-TLX Global Workload Scores ». *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 59 (1): 1727-31. <https://doi.org/10.1177/1541931215591373>.
- Griffin, MJ. 1990. *Handbook of Human Vibration*. London: Academic Press.
- Griffin, MJ, et MM Newman. 2004. « An experimental study of low-frequency motion in cars ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 218 (11): 1231-38. <https://doi.org/10.1243/0954407042580093>.
- Grunfeld, Elizabeth, et Michael A. Gresty. 1998. « Relationship between motion sickness, migraine and menstruation in crew members of a "round the world" yacht race ». *Brain Research Bulletin* 47 (5): 433-36. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00099-9](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00099-9).
- Guegan, Jérôme, Stéphanie Buisine, Fabrice Mantelet, Nicolas Maranzana, et Frédéric Segonds. 2016. « Avatar-mediated creativity: When embodying inventors makes engineers more creative ». *Computers in Human Behavior* 61: 165-75. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.03.024>.
- Hadley, Kevin, Richard R. Orlandi, et Karen J. Fong. 2004. « Basic Anatomy and Physiology of Olfaction and Taste ». *Otolaryngologic Clinics of North America* 37 (6): 1115-26. <https://doi.org/10.1016/j.otc.2004.06.009>.
- Hagelsteen, Kristine, Richard Johansson, Mikael Ekelund, Anders Bergenfelz, et Magnus Anderberg. 2019. « Performance and perception of haptic feedback in a laparoscopic 3D virtual reality simulator ». *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies* 28 (5): 309-16. <https://doi.org/10.1080/13645706.2018.1539012>.

- Harm, Deborah, Laura Taylor, Millard Reschke, Jeffrey Somers, et Jacob Bloomberg. 2008. « Sensorimotor coordination aftereffects of exposure to a virtual environment ». *The Visual Computer* 24 (novembre): 995-99. <https://doi.org/10.1007/s00371-008-0277-1>.
- Hart. s. d. « Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later - Sandra G. Hart, 2006 ». Consulté le 27 janvier 2021. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/154193120605000909>.
- Hart, Sandra G., et Lowell E. Staveland. 1988. « Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research ». In *Advances in Psychology*, édité par Peter A. Hancock et Najmedin Meshkati, 52:139-83. Human Mental Workload. North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9).
- Hasan, Youssef, Laurent Bègue, Michael Scharkow, et Brad J. Bushman. 2013a. « The More You Play, the More Aggressive You Become: A Long-Term Experimental Study of Cumulative Violent Video Game Effects on Hostile Expectations and Aggressive Behavior ». *Journal of Experimental Social Psychology* 49 (2): 224-27. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2012.10.016>.
- . 2013b. « The More You Play, the More Aggressive You Become: A Long-Term Experimental Study of Cumulative Violent Video Game Effects on Hostile Expectations and Aggressive Behavior ». *Journal of Experimental Social Psychology* 49 (2): 224-27. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2012.10.016>.
- Hassenzahl. 2004. « The interplay of beauty, goodness, and usability in interactive products | Human-Computer Interaction ». *Human-Computer Interaction*, 19(4), 319–349., 2004. [https://dl.acm.org/doi/10.1207/s15327051hci1904\\_2](https://dl.acm.org/doi/10.1207/s15327051hci1904_2).
- « Hayward, V., MacLean, K. E. (2007). "Do It Yourself Haptics, Part I." IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 14, no. 4, pages 88-104, December 2007. | SPIN: Sensory Perception & Interaction, Research Group at UBC ». s. d. Consulté le 22 février 2021. <https://www.cs.ubc.ca/labs/spin/node/278>.
- Henriques, Isadora Ferreira, Dhelfeson Willy Douglas de Oliveira, Fernanda Oliveira-Ferreira, et Peterson M. O. Andrade. 2014. « Motion Sickness Prevalence in School Children ». *European Journal of Pediatrics* 173 (11): 1473-82. <https://doi.org/10.1007/s00431-014-2351-1>.
- Hesse, Klaus, Philipp A. Schroeder, Jonathan Scheeff, Stefan Klingberg, et Christian Plewnia. 2017. « Experimental variation of social stress in virtual reality – Feasibility and first results in patients with psychotic disorders ». *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, Cognition and delusions: What do we know, what do we guess, what do we perhaps falsely believe?, 56 (septembre): 129-36. <https://doi.org/10.1016/j.jbtep.2016.11.006>.
- Hoffman. 2008. « Empathie et développement moral, les émotions morales et la justice ». *Grenoble, PUG*, 2008.
- Howard et Rogers. 2008. « Depth perception », 2008.
- Hoyet, Ludovic, Ferran Argelaguet, Corentin Nicole, et Anatole Lécuyer. 2016. « "Wow! I Have Six Fingers!": Would You Accept Structural Changes of Your Hand in VR? ». *Frontiers in Robotics and AI* 3 (mai). <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00027>.
- Huang, Hsin-Yu, Chih-Wei Ning, Po-Yao Wang, Jen-Hao Cheng, et Lung-Pan Cheng. 2020. « Haptic-go-round: A Surrounding Platform for Encounter-type Haptics in Virtual Reality Experiences ». In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–10. CHI '20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376476>.
- Huang, Ying-Yin, et Marino Menozzi. 2014a. « Effects of Discomfort Glare on Performance in Attending Peripheral Visual Information in Displays ». *Displays* 35 (5): 240-46. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2014.08.001>.
- . 2014b. « Effects of Discomfort Glare on Performance in Attending Peripheral Visual Information in Displays ». *Displays* 35 (5): 240-46. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2014.08.001>.
- « HuffPost - Breaking News, U.S. and World News | HuffPost ». s. d. Consulté le 19 février 2021. <https://www.huffpost.com/>.

- Hussain. 2018. « Augmented reality games (ARG): Ethical and legal issue playing pokémon go in Malaysia ». 2018. [https://www.researchgate.net/publication/328294436\\_Augmented\\_reality\\_games\\_ARG\\_Ethical\\_and\\_legal\\_issue\\_playing\\_pokemon\\_go\\_in\\_Malaysia](https://www.researchgate.net/publication/328294436_Augmented_reality_games_ARG_Ethical_and_legal_issue_playing_pokemon_go_in_Malaysia).
- « Insight into vergence/accommodation mismatch ». s. d. Consulté le 17 février 2021. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/8735/873509/Insight-into-vergence-accommodation-mismatch/10.1117/12.2019866.short>.
- Insko, Brent Edward. 2001. « Passive haptics significantly enhances virtual environments ». Phd, The University of North Carolina at Chapel Hill.
- Ionescu. 2020. « Static Balance: Computerized Dynamic Posturography. » *Manual of pediatric balance disorders, 2nd edition, 2020*.
- Iserson, Kenneth V. 2018. « Ethics of Virtual Reality in Medical Education and Licensure ». *Cambridge Quarterly of Healthcare Ethics* 27 (2): 326-32. <https://doi.org/10.1017/S0963180117000652>.
- Iskander, Julie, Mohammed Hossny, et Saeid Nahavandi. 2019. « Using Biomechanics to Investigate the Effect of VR on Eye Vergence System ». *Applied Ergonomics* 81 (novembre): 102883. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102883>.
- Johnson, WH, FA Sunahara, et JP Landolt. 1999. « Importance of the vestibular system in visually induced nausea and self-vection ». *J Vestib Res* 9: 83-87.
- Jones, Lynette A. 2000. « Kinesthetic sensing ». In *in Human and Machine Haptics*. MIT Press.
- Kadri, Abdelmajid, Anatole Lecuyer, Jean-marie Burkhardt, et Simon Richir. 2007a. « The Visual Appearance of User's Avatar Can Influence the Manipulation of Both Real Devices and Virtual Objects ». In *2007 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, 4142838. Charlotte, NC, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2007.340767>.
- . 2007b. « The Visual Appearance of User's Avatar Can Influence the Manipulation of Both Real Devices and Virtual Objects ». In *2007 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, 4142838. Charlotte, NC, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2007.340767>.
- Keidar-Vromen-Goldstand. 2017. « Enhanced Legality With Augmented and Virtual Reality ». *Law Technology Today*. 2 février 2017. <https://www.lawtechnologytoday.org/2017/02/augmented-and-virtual-reality/>.
- Kelaiah, Iwan, Manolya Kavakli, et Ken Cheng. 2014. « Associations between Simulator Sickness and Visual Complexity of a Virtual Scene ». *Frontiers in Psychological and Behavioral Science (FPBS)* 3 (2): 27-35.
- Kellogg, RS, RS Kennedy, et A Graybiel. 1965. « Motion sickness symptomatology of labyrinthine defective and normal subjects during zero gravity maneuvers ». *Aerospace Medicine and Human Performance* 36: 315-18.
- Kennedy, Robert S., Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, et Michael G. Lillenthal. 1993. « Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness ». *The international Journal of Aviation Psychology* 3 (3): 203-20.
- Kennedy, Robert S., et Kay M. Stanney. 1996. « Postural Instability Induced by Virtual Reality Exposure: Development of a Certification Protocol ». *International Journal of Human-Computer Interaction/Computer Interaction* 8 (1): 25-47. <https://doi.org/10.1080/10447319609526139>.
- Kennedy, RS, JE Fowlkes, KS Berbaum, et MG Lillenthal. 1992. « Use of a motion sickness history questionnaire for prediction of simulator sickness ». *Aviat Space Environ Med* 63 (7): 588-93.
- Keshavarz, Behrang, et Heiko Hecht. 2011a. « Axis rotation and visually induced motion sickness: The role of combined roll, pitch, and yaw motion ». *Aviation Space and Environmental Medicine* 82 (11): 1023-29. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3078.2011>.
- . 2011b. « Validating an efficient method to quantify motion sickness ». *Human Factors* 53 (4): 415-26. <https://doi.org/10.1177/0018720811403736>.

- . 2012a. « Stereoscopic viewing enhances visually induced motion sickness but sound does not ». *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 21 (2): 213-28. [https://doi.org/10.1162/PRES\\_a\\_00102](https://doi.org/10.1162/PRES_a_00102).
- . 2012b. « Visually induced motion sickness and presence in videogames: The role of sound ». *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 1763-67. <https://doi.org/10.1177/1071181312561354>.
- . 2014. « Pleasant music as a countermeasure against visually induced motion sickness ». *Applied Ergonomics* 45 (3): 521-27. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.07.009>.
- Keshavarz, Behrang, Heiko Hecht, et Lisa Zschuschke. 2011. « Intra-visual conflict in visually induced motion sickness ». *Displays* 32 (4): 181-88. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2011.05.009>.
- Keshavarz, Behrang, Lawrence J. Hettinger, Robert S. Kennedy, et Jennifer L. Campos. 2014. « Demonstrating the potential for dynamic auditory stimulation to contribute to motion sickness ». *PLoS ONE* 9 (7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101016>.
- Keshavarz, Behrang, Alison C. Novak, Lawrence J. Hettinger, Thomas A. Stoffregen, et Jennifer L. Campos. 2017. « Passive restraint reduces visually induced motion sickness in older adults ». *Journal of Experimental Psychology: Applied* 23 (1): 85-99. <https://doi.org/10.1037/xap0000107>.
- Keshavarz, Behrang, Daniela Stelzmann, Aurore Paillard, et Heiko Hecht. 2015. « Visually induced motion sickness can be alleviated by pleasant odors ». *Experimental Brain Research* 233 (5): 1353-64. <https://doi.org/10.1007/s00221-015-4209-9>.
- Kilteni, Konstantina, Ilias Bergstrom, et Mel Slater. 2013. « Drumming in Immersive Virtual Reality: The Body Shapes the Way We Play ». *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 19 (4): 597-605. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2013.29>.
- Kilteni, Konstantina, Raphaela Groten, et Mel Slater. 2012. « The Sense of Embodiment in Virtual Reality ». *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 21 (4): 373-87. [https://doi.org/10.1162/PRES\\_a\\_00124](https://doi.org/10.1162/PRES_a_00124).
- Kilteni, Konstantina, Jean-Marie Normand, Maria V. Sanchez-Vives, et Mel Slater. 2012. « Extending Body Space in Immersive Virtual Reality: A Very Long Arm Illusion ». Édité par Manos Tsakiris. *PLoS ONE* 7 (7): e40867. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040867>.
- Kim, Aram, Nora Darakjian, et James M. Finley. 2017. « Walking in fully immersive virtual environments: an evaluation of potential adverse effects in older adults and individuals with Parkinson's disease ». *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 14 (1): 1-12. <https://doi.org/10.1186/s12984-017-0225-2>.
- Kim, Hyun K., Jaehyun Park, Yeongcheol Choi, et Mungyeong Choe. 2018. « Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment ». *Applied Ergonomics* 69 (December 2017): 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.12.016>.
- Kim, JooHwan, David Kane, et Martin S. Banks. 2014. « The Rate of Change of Vergence-Accommodation Conflict Affects Visual Discomfort ». *Vision Research* 105 (décembre): 159-65. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2014.10.021>.
- Kim, Kwanguk, M. Zachary Rosenthal, David J. Zielinski, et Rachael Brady. 2014. « Effects of virtual environment platforms on emotional responses ». *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 113 (3): 882-93. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.12.024>.
- Kim, Y. Y., H. J. Kim, E. N. Kim, H. D. Ko, et H. T. Kim. 2005. « Characteristic changes in the physiological components of cybersickness ». *Psychophysiology* 42 (5): 616-25. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2005.00349.x>.
- Klein, Nicolas, et Céline Borelle. 2019. « Réalité virtuelle et santé mentale ». *Revue d'anthropologie des connaissances* Vol. 13, N°2 (2): 613-39.
- Klemm, Christian, et Wolter Pieters. 2017. « Game Mechanics and Technological Mediation: An Ethical Perspective on the Effects of MMORPG's ». *Ethics and Information Technology* 19 (2): 81-93. <https://doi.org/10.1007/s10676-017-9416-6>.

- Klosterhalfen, Sibylle, Sandra Kellermann, Fang Pan, Ursula Stockhorst, Geoffrey Hall, et Paul Enck. 2005. « Effects of ethnicity and gender on motion sickness susceptibility ». *Aviation Space and Environmental Medicine* 76 (11): 1051-57.
- Kuling, Irene A., Eli Brenner, et Jeroen B. J. Smeets. 2016. « Proprioceptive Localization of the Hand Changes When Skin Stretch around the Elbow Is Manipulated ». *Frontiers in Psychology* 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01620>.
- Larson, P., A. A. Rizzo, J. G. Buckwalter, A. Van Rooyen, K. Kratz, U. Neumann, C. Kesselman, M. Thiebaut, et C. Van Der Zaag. 1999. « Gender issues in the use of virtual environments ». *Cyberpsychology and Behavior* 2 (2): 113-23. <https://doi.org/10.1089/cpb.1999.2.113>.
- Latoschik, Marc Erich, Florian Kern, Jan-Philipp Stauffert, Andrea Bartl, Mario Botsch, et Jean-Luc Lugin. 2019. « Not Alone Here?! Scalability and User Experience of Embodied Ambient Crowds in Distributed Social Virtual Reality ». *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 25 (5): 2134-44. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2019.2899250>.
- Latoschik, Marc Erich, Daniel Roth, Dominik Gall, Jascha Achenbach, Thomas Waltemate, et Mario Botsch. 2017. « The Effect of Avatar Realism in Immersive Social Virtual Realities ». In *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 1-10. Gothenburg Sweden: ACM. <https://doi.org/10.1145/3139131.3139156>.
- Leigh, R. John, et David S. Zee. 2015. *The Neurology of Eye Movements*. The Neurology of Eye Movements. Oxford University Press. <https://oxfordmedicine.com/view/10.1093/med/9780199969289.001.0001/med-9780199969289>.
- Lemley et Volokh. 2018. « Law, Virtual Reality, and Augmented Reality ». *University of Pennsylvania Law Review*, 2018. <https://www.pennlawreview.com/2020/04/28/law-virtual-reality-and-augmented-reality/>.
- Ling, Yun, Willem Paul Brinkman, Harold T. Nefs, Chao Qu, et Ingrid Heynderickx. 2012. « Effects of stereoscopic viewing on presence, anxiety, and cybersickness in a virtual reality environment for public speaking ». *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 21 (3): 254-67. [https://doi.org/10.1162/PRES\\_a\\_00111](https://doi.org/10.1162/PRES_a_00111).
- Ling, Yun, Harold T. Nefs, Willem Paul Brinkman, Chao Qu, et Ingrid Heynderickx. 2013. « The relationship between individual characteristics and experienced presence ». *Computers in Human Behavior* 29 (4): 1519-30. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.12.010>.
- Liu, Cheng Li. 2014. « A study of detecting and combating cybersickness with fuzzy control for the elderly within 3D virtual stores ». *International Journal of Human Computer Studies* 72 (12): 796-804. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2014.07.002>.
- Liu, Cheng Li, et Shiao Tsyr Uang. 2016. « Effects of depth perception cues and display types on presence and cybersickness in the elderly within a 3D virtual store ». *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 7 (6): 763-75. <https://doi.org/10.1007/s12652-015-0317-4>.
- Lobel, Adam, Rutger C. M. E. Engels, Lianne L. Stone, William J. Burk, et Isabela Granic. 2017. « Video Gaming and Children's Psychosocial Wellbeing: A Longitudinal Study ». *Journal of Youth and Adolescence* 46 (4): 884-97. <https://doi.org/10.1007/s10964-017-0646-z>.
- Magnor, Marcus, et Alexander Sorkine-Hornung, éd. 2020. *Real VR – Immersive Digital Reality: How to Import the Real World into Head-Mounted Immersive Displays*. Image Processing, Computer Vision, Pattern Recognition, and Graphics, Lect.Notes ComputerState-of-the-Art Surveys. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41816-8>.
- Magoon, E. H., et R. M. Robb. 1981. « Development of Myelin in Human Optic Nerve and Tract. A Light and Electron Microscopic Study ». *Archives of Ophthalmology (Chicago, Ill.: 1960)* 99 (4): 655-59. <https://doi.org/10.1001/archoph.1981.03930010655011>.
- Matchock, Robert L., Max E. Levine, Peter J. Gianaros, et Robert M. Stern. 2008. « Susceptibility to Nausea and Motion Sickness as a Function of the Menstrual Cycle ». *Women's Health Issues* 18 (4): 328-35. <https://doi.org/10.1016/j.whi.2008.01.006>.

- Matheron, Eric, et Zoï Kapoula. 2008. « Vertical Phoria and Postural Control in Upright Stance in Healthy Young Subjects ». *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology* 119 (10): 2314-20. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.06.016>.
- . 2011. « Vertical Heterophoria and Postural Control in Nonspecific Chronic Low Back Pain ». *PLoS One* 6 (3): e18110. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018110>.
- Matheron, Eric, Thanh-Thuan Lê, Qing Yang, et Zoï Kapoula. 2007. « Effects of a Two-Diopter Vertical Prism on Posture ». *Neuroscience Letters* 423 (3): 236-40. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.07.016>.
- Matheron, Eric, Qing Yang, Thanh-Thuan Lê, et Zoï Kapoula. 2008. « Effects of Ocular Dominance on the Vertical Vergence Induced by a 2-Diopter Vertical Prism during Standing ». *Neuroscience Letters* 444 (2): 176-80. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.08.025>.
- Mayor, Jesus, Laura Raya, et Alberto Sanchez. 2019. « A comparative study of virtual reality methods of interaction and locomotion based on presence, cybersickness and usability ». *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 1-12. <https://doi.org/10.1109/TETC.2019.2915287>.
- Mazloui Gavvani, Alireza, Deborah M. Hodgson, et Eugene Nalivaiko. 2017. « Effects of visual flow direction on signs and symptoms of cybersickness ». *PLoS ONE* 12 (8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182790>.
- Melo, Miguel, José Vasconcelos-Raposo, et Maximino Bessa. 2018. « Presence and cybersickness in immersive content: Effects of content type, exposure time and gender ». *Computers and Graphics (Pergamon)* 71: 159-65. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2017.11.007>.
- Menshikova, Galina Ya, Artem I. Kovalev, Oxana A. Klimova, et Valentina V. Barabanschikova. 2017. « The application of virtual reality technology to testing resistance to motion sickness ». *Psychology in Russia: State of the Art* 10 (3): 151-64. <https://doi.org/10.11621/pir.2017.0310>.
- Milgram, Paul, et Fumio Kishino. 1994. « A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays ». *IEICE Trans. Information Systems* E77-D, n° 12 (décembre): 1321-29.
- Millanvoye, Michel. 2004. 6. *Les ambiances physiques au poste de travail. Ergonomie*. Presses Universitaires de France. <https://www.cairn.info/ergonomie--9782130514046-page-99.htm>.
- Miller, Greg. 2004. « 2004 Nobel Prizes. Axel, Buck Share Award for Deciphering How the Nose Knows ». *Science (New York, N.Y.)* 306 (5694): 207. <https://doi.org/10.1126/science.306.5694.207>.
- Milleville-Pennel, Isabelle, et Camilo Charron. 2015. « Do Mental Workload and Presence Experienced When Driving a Real Car Predispose Drivers to Simulator Sickness? An Exploratory Study ». *Accident; Analysis and Prevention* 74 (janvier): 192-202. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.10.021>.
- Mittelstädt, Justin Maximilian, Jan Wacker, et Dirk Stelling. 2019. « Emotional and Cognitive Modulation of Cybersickness: The Role of Pain Catastrophizing and Body Awareness ». *Human Factors* 61 (2): 322-36. <https://doi.org/10.1177/0018720818804382>.
- Mittelstaedt, Justin, Jan Wacker, et Dirk Stelling. 2018. « Effects of display type and motion control on cybersickness in a virtual bike simulator ». *Displays* 51 (November 2017): 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2018.01.002>.
- Mohamed Elias, Zulekha, Uma Mageswari Batumalai, et Azam Nur Hazman Azmi. 2019. « Virtual Reality Games on Accommodation and Convergence ». *Applied Ergonomics* 81 (novembre): 102879. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102879>.
- Mori, Masahiro, Karl MacDorman, et Norri Kageki. 2012. « The Uncanny Valley [From the Field] ». *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19 (2): 98-100. <https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811>.
- Mulkerin, Tim. s. d. « You officially can't play Pokémon Go at the Hiroshima Memorial or the Holocaust Museum ». *Business Insider*. Consulté le 19 février 2021.

<https://www.businessinsider.com/pokemon-go-pokestops-removed-from-hiroshima-memorial-and-holocaust-museum-2016-8>.

- Munafò, Justin, Meg Diedrick, et Thomas A. Stoffregen. 2017. « The virtual reality head-mounted display Oculus Rift induces motion sickness and is sexist in its effects ». *Experimental Brain Research* 235 (3): 889-901. <https://doi.org/10.1007/s00221-016-4846-7>.
- Mursic, R A, et S Palmisano. 2020. « The Shepard–Risset Glissando: Identifying the Origins of Metaphorical Auditory Vection and Motion Sickness ». *Multisensory Research* 33 (1): 61-86. <https://doi.org/10.1163/22134808-20191450>.
- Nalivaiko, E., S. L. Davis, K. L. Blackmore, A. Vakulin, et K. V. Nesbitt. 2015. « Cybersickness provoked by head-mounted display affects cutaneous vascular tone, heart rate and reaction time ». *Physiol Behav* 151 (novembre): 583-90. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.08.043>.
- Nashner, L., et A. Berthoz. 1978. « Visual Contribution to Rapid Motor Responses during Postural Control ». *Brain Research* 150 (2): 403-7. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(78\)90291-3](https://doi.org/10.1016/0006-8993(78)90291-3).
- Navarro, Peña J, Cebolla A, et Baños R. 2020. « Can Avatar Appearance Influence Physical Activity? User-Avatar Similarity and Proteus Effects on Cardiac Frequency and Step Counts ». *Health Communication*. <https://doi.org/10.1080/10410236.2020.1834194>.
- Neyret, Solène, Xavi Navarro, Alejandro Beacco, Ramon Oliva, Pierre Bourdin, Jose Valenzuela, Itxaso Barberia, et Mel Slater. 2020. « An Embodied Perspective as a Victim of Sexual Harassment in Virtual Reality Reduces Action Conformity in a Later Milgram Obedience Scenario ». *Scientific Reports* 10 (1): 6207. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62932-w>.
- Nichols, Sarah. 1999. « Physical Ergonomics of Virtual Environment Use ». *Applied Ergonomics* 30 (1): 79-90. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(98\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(98)00045-3).
- Nichols, Sarah, Sue Cobb, et John R. Wilson. 1997. « Health and Safety Implications of Virtual Environments: Measurement Issues ». *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6 (6): 667-75. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.667>.
- Noel, Jean-Paul, Majed Samad, Andrew Doxon, Justin Clark, Sean Keller, et Massimiliano Di Luca. 2018. « Peri-Personal Space as a Prior in Coupling Visual and Proprioceptive Signals ». *Scientific Reports* 8 (1): 15819. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33961-3>.
- Norman, Kent L. 2018. « Evaluation of virtual reality games: Simulator sickness and human factors ». *CEUR Workshop Proceedings* 2246.
- Normand, Jean-Marie, Elias Giannopoulos, Bernhard Spanlang, et Mel Slater. 2011. « Multisensory Stimulation Can Induce an Illusion of Larger Belly Size in Immersive Virtual Reality ». Édité par Martin Giurfa. *PLoS ONE* 6 (1): e16128. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016128>.
- O'Brolcháin, Fiachra, Tim Jacquemard, David Monaghan, Noel O'Connor, Peter Novitzky, et Bert Gordijn. 2016. « The Convergence of Virtual Reality and Social Networks: Threats to Privacy and Autonomy ». *Science and Engineering Ethics* 22 (1): 1-29. <https://doi.org/10.1007/s11948-014-9621-1>.
- « Odorat : de l'aéroportage au cortex – Académie nationale de médecine | Une institution dans son temps ». s. d. Consulté le 16 février 2021. <https://www.academie-medecine.fr/odorat-de-laeroportage-au-cortex/>.
- O'Reilly, Robert, Thierry Morlet, et Sharon L Cushing. 2013. *Manual of Pediatric Balance Disorders*. <http://site.ebrary.com/id/10901598>.
- Overtoom, Evelien M, Tim Horeman, Frank-Willem Jansen, Jenny Dankelman, et Henk W R Schreuder. 2019. « Haptic Feedback, Force Feedback, and Force-Sensing in Simulation Training for Laparoscopy: A Systematic Overview ». *Journal of Surgical Education* 76 (1): 242-61. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2018.06.008>.
- Owen, N, AG Leadbetter, et L Yardley. 1998. « Relationship between postural control and motion sickness in healthy subjects. » *Brain Res Bull* 47 (5): 471-74.

- Paillard, A. C., G. Quarck, F. Paolino, P. Denise, M. Paolino, J. F. Golding, et V. Ghulyan-Bedikian. 2013. « Motion Sickness Susceptibility in Healthy Subjects and Vestibular Patients: Effects of Gender, Age and Trait-Anxiety ». *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation* 23 (4-5): 203-9. <https://doi.org/10.3233/VES-130501>.
- Park, SoHu, et GyuChang Lee. 2020. « Full-Immersion Virtual Reality: Adverse Effects Related to Static Balance ». *Neuroscience Letters* 733 (août): 134974. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2020.134974>.
- « Passive real-world interface props for neurosurgical visualization | Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems ». s. d. Consulté le 22 février 2021. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/191666.191821>.
- Patel, Riddhi M., et Jayant M. Pinto. 2014. « Olfaction: Anatomy, Physiology, and Disease ». *Clinical Anatomy (New York, N.Y.)* 27 (1): 54-60. <https://doi.org/10.1002/ca.22338>.
- Peck, Tabitha C., Sofia Seinfeld, Salvatore M. Aglioti, et Mel Slater. 2013. « Putting Yourself in the Skin of a Black Avatar Reduces Implicit Racial Bias ». *Consciousness and Cognition* 22 (3): 779-87. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2013.04.016>.
- Peña et al. 2009. « The Priming Effects of Avatars in Virtual Settings - Jorge Peña, Jeffrey T. Hancock, Nicholas A. Merola, 2009 ». *Communication Research*, 2009. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0093650209346802>.
- Perrier-Melo, Raphael José, Jorge Luiz de Brito-Gomes, Matheus Santos de Sousa Fernandes, Sandro Vinicius Vidal de Negreiros Pereira, et Manoel da Cunha Costa. 2015. « Incidence of Injuries with the Practice of Active Video Games. » *Manual Therapy, Posturology & Rehabilitation Journal*, 1-4.
- Persson, Per. 2003. « Exams: An Animated and Avatar-Based Messaging System for Expressive Peer Communication[4] (Abstract Only) ». *ACM SIGGROUP Bulletin* 24 (1): 5-5. <https://doi.org/10.1145/1027232.1027239>.
- Pigassou-Albouy, R. 2000. « [How and why we see "one" with two eyes?] ». *Journal Francais D'ophtalmologie* 23 (9): 952-61.
- Polman, Hanneke, Bram Orobio de Castro, et Marcel A. G. van Aken. 2008. « Experimental Study of the Differential Effects of Playing versus Watching Violent Video Games on Children's Aggressive Behavior ». *Aggressive Behavior* 34 (3): 256-64. <https://doi.org/10.1002/ab.20245>.
- Polonen, M., T. Jarvenpaa, et J. Hakkinen. 2010. « Comparison of Near-to-Eye Displays: Subjective Experience and Comfort ». *Journal of Display Technology* 6 (1): 27-35. <https://doi.org/10.1109/JDT.2009.2029123>.
- Pot-Kolder, Roos, Wim Veling, Jacqueline Counotte, et Mark Van Der Gaag. 2018. « Anxiety Partially Mediates Cybersickness Symptoms in Immersive Virtual Reality Environments ». *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking* 21 (3): 187-93. <https://doi.org/10.1089/cyber.2017.0082>.
- Pouke, Matti, Katherine J. Mimnaugh, Timo Ojala, et Steven M. LaValle. 2020. « The Plausibility Paradox For Scaled-Down Users In Virtual Environments ». In *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. Atlanta, GA, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.00116>.
- Pourmand, Ali, Kevin Lombardi, Evan Kuhl, et Francis O'Connell. 2017. « Videogame-Related Illness and Injury: A Review of the Literature and Predictions for Pokémon GO! » *Games for Health Journal* 6 (1): 9-18. <https://doi.org/10.1089/g4h.2016.0090>.
- Prajapati, Chirag. 2018. « What Are the Legal Issues That Stare at Augmented/Virtual Reality? » *Entrepreneur*. 22 mars 2018. <https://www.entrepreneur.com/article/310821>.
- Previc, F. H., et T. J. Mullen. 1990. « A Comparison of the Latencies of Visually Induced Postural Change and Self-Motion Perception ». *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation* 1 (3): 317-23.

- Proske, Uwe, et Simon C. Gandevia. 2012. « The Proprioceptive Senses: Their Roles in Signaling Body Shape, Body Position and Movement, and Muscle Force ». *Physiological Reviews* 92 (4): 1651-97. <https://doi.org/10.1152/physrev.00048.2011>.
- Prothero, Jerrold D. 1998. « The Role of Rest Frames in Vection, Presence and Motion Sickness ».
- Ratan, Rabindra, David Beyea, Benjamin J. Li, et Luis Graciano. 2020a. « Avatar Characteristics Induce Users' Behavioral Conformity with Small-to-Medium Effect Sizes: A Meta-Analysis of the Proteus Effect ». *Media Psychology* 23 (5): 651-75. <https://doi.org/10.1080/15213269.2019.1623698>.
- . 2020b. « Avatar characteristics induce users' behavioral conformity with small-to-medium effect sizes: a meta-analysis of the proteus effect ». *Media Psychology* 23 (5): 651-75. <https://doi.org/10.1080/15213269.2019.1623698>.
- Rauschenberger, Robert, et Brandon Barakat. 2020. « Health and Safety of VR Use by Children in an Educational Use Case ». In . <https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.1581276262586>.
- Read, Jenny C.A., et Iwo Bohr. 2014. « User experience while viewing stereoscopic 3D television ». *Ergonomics* 57 (8): 1140-53. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.914581>.
- Reason, J. T. 1968. « Relations between motion sickness susceptibility, the spiral after-effect and loudness estimation. » *British journal of psychology (London, England: 1953)* 59 (4): 385-93. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1968.tb01153.x>.
- Reason, J. T., et J. J. Brand. 1975. *Motion Sickness*. London: AcademicPress.
- Reed, M. R., et W. J. Book. 2004. « Modeling and control of an improved dissipative passive haptic display ». In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, 1:311-318 Vol.1. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1307169>.
- Reinhard, René, Khyati Girish Shah, Corinna A. Faust-Christmann, et Thomas Lachmann. 2020. « Acting your avatar's age: effects of virtual reality avatar embodiment on real life walking speed ». *Media Psychology* 23 (2): 293-315. <https://doi.org/10.1080/15213269.2019.1598435>.
- Riccio, G. E, et T. A. Stoffregen. 1991. « An Ecological Theory of Motion Sickness and Postural Instability ». *Ecological Psychology* 3 (3): 195-240. [https://doi.org/10.1207/s15326969eco0303\\_2](https://doi.org/10.1207/s15326969eco0303_2).
- Riches, Simon, Soha Elghany, Philippa Garety, Mar Rus-Calafell, et Lucia Valmaggia. 2019. « Factors Affecting Sense of Presence in a Virtual Reality Social Environment: A Qualitative Study ». *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking* 22 (4): 288-92. <https://doi.org/10.1089/cyber.2018.0128>.
- Riecke, Bernhard E., et Jacqueline D. Jordan. 2015. « Comparing the effectiveness of different displays in enhancing illusions of self-movement (vection) ». *Frontiers in Psychology* 6 (JUN): 1-16. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00713>.
- Rigaudière, Florence, Jean-François Le Gargasson, et Eliane Delouvrier. 2013. « VII-1 : MATURATION VISUELLE ET ÉLECTROPHYSIOLOGIE PÉDIATRIQUE ». Text. <http://irevues.inist.fr/oeiletphysiologiedelavision>. Rigaudière (Florence). 18 juin 2013. <http://odel.irevues.inist.fr/oeiletphysiologiedelavision/index.php?id=134>.
- Robert, Philippe H., Alexandra König, Hélène Amieva, Sandrine Andrieu, François Bremond, Roger Bullock, Mathieu Ceccaldi, et al. 2014. « Recommendations for the use of Serious Games in people with Alzheimer's Disease, related disorders and frailty ». *Frontiers in Aging Neuroscience* 6 (mars). <https://doi.org/10.3389/fnagi.2014.00054>.
- Rosa, Pedro J., Diogo Morais, Pedro Gamito, Jorge Oliveira, et Tomaz Saraiva. 2016. « The Immersive Virtual Reality Experience: A Typology of Users Revealed Through Multiple Correspondence Analysis Combined with Cluster Analysis Technique ». *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking* 19 (3): 209-16. <https://doi.org/10.1089/cyber.2015.0130>.
- Rose. 2016. « Comment le corps humain ressent-il la température ? » Planet-Vie. 2016. <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/animaux/systeme-nerveux-et-systeme-hormonal/comment-le-corps-humain-ressent-il-la>.

- Rosenberg, Robin S., Shawnee L. Baughman, et Jeremy N. Bailenson. 2013. « Virtual Superheroes: Using Superpowers in Virtual Reality to Encourage Prosocial Behavior ». Édité par Attila Szolnoki. *PLoS ONE* 8 (1): e55003. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055003>.
- Roth, Daniel, Carola Bloch, Josephine Schmitt, Lena Frischlich, Marc Erich Latoschik, et Gary Bente. 2019. « Perceived Authenticity, Empathy, and Pro-Social Intentions Evoked through Avatar-Mediated Self-Disclosures ». In *Proceedings of Mensch Und Computer 2019 on - MuC'19*, 21-30. Hamburg, Germany: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3340764.3340797>.
- Roth, Daniel, Jean-Luc Lugin, Dmitri Galakhov, Arvid Hofmann, Gary Bente, Marc Erich Latoschik, et Arnulph Fuhrmann. 2016. « Avatar realism and social interaction quality in virtual reality ». In *2016 IEEE Virtual Reality (VR)*, 277-78. Greenville, SC, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/VR.2016.7504761>.
- Royakkers, Lambèr, Jelte Timmer, Linda Kool, et Rinie Est. 2018. « Societal and ethical issues of digitization ». *Ethics and Information Technology* 20 (juin). <https://doi.org/10.1007/s10676-018-9452-x>.
- Russell, M. E., B. Hoffman, S. Stromberg, et C. R. Carlson. 2014. « Use of controlled diaphragmatic breathing for the management of motion sickness in a virtual reality environment ». *Appl Psychophysiol Biofeedback* 39 (3-4): 269-77. <https://doi.org/10.1007/s10484-014-9265-6>.
- Salem, Ben, et Nic Earle. 2000. « Designing a Non-Verbal Language for Expressive Avatars ». In *Proceedings of the Third International Conference on Collaborative Virtual Environments - CVE '00*, 93-101. San Francisco, California, United States: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/351006.351019>.
- Schmitz, Patric, Julian Hildebrandt, Andre Calero Valdez, Leif Kobbelt, et Martina Ziefle. 2018. « You spin my head right round: Threshold of limited immersion for rotation gains in redirected walking ». *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 24 (4): 1623-32. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2793671>.
- Schubert, T., F. Friedmann, et H. Regenbrecht. 2001. « The Experience of Presence: Factor Analytic Insights ». *Presence* 10 (3): 266-81. <https://doi.org/10.1162/105474601300343603>.
- Schubert, Thomas, Frank Friedmann, et Holger Regenbrecht. s. d. « Embodied Presence in Virtual Environments ». In *In Ray Paton & Irene Neilson (Eds.), Visual Representations and Interpretations*, 269–278. Springer-Verlag.
- Sean P. Mackinnon, Christian H. Jordan, Anne E. Wilson. 2011. « Birds of a Feather Sit Together: Physical Similarity Predicts Seating Choice ». 2011.
- Seinfeld, Sofia, Tiare Feuchtnner, Antonella Maselli, et Jörg Müller. 2020. « User Representations in Human-Computer Interaction ». *Human-Computer Interaction*, février, 1-39. <https://doi.org/10.1080/07370024.2020.1724790>.
- Serino, Maeve, Kyla Cordrey, Laura McLaughlin, et Ruth L. Milanaik. 2016. « Pokémon Go and Augmented Virtual Reality Games: A Cautionary Commentary for Parents and Pediatricians ». *Current Opinion in Pediatrics* 28 (5): 673-77. <https://doi.org/10.1097/MOP.0000000000000409>.
- Shafer, Daniel M., Corey P. Carbonara, et Michael F. Korpi. 2019. « Factors affecting enjoyment of virtual reality games: A comparison involving consumer-grade virtual reality technology ». *Games for Health Journal* 8 (1): 15-23. <https://doi.org/10.1089/g4h.2017.0190>.
- Sharon, Jeffrey D., et Timothy E. Hullar. 2014. « Motion Sensitivity and Caloric Responsiveness in Vestibular Migraine and Meniere's Disease ». *The Laryngoscope* 124 (4): 969-73. <https://doi.org/10.1002/lary.24285>.
- Sharples, Sarah, Sue Cobb, Amanda Moody, et John R. Wilson. 2008. « Virtual reality induced symptoms and effects (VRISE): Comparison of head mounted display (HMD), desktop and projection display systems ». *Displays* 29 (2): 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2007.09.005>.
- « Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback: Presence: Teleoperators and Virtual Environments: Vol 18, No 1 ». s. d. Consulté le 22 février 2021. <https://dl.acm.org/doi/10.1162/pres.18.1.39>.

- Siyahhan, Sinem, Sasha Barab, et Carrie James. 2011. « Youth and the Ethics of Identity Play in Virtual Spaces ». *Journal of Interactive Learning Research* 22 (1): 111-38.
- Skopp, Nancy A., Derek J. Smolenski, Melinda J. Metzger-Abamukong, Albert A. Rizzo, et Greg M. Reger. 2014. « A Pilot Study of the VirtuSphere as a Virtual Reality Enhancement ». *International Journal of Human-Computer Interaction* 30 (1): 24-31. <https://doi.org/10.1080/10447318.2013.796441>.
- Snodgrass, Jeffrey G., Michael G. Lacy, H. J. Francois Dengah, Jesse Fagan, et David E. Most. 2011. « Magical Flight and Monstrous Stress: Technologies of Absorption and Mental Wellness in Azeroth ». *Culture, Medicine, and Psychiatry* 35 (1): 26-62. <https://doi.org/10.1007/s11013-010-9197-4>.
- Sorrento, Gianluca U., Philippe S. Archambault, et Joyce Fung. 2018. « Adaptation and Post-Adaptation Effects of Haptic Forces on Locomotion in Healthy Young Adults ». *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation* 15 (1): 20. <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0364-0>.
- Spinoza. 1670. « Tractatus Theologico-politicus », 1670.
- St. Pierre, Matthew E., Salil Banerjee, Adam W. Hoover, et Eric R. Muth. 2015. « The effects of 0.2 Hz varying latency with 20-100 ms varying amplitude on simulator sickness in a helmet mounted display ». *Displays* 36: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2014.10.005>.
- Stanney, Kay M., et Robert S. Kennedy. 1997. « The psychometrics of cybersickness » 40 (8): 66-68. <https://doi.org/10.1145/257874.257889>.
- Stanney, Kay M., Robert S. Kennedy, et Julie M. Drexler. 1997. « Cybersickness is not simulator sickness ». *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society* 2: 1138-41.
- Stern, RM, S Hu, SH Uijtdehaage, ER Muth, LH Xu, et KL Koch. 1996. « Asian hypersusceptibility to motion sickness ». *Hum Hered* 46: 7-14.
- Stern, Robert Morris, Kenneth L. Koch, et Paul Andrews. 2011. « Nausea: mechanisms and management. » In . OUP USA.
- Sun, Qi, Anjul Patney, et Frank Steinicke. 2020. « Redirected Walking in VR ». In *Real VR – Immersive Digital Reality: How to Import the Real World into Head-Mounted Immersive Displays*, édité par Marcus Magnor et Alexander Sorkine-Hornung, 285-92. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-41816-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-41816-8_12).
- Swanson et Book. 2003. « Energetically passive haptic displays », 2003, "Path-Following Control for Dissipative Passive Haptic Displays," Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, International Symposium on(HAPTICS), Los Angeles, California, U.S.A., 2003, p. 101.) édition.
- Taha, Zahari, Hartomo Soewardi, et Siti Dawal. 2014. « Axiomatic design principles in analysing the ergonomics design parameter of a virtual environment ». *International Journal of Industrial Ergonomics* 44 (mai): 368-73. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.11.007>.
- « The Proteus Effect: Implications of Transformed Digital Self-Representation on Online and Offline Behavior - Nick Yee, Jeremy N. Bailenson, Nicolas Ducheneaut, 2009 ». s. d. Consulté le 26 avril 2021. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0093650208330254>.
- Tisseron. 2019. « Rapport rédigé à la demande du CNC sur les « Enjeux de protection des mineurs dans l'audiovisuel à l'ère d'Internet ». », 2019.
- Tisseron et Tordo. s. d. « Les diverses formes de l'empathie dans le jeu vidéo en ligne | Cairn.info ». Consulté le 17 février 2021. <https://www.cairn.info/subjectivation-et-empathie-dans-les-mondes--9782100701292-page-83.htm>.
- Tisseron, Serge. 2009. « Le risque de la mort virtuelle, les jeux vidéo ». *Topique* n° 107 (2): 107-17.
- Tractinsky, N., Katz, A.S. and Ikar, D. 2000. « What Is Beautiful Is Usable. Interacting with Computers, Vol. 13, No 2, Pp. 127-145. | HCI & UCD Reader ». 2000.

<https://blogs.aalto.fi/stratusreader/2013/02/18/tractinsky-n-katz-a-s-and-ikar-d-2000-what-is-beautiful-is-usable-interacting-with-computers-vol-13-no-2-pp-127-145/>.

- Treisman, M. 1977. « Motion sickness: an evolutionary hypothesis ». *Science* 4302: 493-95.
- Tsakiris, Manos. 2010. « My Body in the Brain: A Neurocognitive Model of Body-Ownership ». *Neuropsychologia* 48 (3): 703-12. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.09.034>.
- Turnbull, Philip R. K., et John R. Phillips. 2017. « Ocular Effects of Virtual Reality Headset Wear in Young Adults ». *Scientific Reports* 7 (1): 16172. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16320-6>.
- Turnbull, Philip R. K., Joyce Wong, Jasmine Feng, Michael T. M. Wang, et Jennifer P. Craig. 2019. « Effect of Virtual Reality Headset Wear on the Tear Film: A Randomised Crossover Study ». *Contact Lens & Anterior Eye: The Journal of the British Contact Lens Association* 42 (6): 640-45. <https://doi.org/10.1016/j.clae.2019.08.003>.
- « Two Men Walk off Cliff While Playing Pokemon Go ». 2016. The Independent. 14 juillet 2016. <https://www.independent.co.uk/news/world/americas/pokemon-go-men-fall-cliff-san-diego-android-ios-app-a7136986.html>.
- Tychsen, Lawrence, et Paul Foeller. 2019. « Effects of Immersive Virtual Reality Headset Viewing on Young Children: Visuomotor Function, Postural Stability, and Motion Sickness ». *American Journal of Ophthalmology* 209 (août). <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2019.07.020>.
- Valmaggia, Lucia R., Daniel Freeman, Catherine Green, Philippa Garety, David Swapp, Angus Antley, Corinne Prescott, et al. 2007. « Virtual Reality and Paranoid Ideations in People with an 'at-Risk Mental State' for Psychosis ». *The British Journal of Psychiatry* 191 (S51): s63-68. <https://doi.org/10.1192/bjp.191.51.s63>.
- Verhulst, Adrien, Jean-Marie Normand, Cindy Lombart, Maki Sugimoto, et Guillaume Moreau. 2018. « Influence of Being Embodied in an Obese Virtual Body on Shopping Behavior and Product Perception in VR ». *Frontiers in Robotics and AI: Virtual Environments* 5 (113). <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00113>.
- « Vestibular evoked myogenic potentials and habituation to seasickness - PubMed ». s. d. Consulté le 28 janvier 2021. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23800706/>.
- Viaud-Delmon, I., Y. P. Ivanenko, R. Grasso, et I. Israël. 1999. « Non-Specific Directional Adaptation to Asymmetrical Visual-Vestibular Stimulation ». *Brain Research. Cognitive Brain Research* 7 (4): 507-10. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(98\)00052-4](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(98)00052-4).
- Viaud-Delmon, Isabelle. 2007. « Corps, action et cognition : la réalité virtuelle au défi des sciences cognitives ». *Intellectica* 45 (1): 37-58. <https://doi.org/10.3406/intel.2007.1266>.
- Viaud-Delmon, Isabelle, Olivier Warusfel, Angeline Seguelas, Emmanuel Rio, et Roland Jouvent. 2006. « High sensitivity to multisensory conflicts in agoraphobia exhibited by virtual reality. » *European psychiatry: the journal of the Association of European Psychiatrists* 21 (7): 501-8. <https://doi.org/10.1016/j.eurpsy.2004.10.004>.
- Vinayagamoorthy, A. Brogni, M. Gillies, Mel Slater, et Anthony Steed. 2004. « An Investigation of Presence Response across Variations in Visual Realism ». In , 148-55.
- Vital-Durand, F. 1983. « [New data on the visual system. 2: Development and plasticity of the visual pathway] ». *Journal Francais D'ophtalmologie* 6 (3): 319-23.
- Wada, Yoshiro, Suetaka Nishiike, Tadashi Kitahara, Toshiaki Yamanaka, Takao Imai, Taeko Ito, Go Sato, Kazunori Matsuda, Yoshiaki Kitamura, et Noriaki Takeda. 2016. « Effects of Repeated Snowboard Exercise in Virtual Reality with Time Lags of Visual Scene behind Body Rotation on Head Stability and Subjective Slalom Run Performance in Healthy Young Subjects ». *Acta Oto-Laryngologica* 136 (11): 1121-24. <https://doi.org/10.1080/00016489.2016.1193890>.
- Waltemate, Thomas, Dominik Gall, Daniel Roth, Mario Botsch, et Marc Erich Latoschik. 2018. « The Impact of Avatar Personalization and Immersion on Virtual Body Ownership, Presence, and Emotional Response ». *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 24 (4): 1643-52. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2794629>.

- Wang, Isaac, Jesse Smith, et Jaime Ruiz. 2019. « Exploring Virtual Agents for Augmented Reality ». In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '19*, 1-12. Glasgow, Scotland Uk: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300511>.
- Weech, Séamas, Sophie Kenny, et Michael Barnett-Cowan. 2019. « Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related: A review ». *Frontiers in Psychology* 10 (FEB): 1-19. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00158>.
- Weech, Séamas, Jessy Parokaran Varghese, et Michael Barnett-Cowan. 2018. « Estimating the sensorimotor components of cybersickness ». *Journal of Neurophysiology* 120 (5): 2201-17. <https://doi.org/10.1152/jn.00477.2018>.
- Wiener-Vacher, Sylvette R., Sidney I. Wiener, Layla Ajrezo, Rima Obeid, Damir Mohamed, Priscilla Boizeau, Corinne Alberti, et Maria Pia Bucci. 2019. « Dizziness and Convergence Insufficiency in Children: Screening and Management ». *Frontiers in Integrative Neuroscience* 13: 25. <https://doi.org/10.3389/fnint.2019.00025>.
- Winnicott. 1971. « Playing and reality », 1971, London, Tavistock Publications. Manuscript received September 22:1993. édition.
- Wit, G de. 1957. « Acquired Sensitivity to Seasickness after an Influenza Infection ». *Pract Otorhinolaryngol* 19: 579-86. <https://doi.org/10.1159/000274117>.
- Witmer, B. G., et M. J. Singer. 1998a. « Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire ». *Presence* 7 (3): 225-40. <https://doi.org/10.1162/105474698565686>.
- . 1998b. « Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire ». *Presence* 7 (3): 225-40. <https://doi.org/10.1162/105474698565686>.
- Wrzesien, M., M. Alcaiz, C. Botella, J-M Burkhardt, J. Breton-Lopez, M. Ortega, et D. B. Brotons. 2013. « The Therapeutic Lamp: Treating Small-Animal Phobias ». *IEEE Computer Graphics and Applications* 33 (1): 80-86. <https://doi.org/10.1109/MCG.2013.12>.
- Yamaguchi, Kotaro, Ginga Kato, Yoshihiro Kuroda, Kiyoshi Kiyokawa, et Haruo Takemura. 2016. « A Non-grounded and Encountered-type Haptic Display Using a Drone ». In *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction*, 43–46. SUI '16. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2983310.2985746>.
- Yang, Shun Nan, Tawny Schlieski, Brent Selmins, Scott C. Cooper, Rina A. Doherty, Philip J. Corriveau, et James E. Sheedy. 2012. « Stereoscopic viewing and reported perceived immersion and symptoms ». *Optometry and Vision Science* 89 (7): 1068-80. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e31825da430>.
- Yates, Bill J., Michael F. Catanzaro, Daniel J. Miller, et Andrew A. McCall. 2014. « Integration of Vestibular and Emetic Gastrointestinal Signals That Produce Nausea and Vomiting: Potential Contributions to Motion Sickness ». *Experimental Brain Research* 232 (8): 2455-69. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-3937-6>.
- Yee, Nicholas, et Jeremy N. Bailenson. 2007. « The Proteus Effect: The Effect of Transformed Self-Representation on Behavior ». *Human Communication Research* 33 (3): 271-90.
- Yildirim, Caglar. 2019. « Cybersickness during VR gaming undermines game enjoyment: A mediation model ». *Displays* 59 (February): 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2019.07.002>.
- Yoon, Boram, Hyung-il Kim, Gun A. Lee, Mark Billinghurst, et Woontack Woo. 2019. « The Effect of Avatar Appearance on Social Presence in an Augmented Reality Remote Collaboration ». In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 547-56. Osaka, Japan: IEEE. <https://doi.org/10.1109/VR.2019.8797719>.

---

## **ANNEXES**

---

## Annexe 1 : Lettre de saisine

# AUTOSAISINE

Le directeur général de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses),

Vu le code de la santé publique, et notamment son article L. 1313-3 conférant à l'Anses la prérogative de se saisir de toute question en vue de l'accomplissement de ses missions,

### Décide :

**Article 1<sup>er</sup>.**- L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail se saisit afin de réaliser une expertise dont les caractéristiques sont listées ci-dessous.

#### **1.1 Thématiques et objectifs de l'expertise**

Le développement rapide des nouvelles technologies, la diffusion de l'offre grand public d'articles de consommation recourant aux techniques de réalité virtuelle et de réalité augmentée, et le recours en augmentation de ces technologies dans le monde du travail s'accompagnent d'interrogations quant à leurs éventuels effets sur la santé. Ces interrogations étaient déjà soulevées dans les conclusions de l'avis de l'agence publié en 2014 sur les effets sanitaires des technologies audiovisuelles en 3D stéréoscopique (3Ds) appelant à la réalisation d'un travail d'expertise spécifique sur ces questions. L'Anses se saisit afin d'évaluer les effets sanitaires potentiels, incluant ceux liés à la santé mentale, liés à une exposition aux technologies de réalité augmentée et de réalité virtuelle, en milieu de travail et en population générale. Les conséquences sociales et familiales seront investiguées dans la mesure du possible.

#### **1.2 Contexte de l'autosaisine**

Les techniques de réalité virtuelle et de réalité augmentée sont utilisées depuis quelques décennies en milieu de travail et ce dans différents secteurs d'activité (par ex. secteur automobile, santé, etc.). La mise sur le marché de nouvelles technologies dans le domaine de la réalité virtuelle a connu dans la période récente un nouvel essor avec l'augmentation de l'offre et la diffusion rapide de visiocasques destinés au grand public. La plupart des fabricants de visiocasques met en garde les utilisateurs, dans les notices d'emploi, contre de possibles situations d'inconfort (fatigue visuelle, nausées, étourdissements, etc.) et déconseille même l'usage de ces dispositifs par les enfants de moins de 12 ou 13 ans, sans pour autant accompagner ces mises en garde des utilisateurs d'un argumentaire scientifique. La question des effets potentiels de ces nouvelles technologies sur la santé des usagers et de l'existence possible de populations sensibles est ainsi soulevée, notamment en raison des fortes disparités inter-individuelles des capacités sensori-motrices (en particulier pour ce qui concerne la qualité de la vision stéréoscopique).

L'Anses, dans son rapport d'expertise sur les effets sanitaires des technologies audiovisuelles en 3D stéréoscopique (3Ds), posait la question des effets liés aux incohérences sensori-motrices liées à l'utilisation des visiocasques. En effet, certaines études scientifiques rapportent de possibles symptômes lors de l'usage de visiocasques, comme des nausées et vertiges, liés à l'incohérence entre les informations sensorielles émanant d'une part du système visuel et d'autre part de la proprioception, mais aussi des maux de tête, un inconfort visuel ou de la fatigue visuelle et/ou générale, etc. Ces

symptômes pourraient apparaître au cours de l'utilisation des visiocasques, mais aussi plusieurs heures, voire quelques jours après l'exposition. D'autres interrogations méritent d'être explorées, comme d'éventuelles atteintes neurocognitives, des effets psychosociaux et comportementaux, la sécurité photobiologique relative à une exposition rapprochée à la lumière bleue émise par les écrans des visiocasques, ou encore la sécurité physique des utilisateurs.

### **1.3 Questions sur lesquelles portent les travaux d'expertise à mener**

Les travaux de l'agence viseront à identifier et caractériser l'existence de possibles effets sanitaires liés à une exposition à la réalité virtuelle et à la réalité augmentée, et à en évaluer le niveau de preuve associé. Les travaux d'expertise porteront en particulier sur :

- le recensement et la description des caractéristiques des technologies et supports de réalité virtuelle et de réalité augmentée mis sur le marché et utilisés en milieu de travail ou accessibles au grand public ;
- l'établissement d'un état des lieux de la réglementation encadrant la mise sur le marché et l'usage de ces techniques ;
- la description des différentes applications et modalités d'utilisation de ces technologies ;
- la description et la caractérisation d'expositions associées à différents usages de ces technologies ;
- la description des mécanismes et des facteurs pouvant influencer la perception de l'environnement virtuel (impliquant les systèmes visuels et auditifs, la sensibilité cutanée et proprioceptive) ;
- l'analyse de la littérature scientifique et des travaux d'expertise publiés concernant les effets sanitaires liés à une exposition à la réalité virtuelle et à la réalité augmentée ;
- l'identification éventuelle de populations sensibles (notamment les enfants, etc.) ;
- l'analyse des études disponibles portant sur les conséquences psycho-sociales des pratiques d'immersion dans un environnement virtuel.

En fonction de la disponibilité des données, l'Agence tentera d'évaluer le niveau de preuve associé aux effets identifiés, en décrivant si possible les mécanismes biologiques sous-jacents, et étudiera la faisabilité d'une évaluation des risques sanitaires que ces nouvelles technologies pourraient induire au regard des expositions documentées.

Ces travaux d'expertise collective pourront utilement recourir à des auditions de parties prenantes (telles que des associations de consommateurs, des syndicats ou fédérations d'industriels des technologies de réalité virtuelle) ainsi que de toutes personnalités scientifiques permettant d'enrichir le champ des connaissances disponibles.

Enfin, ce travail pourrait aboutir à la formulation, si nécessaire, de recommandations :

- en matière de recherche, dans le domaine des effets potentiels liés à l'exposition aux technologies de réalité virtuelle ;
- en matière d'aménagement de la réglementation ou d'usages visant à protéger la population générale et la population en milieu de travail.

### **1.4 Durée prévisionnelle de l'expertise**

La durée prévisionnelle de l'expertise, intégrant l'étape de définition du cadrage, est évaluée à 24 mois.

**Article 2.-** Un avis sera émis et publié par l'Agence à l'issue des travaux d'expertise.

Fait à Maisons-Alfort, le 19 avril 2017

**Dr. Roger GENET**

**Directeur général**

## Annexe 2 : Techniques et variables récoltées lors des mesures physiologiques liées à la cybercinétose

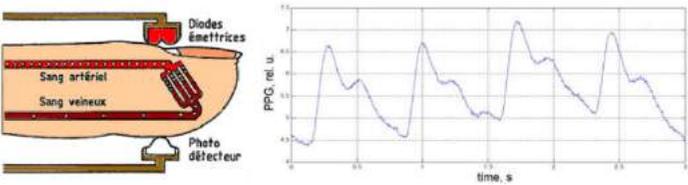
Tableau 28 : Mesures physiologiques : techniques et variables récoltées ou extraites dans les publications.

Techniques de mesure*	Description	Variables récoltées ou extraites
ECG ElectroCardioGramme	<p>L'ECG est une représentation graphique de l'activité électrique du cœur en fonction du temps.</p> <p>Le signal électrique est récupéré par des électrodes placées sur la cage thoracique et sur les 4 membres. Chaque onde enregistrée représente la dépolarisation ou la repolarisation d'une région du cœur. Plusieurs régions sont enregistrées.</p> <p><u>Déroulement de l'examen en condition classique :</u></p> <p>La personne est allongée, à plat, au repos.</p> <p><u>Déroulement de la mesure dans les expérimentations en RV :</u></p> <p>La personne est dans la position de son exposition en RV ; les mesures se font au repos (pre, post) et pendant l'exposition.</p>	<p><u>Variables potentielles :</u></p> <p>Fréquence cardiaque : nombre de battements du cœur par minute (entre 60 et 100 bpm)</p> <p>Bradycardie si FC &lt; 60 bpm, tachycardie si FC &gt; 100 bpm</p> <p>Rythme cardiaque : sinusal ou non (régulier ou pas)</p> <p>Période cardiaque ou intervalle RR (Temps entre 2 battements successifs du cœur, R étant un pic de pulsation cardiaque)</p> <p>Analyse de l'onde P (dépolarisation auriculaire) : durée, axe, amplitude</p> <p>Intervalle PR (conduction auriculo-ventriculaire) : durée (entre 120 et 200 ms)</p> <p>Analyse du complexe QRS (dépolarisation ventriculaire) : morphologie, durée, axe</p> <p>Onde Q</p> <p>Repolarisation ventriculaire : intervalle QT : durée et morphologie, segment ST : morphologie et durée, onde T (repolarisation des ventricules) : morphologie, amplitude et durée, onde U (inconstante)</p> <p>Fréquence cardiaque : nombre de battements du cœur par minute (entre 60 et 100 bpm)</p>

Techniques de mesure*	Description	Variables récoltées ou extraites
		<p>Période cardiaque ou intervalle RR (Temps entre 2 battements successifs du cœur)</p> <p>R : Pic de pulsation cardiaque</p> <p><u>Variables utilisées dans les publications :</u></p> <p>Fréquence cardiaque, Période cardiaque</p> <p>SDRR : Déviation standard des intervalles RR</p> <p>RMSSD : Racine carrée de la moyenne des carrés de la différence des intervalles successifs RR</p> <p>Variabilité de la fréquence cardiaque</p>
<p>EGG ElectroGastroGramme</p>	<p>L'EGG est une représentation graphique des signaux électriques qui traversent les muscles de l'estomac et en contrôlent les contractions. L'EGG détecte les ondes péristaltiques en provenance de l'estomac.</p> <p><u>Origine :</u></p> <p>La conduction du signal se fait à travers les tissus (c'est-à-dire la graisse, les muscles et la peau) séparant les électrodes et la source.</p> <p><u>Déroulement de l'examen en condition classique :</u></p> <p>On dispose au moins 3 électrodes cutanées sur l'abdomen après repérage échographique de l'estomac au préalable si possible. L'utilisation de plusieurs électrodes permet de suivre l'onde péristaltique (ou onde lente) depuis le corps jusqu'au pylore.</p> <p>L'enregistrement se déroule en deux temps : la période de jeûne (environ 30 minutes) puis en post-prandial (environ 60 minutes).</p>	<p><u>Variables potentielles :</u></p> <p>Mesure du rythme électrique gastrique (nombre de cycles/minute)</p> <p>Bradygastrie = Diminution du taux d'activité électrique dans l'estomac (&lt; 2 cycles/minute sur au moins 1 minute)</p> <p>Tachygastrie = Augmentation du taux d'activité électrique dans l'estomac (&gt; 4 cycles/minute sur au moins 1 minute)</p> <p>Normogastrie : 3 cycles/minute, stable</p> <p>Mesure de la puissance électrique (amplitude de l'activité antrale) : chez les individus normaux, la puissance du signal électrique augmente en post-prandial.</p> <p><u>Variables utilisées dans les publications :</u></p> <p>Bradygastrie, Tachygastrie</p>

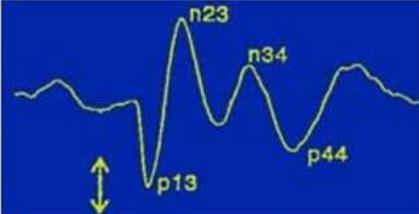
Techniques de mesure*	Description	Variables récoltées ou extraites
	<p>Une transformée de Fourier est appliquée au signal d'EGG obtenu sur une période 1 à 4 min afin de mesurer la puissance électrique à la fréquence émergente.</p> <p><u>Déroulement de la mesure dans les expérimentations en RV :</u></p> <p>Ces signaux sont récupérés par deux ou trois électrodes placées sur l'abdomen (selon les publications), alors que la personne est dans la position de son exposition en RV soit au repos (pre, post), soit pendant l'exposition.</p>	
<p>EOG Electro Oculo Gramme</p>	<p>L'EOG permet de mesurer l'activité de l'épithélium pigmentaire à la suite d'un changement d'état d'adaptation lumineuse de la neurorétine.</p> <p><u>Déroulement de l'examen en condition classique :</u></p> <p>L'examen se déroule en 3 phases: la phase de pré-adaptation (15 minutes avant le début de l'enregistrement), la phase d'obscurité (12-15 minutes) puis la phase lumineuse (12-15 minutes) où la stimulation est binoculaire. La personne doit suivre un point cible à droite puis à gauche alternativement avec un angle standard de 30°.</p> <p>Le recueil des différences de potentiel effectué entre deux électrodes de surfaces, l'une placée au canthus interne et l'autre au canthus externe de chaque œil reflète la dépolarisation de la membrane basale de l'épithélium pigmentaire.</p> <p><u>Déroulement de la mesure dans les expérimentations en RV :</u></p> <p>Les deux électrodes utilisées sont placées comme suit : l'une sur la ligne médiane verticale de l'œil droit au-dessus du sourcil, et l'autre à environ 1 cm sous la paupière inférieure. La mesure se fait alors que la personne est dans la position de son exposition en RV, soit au repos (pre, post), soit pendant l'exposition. Le stimulus est le contenu RV.</p>	<p><u>Variables potentielles :</u></p> <p>Valeur minimale, à l'obscurité : Dark Trough ou DT (mesurée entre la valeur de base et le creux)</p> <p>Valeur maximale à la stimulation lumineuse : Ligh peak ou LP (mesurée entre la valeur de base et le maximum)</p> <p>Rapport d'Arden : LP/DT (&gt;1.8)</p> <p><u>Variables utilisées dans les publications :</u></p> <p>Fréquence du clignement des yeux</p>

Techniques de mesure*	Description	Variables récoltées ou extraites
EEG Electroencéphalogramme	<p>L'EEG permet l'enregistrement de l'activité bioélectrique cérébrale au cours du temps grâce à des électrodes placées sur le scalp. Il s'agit de l'examen de référence dans l'évaluation fonctionnelle du système nerveux central.</p> <p><u>Déroulement de l'examen en condition classique :</u></p> <p>Une préparation adéquate du cuir chevelu de la personne est nécessaire au préalable. Les électrodes doivent être positionnées sur le scalp suivant le système international 10-20 à équidistance les unes des autres.</p> <p>La personne est éveillée pour l'EEG standard. Epreuves d'activation (ouverture et fermeture des yeux, hyperpnée de 3 minutes, stimulation lumineuse intermittente).</p> <p>Un EEG du sommeil est possible.</p> <p><u>Analyse de l'EEG :</u></p> <p>Les rythmes cérébraux observés en EEG contribuent aux différentes fonctions cognitives en fonction de leur localisation, leurs caractéristiques d'amplitude, de fréquence, de phase et de cohérence.</p> <p>Le rythme bêta (13-30 Hz), de plus faible amplitude (5 à 15 mV), est surtout visible sur les régions fronto-rolandiques. Présent chez 22 % des sujets sains, il est modulé par les mouvements, et est modifié au cours des tâches cognitives requérant une interaction sensori-motrice. Il s'agit d'un rythme d'éveil associé à l'activité intellectuelle, l'attention, la concentration sur l'environnement, et il intervient dans l'encodage et la consolidation d'informations sensorielles.</p> <p>Le rythme alpha est constitué d'ondes régulières dont la fréquence est de 8 à 12 Hz et l'amplitude de 25 à 100 mV. Ce rythme est recueilli avec une prédominance occipitale bilatérale et s'étend plus ou moins largement vers les régions antérieures.</p> <p>L'ouverture des yeux fait disparaître le rythme alpha en conservant les rythmes rapides.</p> <p>L'hyperpnée est normalement peu active, mais, et surtout si elle est énergiquement exécutée, elle peut ralentir le tracé et faire apparaître des bouffées d'ondes lentes bilatérales à prédominance antérieure sans signification pathologique précise, notamment si elles sont symétriques.</p>	<p><u>Variables potentielles :</u></p> <p>Fréquence, réactivité, symétrie des rythmes cérébraux</p> <p>Anomalies lentes : distribution (généralisée ou focale), réactivité</p> <p>Anomalies pointues : morphologie (pointe, polypointe, polypointe-onde,...) distribution, réactivité</p> <p>Pointe : décharge brève (moins de 1/12ème de seconde), de haut voltage, mono ou polyphasique</p> <p>Complexe pointe-onde (par abréviation le pointe-onde : pointe suivie d'une onde lente plus ou moins ample)</p> <div data-bbox="1361 742 1635 986" style="text-align: center;"> </div> <p>(<a href="https://wikimedi.ca/wiki/Syst%C3%A8me_10-20_(EEG)">https://wikimedi.ca/wiki/Syst%C3%A8me_10-20_(EEG)</a>)</p> <p><u>Variables utilisées dans les publications :</u></p> <p>Spectre de la puissance EEG</p> <p>Puissance relative : lorsque la puissance d'une bande de fréquence donnée est rapportée à la somme des puissances mesurées sur l'ensemble du spectre fréquentiel, on parle de puissance relative.</p>

Techniques de mesure*	Description	Variables récoltées ou extraites
	<p>La stimulation lumineuse intermittente (S.L.I.) provoque sur les aires visuelles, occipitales, des réponses de même fréquence, avec parfois des rythmes harmoniques ou sous-harmoniques.</p> <p><u>Déroulement de la mesure dans les expérimentations en RV :</u></p> <p>L'EEG est enregistré à partir des électrodes alors que la personne est dans la position de son exposition en RV, soit au repos (pre, post), soit pendant l'exposition. Par exemple, 9 électrodes positionnées en F3, F4, Cz, T3, T4, P3, P4, O1 et O2.</p>	
PPG Photopléthysmogramme	<p>Le PPG est une méthode optique non invasive qui permet d'évaluer les variations de volumes sanguins dans les tissus superficiels par la variation de l'absorption de lumière dans ces tissus. Cela permet également de déterminer le niveau d'oxygénation dans le sang. Les oxymètres de pouls sont généralement fixés au doigt ou à l'oreille.</p> <p><u>Déroulement de l'examen en condition classique :</u></p> <p>Mesure par transmittance : utilisation d'une source lumineuse constituée de deux LED (rouge et infrarouge), et d'un photorécepteur placé de part et d'autre du volume de tissu utilisé pour la mesure (doigt ou oreille). La lumière transmise par la source lumineuse est modulée par le volume d'hémoglobine dans les capillaires sous la peau puis captée par le photorécepteur.</p> <p>Mesure par réflectance : la source lumineuse et le photorécepteur sont côte à côte.</p> <p>Le signal obtenu a une apparence caractéristique en rapport avec les phénomènes de diastole (entraîne une diminution du volume sanguin dans les capillaires responsable d'une diminution du niveau d'absorption) et de systole (entraîne une augmentation de volume sanguin dans les capillaires et donc une diminution de l'intensité de lumière transmise). Le signal est une combinaison des signaux artériels et veineux, influencés par la fréquence cardiaque et respiratoire.</p> <p>Deux gammes de longueurs d'onde sont habituellement employées pour l'estimation de la saturation en oxygène dans le sang : une première correspondant au rouge (600-750 nm) et une seconde correspondant au proche infrarouge (850 - 1000 nm).</p> <p>Les réponses en absorption de l'oxyhémoglobine (hémoglobine riche en oxygène) et de la déoxyhémoglobine (hémoglobine dissociée de l'oxygène) ne sont pas égales pour</p>	<p><u>Variables potentielles :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- rythme des pulsations de volume sanguin, reflet de la fréquence cardiaque ;</li> <li>- saturation en oxygène (SpO2).</li> </ul> <div style="text-align: center;">  </div> <p>(<a href="https://sofia.medicalistes.fr/spip/IMG/pdf/SpO2.pdf">https://sofia.medicalistes.fr/spip/IMG/pdf/SpO2.pdf</a>)</p> <p><u>Variables utilisées dans les publications :</u></p> <p>Saturation en oxygène</p>

Techniques de mesure*	Description	Variables récoltées ou extraites
	<p>une même longueur d'onde, il est possible d'établir la concentration en oxygène dans le sang SpO2 (exprimée en %) et de la suivre dans le temps.</p> <p><u>Déroulement de la mesure dans les expérimentations en RV :</u></p> <p>Le PPG est enregistré à partir d'un oxymètre placé sur le pouce alors que la personne est dans la position de son exposition en RV, soit au repos (pre, post), soit pendant l'exposition.</p>	
<p>Pneumogramme respiratoire</p> <p>Epreuves fonctionnelles respiratoires (EFR)</p>	<p>Les EFR sont un ensemble d'exams permettant l'exploration de la fonction ventilatoire des poumons. Elles comportent une spirométrie qui permet de déterminer les volumes pulmonaires et une mesure des débits forcés.</p> <p>Le pneumogramme respiratoire permet de visualiser l'évolution de la respiration en fonction du temps. On peut ainsi voir l'évolution de l'amplitude et de la fréquence de la respiration.</p> <p><u>Déroulement de l'examen en condition classique :</u></p> <p>La personne est assise dans une cabine. Un pince-nez est mis en place ainsi qu'un embout buccal relié à un spiromètre, associé à un ordinateur. Elle respire normalement puis à fond pour mesurer les volumes pulmonaires.</p> <p>Dans un deuxième temps, la personne inspire à fond puis expire le plus fort et le plus longtemps possible pour évaluer les débits expiratoires (examen répété plusieurs fois, le meilleur résultat est conservé).</p> <p><u>Autre :</u></p> <p>Les pneumographes mesurent la circonférence du thorax. Ils peuvent être construits simplement à partir d'un soufflet qui génère une pression lorsqu'il est étiré ou d'un tube élastique contenant du mercure qui modifie une résistance électrique lors de son étirement.</p> <p>Ils sont employés essentiellement pour des mesures qualitatives, par exemple de la fréquence respiratoire.</p>	<p><u>Variables potentielles :</u></p> <p>Mesure des volumes pulmonaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacité pulmonaire totale (CPT) : l'ensemble des volumes pulmonaires (CPT = CV + VR) ;</li> <li>- Capacité vitale (CV) : volume obtenu après inspiration maximale et expiration lente ;</li> <li>- Volume résiduel (VR) : volume en fin d'expiration forcée, non mobilisable ;</li> <li>- VT: volume courant ;</li> <li>- VRI : volume de réserve inspiratoire ;</li> <li>- VRE: volume de réserve expiratoire ;</li> <li>- Capacité résiduelle fonctionnelle (CRF) : volume résiduel en fin d'expiration normale.</li> </ul> <p>Analyse de l'expiration forcée : étude des volumes expirés par unité de temps (obtenue en utilisant un spiromètre). S'apparente à une expiration forcée du volume de la CV.</p> <p>Capacité vitale forcée (CVF) : volume d'air expiré avec force après inspiration profonde. CVF et CV sont similaires chez le sujet sain .</p>

Techniques de mesure*	Description	Variables récoltées ou extraites
	<p>Le pneumogramme thoracique est l'enregistrement des changements de circonférence du thorax ; il fournit une mesure qualitative de la ventilation. Cependant, comme le grillage costal et la paroi abdominale se mobilisent de façon indépendante chez la plupart des sujets conscients, les mesures exactes des déplacements de la cage thoracique requièrent le plus souvent des mesures simultanées en au moins deux endroits différents.</p> <p><u>Déroulement de la mesure dans les expérimentations en RV :</u></p> <p>Le pneumogramme thoracique est enregistré à partir d'une ceinture thoracique alors que la personne est dans la position de son exposition en RV, soit au repos (pre, post), soit pendant l'exposition.</p>	<p>Volume expiratoire forcé maximal en une seconde (VEMS) : fraction de la CVF expirée à la 1ère seconde.</p> <p>Rapport de Tiffeneau : VEMS/CV</p> <p>Courbe Débit/Volume : le débit de pointe (DP ou peak flow) mesure le débit maximal obtenu lors d'une expiration forcée.</p> <p>Fréquence respiratoire : Nombre de cycles respiratoires (inspiration et expiration) par unité de temps.</p> <p>Amplitude des mouvements respiratoires : quantité d'air inspiré et expiré à chaque cycle ventilatoire, représente l'importance des mouvements de la cage thoracique lors de la respiration.</p> <p><u>Variables utilisées dans les publications :</u></p> <p>Fréquence respiratoire, amplitude des mouvements respiratoires</p>
<p>VEMP</p> <p>Potentiels Myogéniques cervicaux      Evoqués Vestibulaires</p>	<p><u>Origine :</u></p> <p>Réflexe sacculo-collique de latence brève entre le saccule de l'organe de l'équilibre et le muscle sterno-cléido-mastoidien (SCM) situé dans le cou. Dans l'oreille interne, les macules otolithiques du saccule sont impliquées dans la perception de la gravité et des accélérations verticales. En réponse à une forte stimulation acoustique (&gt; 80 dB chez l'adulte), les macules sacculaires contrôlent la contraction du muscle SCM ipsilatéral.</p> <p><u>Voie anatomo-physiologique testée :</u></p> <p>voie vestibulo-spinale débutant par les macules sacculaires puis impliquant le nerf vestibulaire inférieur, le noyau vestibulaire latéral, et le tractus vestibulo-spinal médial avant de se terminer par les motoneurones du SCM.</p>	<p><u>Variables potentielles :</u></p> <p>Seuils, latences et amplitudes des ondes P13-N23 recueillies sur le SCM (étude comparative des réponses droites et gauches)</p> 

Techniques de mesure*	Description	Variables récoltées ou extraites
	<p><u>Déroulement du test en condition classique :</u></p> <p>La personne est en décubitus dorsal et tête relevée (SCM contractés), bouffées tonales de 500 Hz d'intensité décroissante à partir de 95-100 dB administrées à l'oreille testée par un écouteur ou un vibreur. L'enregistrement concomitant de l'électromyogramme (EMG) du SCM permet de s'assurer de la contraction constante du muscle d'une stimulation à l'autre. L'amplitude des potentiels évoqués est corrélée à l'amplitude de la contraction des muscles SCM.</p> <p><u>Déroulement de la mesure dans les expérimentations en RV :</u></p> <p>Les VEMPs ont été enregistrés grâce aux électrodes placées sur les muscles sterno-cléido-mastoïdien droite et gauche alors que la personne était dans la position de son exposition en RV (exposition aux stimuli visuels en décubitus dorsal), soit au repos (pre, post), soit pendant l'exposition.</p>	 <p><u>Variables utilisées dans les publications :</u></p> <p>Amplitude des ondes P1-N1, Latences P1 et N1</p> <p>Ratio d'asymétrie</p>
Conductance de la peau	<p>La conductance de la peau ou réaction électrodermale est une manifestation électrophysiologique qui rend compte de l'activité du système nerveux sympathique.</p> <p><u>Origine :</u></p> <p>La réaction électrodermale correspond à l'activité des glandes sudorales eccrines, présentes en grande quantité sur la face palmaire des mains. L'activation sympathique conduit à une augmentation de la sueur primitive extraite du plasma sanguin. Puis il y a une réabsorption au niveau du canal sécréteur. Ce sont ces variations de concentrations qui génèrent des dipôles créateurs de variations de potentiels enregistrables. La sueur évacuée se concentre aussi en surface par évaporation pouvant à ce niveau générer également des différences de potentiel.</p> <p>L'augmentation de conductance cutanée est proportionnelle au nombre de glandes actives.</p> <p>Contrôle du système nerveux central avec notamment mise en jeu des structures limbiques (amygdale, hippocampe).</p> <p><u>Déroulement de l'examen en condition classique :</u></p>	<p><u>Variables potentielles :</u></p> <p>Réponses phasiques (production de la sueur dans le canal excréteur et le pore) et toniques (accumulation ou résorption de sueur dans les couches superficielles ; rôle de l'hydratation cutanée).</p> <p>Variation de tension et de conductance</p> <p><u>Variables utilisées dans les publications :</u></p> <p>Conductance de la peau</p>

Techniques de mesure*	Description	Variables récoltées ou extraites
	<p>La personne est allongée, dans une pièce calme, dans la pénombre avec une température ambiante chaude (25°C).</p> <p>Stimulations : électrique, auditive, inspiration ou expirations forces, réactions psychiques.</p> <p>Enregistrement par deux capteurs que l'on place sur les doigts du sujet.</p> <p>Mesure du potentiel : amplification de la différence de potentiel spontané recueillie entre deux électrodes places sur des surfaces cutanées.</p> <p>Mesure de conductance : utilisation d'un microcourant sous un voltage constant entre les 2 électrodes (~0.5 V)</p> <p>Les réponses phasiques sont "spontanées" (mesure du nombre de réponses) ou provoquées par des stimulations (mesure de la variation d'amplitude maximale du signal survenant 1 à 3 secondes après la stimulation en général).</p> <p>Les stimulations visent à induire des émotions, il peut s'agir de la présentation d'images (visages, mots), de films, de musiques, d'odeurs.</p> <p><u>Remarque</u> : l'augmentation de la température corporelle s'accompagne de réactions électrodermales plus nombreuses sur l'ensemble de la surface corporelle : au front par exemple (pas de spécificité de cette zone pour la sudation émotive).</p> <p><u>Déroulement de la mesure dans les expérimentations en RV :</u></p> <p>Elle est réalisée, via des électrodes, au(x) doigt(s) ou au front alors que la personne est dans la position de son exposition en RV, soit au repos (pre, post), soit pendant l'exposition.</p>	
Température de la peau	La température cutanée est la température de la surface la plus externe du corps. Il ne s'agit pas d'un bon reflet de la température corporelle.	Variables potentielles : Température mesurée en degré °C (degrés Celsius) ou °F (degrés Fahrenheit)

Techniques de mesure*	Description	Variables récoltées ou extraites
	<p><u>Généralités :</u></p> <p>La température corporelle chez le sujet sain est de 37°C ± 1°C avec des variations selon le rythme circadien et d'autres facteurs.</p> <p>L'équilibre entre thermogénèse (production de chaleur par le biais de réactions biochimiques au niveau de la graisse brune et des muscles) et thermolyse (perte de chaleur par voie cutanée et respiratoire) est régulée par le centre de la thermorégulation : l'hypothalamus. La vasomotricité (via un contrôle par le système nerveux autonome) règle les échanges thermiques cutanés pour des températures ambiantes allant de 20 à 30 °C. La sudation intervient par le biais de l'évaporation de la sueur en cas de température extérieure &gt; 35 °C tandis que l'augmentation du tonus musculaire puis les frissons permettent la production de chaleur.</p> <p>La température centrale (organes et tissus profonds) est relativement stable mais celle de l'enveloppe ou écorce (peau et tissus sous-cutanés) varie de façon importante.</p> <p>La température cutanée n'est pas uniforme dans son ensemble, elle varie selon la localisation. La température cutanée moyenne est d'environ 30°C.</p> <p>Les températures cutanées les plus basses sont généralement observées au niveau des extrémités : doigts, orteils, oreilles et nez.</p> <p>La température cutanée (en particulier digitale) est influencée par divers facteurs : débit sanguin, température extérieure, stress émotionnel, médicaments, dysthyroïdies, tabagisme.</p> <p><u>Condition de prise de la température en condition classique :</u></p> <p>Idéalement à distance des repas et après 20 minutes de repos. Pièce à température ambiante constante.</p> <p>La mesure de la température rectale (par thermomètre électronique ou à gallium) reste le plus fidèle reflet de la température corporelle mais il existe un risque d'ulcération thermométrique. Les voies axillaire ou buccale sont habituellement utilisées (majoration de 0.5°C de la température mesurée pour obtenir la température centrale). La voie tympanique avec l'utilisation de thermomètre infrarouge peut être mise en défaut en cas d'obstruction du conduit auditif externe.</p>	<p>Fièvre : hausse de la température centrale au-dessus des variations normales circadiennes, classiquement ≥ 38°C le matin (38.3°C le soir).</p> <p>Hypothermie : baisse de la température centrale ≤ 35°C.</p> <p>Variables utilisées dans les publications :</p> <p>Température au niveau d'un doigt ou de l'avant-bras en degré °C ou °F</p>

Techniques de mesure*	Description	Variables récoltées ou extraites
	<p>Il existe différents types de thermomètres utilisables : thermomètres à cristaux liquides, thermomètre à changement de phase ou matrice de point, thermomètre électronique, thermomètre à infrarouge, thermomètres à gallium.</p> <p>- Pour le front, on pourra utiliser un thermomètre à cristaux liquides (peu fiable) ou un thermomètre infrarouge sans contact (permettant la mesure du rayonnement naturel dans l'infrarouge qui est représentatif de la température en surface de l'élément sondé).</p> <p>- Pour les doigts, la thermométrie digitale assistée par ordinateur est utilisée notamment dans le cadre de l'exploration des acrosyndromes (phénomène de Raynaud) avec des tests d'exposition au froid. On utilise dix microcapteurs thermorésistants en silice, reliés à un convertisseur analogique contrôlé par un ordinateur et placés à la face dorsale de l'interphalangienne de chaque doigt à l'aide d'un sparadrap.</p> <p><u>Remarque</u> : l'appréciation de la température cutanée dépend largement des conditions circulatoires locales, de la transpiration et de la température environnante.</p> <p><u>Déroulement de la mesure dans les expérimentations en RV :</u></p> <p>Elle est réalisée, avec thermorésistance, au doigt ou à l'avant-bras alors que la personne est dans la position de son exposition en RV, soit au repos (pre, post), soit pendant l'exposition.</p>	

\* Ainsi que le montre ce tableau, les techniques et conditions de mesure lors des expérimentations en réalité virtuelle peuvent différer de celles de l'examen classique : la personne est placée dans la position de son exposition en RV, que ce soit au repos (pre, post) ou pendant l'exposition. Les dispositifs de mesure utilisés sont des outils de laboratoire.

## Annexe 3 : Synthèse des résultats des mesures physiologiques liées à la cybercinétose

Tableau 29 : Synthèse des résultats des mesures physiologiques liées à la cybercinétose.

Étude	Dispositifs	Contenu	Temps exposition	Effectif + âge ( $\mu$ , <i>range</i> ) + arrêts ou abandons	Effet mesuré sur cybercinétose	Effet mesuré sur physiologie	Lien entre physiologie et cybercinétose
Kim <i>et al.</i> (2005)	<p><i>Visualisation :</i></p> <p>Ecran concave type théâtre</p> <p>FOV : 150°H 45°V</p> <p>3840 x 1024, 30 fps</p> <p><i>Interaction :</i></p> <p>Volant, freins, accélérateur</p> <p><i>Audio :</i></p> <p>Hauts parleurs</p>	<p><i>Baseline :</i></p> <p>Image statique de l'EV</p> <p><i>EV :</i> Navigation et observation dans campagne et ville</p>	<p><i>Baseline :</i> 5'</p> <p><i>EV :</i> 9.5'</p>	<p>61 (31H et 30F)</p> <p><math>\mu = 23</math> ; [19-27]</p> <p>Sujets sains, sans expé RV</p> <p><b>4 abandons</b> (2H et 2F) car vomissements</p>	<p>SSQ post = 39</p> <p>Désorientation &gt; Nausée &gt; Oculomoteur</p>	<p>Effet Temps</p> <p>&gt; =&gt; Augmentation significative de : Tachyarythmie Gastrique (TAG), conductance peau doigt, Variabilité Fréquence Cardiaque, Puissance delta relative des sites T3 et F3.</p> <p>=&gt;Diminution significative de : Période cardiaque, Température peau, Amplitude maximale du photopléthysmogramme, Puissance bêta relative des sites F3 et T3.</p>	<p>Corrélation positive significative des scores SSQ avec :</p> <p>TAG, Fréquence clignements yeux, Fréquence respiratoire, arythmie des sinus respiratoires (VFC) et période cardiaque</p> <p>=&gt;Plus ces variables physiologiques changent par rapport à la baseline, plus les personnes rapportent de la cybercinétose dans EV.</p> <p>Corrélations positives dans changements puissance spectrale EEG</p> <p>=&gt; Plus les sujets rapportent cybercinétose, plus la puissance delta relative change dans sites F3, T3 et O1 et la puissance thêta relative change dans P3, et moins la puissance bêta relative change dans sites F3, T3, T4 et O1, et la puissance gamma relative dans site F3 augmente.</p>

Étude	Dispositifs	Contenu	Temps exposition	Effectif + âge ( $\mu$ , range) + arrêts ou abandons	Effet mesuré sur cybercinétose	Effet mesuré sur physiologie	Lien entre physiologie et cybercinétose
							La baisse de certaines variables physiologiques peut être signe d'adaptation, de cybercinétose ou de fatigue.
Nalivaiko <i>et al.</i> , (2015)	<p><i>Visualisation :</i> Casque OR DK1 Pas autre info</p> <p><i>Interaction :</i> -</p> <p><i>Audio :</i> -</p>	<p><i>Baseline :</i> image neutre stationnaire</p> <p><i>EV :</i> Exposition à tour virtuel montagnes russes avec 2 systèmes : <i>ParrotCoaster</i> et <i>Helix</i> (plus réaliste)</p>	<p><i>Baseline :</i> 10'</p> <p><i>EV :</i> 14' : Expo RV (<i>Parrot</i> ou <i>Helix</i>)</p> <p>1 condition par groupe</p>	<p>26 (18H + 8F) <math>\mu = 22,5</math> ; [18-30]</p> <p>Sujets sains (9H et 4F) pour <i>Parrot</i> (9H et 4F) pour <i>Helix</i></p> <p><b>Abandons</b> avant la fin des 14' : 67 % G <i>Helix</i> et 17 % G <i>Parrot</i></p>	<p>Immersion dans EV =&gt;provoque nausée =&gt;nausée <i>Helix</i> &gt; <i>Parrot</i></p> <p>=&gt;conduit à arrêt avant la fin des 14' : 67 % G <i>Helix</i> et 17 % G <i>Parrot</i></p> <p>MSSQ pre =&gt;<i>Parrot</i> : corrélation positive signif. avec nausée =&gt;<i>Helix</i> : corrélation négative signif. avec temps du tour (si on enlève 5 qui ont réussi les 14') =&gt;MSSQ (pre) prédit l'apparition nausées (G <i>Parrot</i>) et l'abandon plus précoce de la session (G <i>Helix</i>)</p>	<p>=&gt;Augmentation du temps de réaction de 20 à 50 ms (Effet temps/ Pas d'effet système)</p> <p>=&gt;Impact sur la fréquence cardiaque selon l'état nauséux des sujets : voir ci-contre</p> <p>=&gt;Impact sur la Température de la peau, de façon variée selon les sujets qui ont été classés en <i>low-T</i> (n=8, 23-29°C) et <i>high-T</i> (n=18, 32-36°C), baseline au niveau du doigt.</p> <p>=&gt;Dans la majorité des cas (15/26) la température au niveau de l'avant-bras n'a pas changé.</p>	<p>Dans le G <i>Helix</i>, le temps de réaction augmente avec la nausée.</p> <p>L'immersion dans les montagnes russes : - augmente le temps de réaction de 20 à 50 ms ; - impacte la FC selon l'état nauséux des sujets : sujets nauséux (score &gt; 5), la FC augmente ; sujets moyennement nauséux (score &lt; 5), augmentation pour certains et diminution pour d'autres</p> <p>La nausée est associée de façon variable aux variations de température de la peau du doigt.</p>

Étude	Dispositifs	Contenu	Temps exposition	Effectif + âge ( $\mu$ , <i>range</i> ) + arrêts ou abandons	Effet mesuré sur cybercinétose	Effet mesuré sur physiologie	Lien entre physiologie et cybercinétose
Gavvani <i>et al.</i> (2016)	<p><i>Visualisation</i> : Casque OR DK1</p> <p>Pas autre info</p> <p><i>Interaction</i> : -</p> <p><i>Audio</i> : -</p>	<p><i>Baseline</i> : Image statique</p> <p><i>EV</i> : Exposition à tour virtuel montagnes russes sur 3 jours consécutifs</p> <p>Assis, Pas d'interaction</p>	<p><i>Baseline</i> : 5' chaque jour</p> <p><i>EV</i> : 15' chaque jour</p>	<p>14 (6H et 8F)</p> <p><math>\mu = 29</math> ; [18-37]</p> <p>Sujets sains, sans expé RV</p> <p><b>Abandons</b> : Un seul a tenu les 15' sur les 3 jours</p>	<p>Baseline : Pas de cybercinétose</p> <p>Effet Display et Contenu : =&gt;Vection et Nausée =&gt;14/15 abandons avant 15'</p> <p>Effet Temps =&gt;Symptômes cybercinétose présents après 3h</p> <p>Effet Répétitions : =&gt;<math>\uparrow</math>Temps et <math>\downarrow</math>nausée 3<sup>ème</sup> jour =&gt;Désensibilisation</p> <p>Symptômes profilant cybercinétose :</p>	<p>Baseline : pas de différence sur les 3 jours</p> <p>Effet Display et Contenu : =&gt; Augmentation de FC, FR et conductance de la peau du doigt sont apparues très peu de temps après le début du tour alors qu'il n'y avait pas de nausée. =&gt; Augmentation de la conductance de la peau du front apparue avec un délai très variable selon les individus, et comme liée à la nausée.</p>	<p>Effet dominant étudié : le contenu</p> <p>Schéma complexe d'effets autonomes induits par la RV</p> <p>=&gt;cybercinétose associé avec influences mineures sur fréquence cardiaque et respiration + réponse sudomotrice significative</p> <p>=&gt;Conductance de la peau du front : biomarqueur le plus sensible et le plus spécifique de la nausée</p> <p>+</p> <p>=&gt;Symptômes subjectifs de cybercinétose durables (&gt;3h) =&gt;Répétition induit Désensibilisation</p>

Étude	Dispositifs	Contenu	Temps exposition	Effectif + âge ( $\mu$ , range) + arrêts ou abandons	Effet mesuré sur cybercinétose	Effet mesuré sur physiologie	Lien entre physiologie et cybercinétose
					GI > Sopite > Central > Périphérique  Susceptibilité au cybercinétose très dépendante du contenu		
Gavagni <i>et al.</i> (2017)	Visualisation : Casque OR DK1 Pas autre info  Interaction : -  Audio : -	Baseline : Image statique  EV : Exposition à tour virtuel montagnes russes sur 2 jours consécutifs  J1 avant J2 arrière Ou vice versa  Assis, Pas d'interaction	Baseline : 5' chaque jour  EV : 15' chaque jour	12 (6H et 6F) $\mu = 27$ ; Nd  Sujets sains, sans expé RV  <b>Abandons :</b> Tous arrêtent avant 15' car cybercinétose	Effet Display et Contenu : =>12/12 abandons avant 15'  Effet Vection : =>Temps (arrière) > Temps (avant) =>Nausée (arrière) < Nausée (avant) =>MSAQ post (arrière) < MSAQ (avant)	Effet Vection avec comparaison baseline / Last minute : =>Pas d'effet sur Fréquence cardiaque =>Effet significatif sur indices cardiaques vagues (SDRR et RMSSD) si « en avant » (diminution) ; pas d'effet si « en arrière » =>Augmentation significative de l'amplitude des changements phasiques de la conductance cutanée du front dans les deux conditions (avant, arrière) =>Augmentation (arrière) < Augmentation (avant)	=>Indice vagal RMSSD : Si « en avant », inversement corrélé avec augmentation de la nausée et significativement diminué en cas de nausée élevée / Si « en arrière », pas de changement  =>Indice vagal SDDR : pas de corrélation avec nausée  => « en avant » associé avec suppression tonalité cardiaque vagale et augmentation de la nausée  =>Amplitude conductance cutanée du front et fréquence : augmente significativement avec nausée si « en avant » ; pas de significativité si « en arrière »

Étude	Dispositifs	Contenu	Temps exposition	Effectif + âge ( $\mu$ , range) + arrêts ou abandons	Effet mesuré sur cybercinétose	Effet mesuré sur physiologie	Lien entre physiologie et cybercinétose
Gavagni <i>et al.</i> (2018)	<p>Visualisation : Casque OR DK1</p> <p>Pas autre info</p> <p>Interaction : -</p> <p>Audio : - + Chaise tournante</p>	<p>Baseline : Alternativement, sur 2 jours séparés d'1 sem</p> <p>VR : Exposition à un tour virtuel sur montagnes russes), sans interaction</p> <p>Et</p> <p>RC : Exposition mouvements chaise tournante yeux bandés</p> <p>Aléatoirement G1 (VR puis RC) G2 (RC puis VR)</p>	<p>Baseline : 15' pour chaque condition</p> <p>EV : Baseline pre 5' chaque jour</p>	<p>30 (14H et 16F) <math>\mu = 25.8</math> ; Nd</p> <p>Sujets sains</p> <p>Abandons : Un seul a pu tenir 15' dans les 2 conditions</p>	<p>Temps d'apparition de la Nausée (environ 1')</p> <p>=&gt;corrélation entre les 2 conditions</p> <p>=&gt;ceux qui développent tôt la nausée ont des niveaux max de nausée dans les 2 conditions</p> <p>MSSQ, Temps de tolérance, Nausée</p> <p>=&gt;gde variabilité MSSQ [0 ; 82.9]</p> <p>=&gt;Nausée pour tous, un seul tient 15' dans 2 conditions</p> <p>=&gt;Tps tolérance VR (6')&gt;RC (3.6') (S)</p> <p>=&gt;Max nausée VR corrélé Max nausée RC (S)</p> <p>MSAQ</p>	<p>=&gt;4 sujets éliminés de l'analyse en raison d'artefacts</p> <p>=&gt;La tendance à la hausse de la conductance (tonique et phasique) devient significative au max des nausées en comparaison avec la baseline</p> <p>=&gt;Pas de différence significative entre les 2 conditions aux points : pas de nausée ou nausée max</p>	<p>=&gt;Les sensibilités aux deux stimulations (délai d'apparition de la nausée) sont corrélées entre les études RC et VR.</p> <p>=&gt;Les deux stimulations ont abouti à l'élaboration de profils de symptômes similaires qui étaient étroitement corrélés au sein des individus. =&gt;L'augmentation de la conductance cutanée du front s'est faite en parallèle de la progression des nausées dans les deux conditions.</p>

Étude	Dispositifs	Contenu	Temps exposition	Effectif + âge ( $\mu$ , <i>range</i> ) + arrêts ou abandons	Effet mesuré sur cybercinétose	Effet mesuré sur physiologie	Lien entre physiologie et cybercinétose
					=>post>pre pour 2 conditions. =>Forte corrélation entre MSAQ post VR et RC =>Forte corrélation entre les sous catégories VR et RC		
Gallagher <i>et al.</i> (2019)	<i>Visualisation :</i> Casque OR DK2 Pas autre info  <i>Interaction :</i> -  <i>Audio :</i> Ecouteurs HDA 280 Sennheiser	<i>Baseline :</i> -  <i>EV :</i> Observation motif de points blancs en mvt sur un fond noir ds 2 conditions : Vection (flux en expansion) et Random (points avec mvt aléatoire)	<i>Baseline :</i> -  <i>EV :</i> 1' pour chaque condition  Repos 3' entre les 2	24 (7H et 17F) $\mu = 21$ ; Nd  Sujets sains	MSSQ pre : =>Average percentile score : 41.80%  =>susceptibilité modérée à MS  Effet Vection =>22/24 ressentent automouvement dans C-Vection	Effet Vection =>Augmentation de l'amplitude du VEMP gauche après 1' d'exposition =>Repondération dynamique des indices vestibulaires (mesurés par VEMP) =>Peut expliquer adaptation et after-effects	Avec cet échantillon : =>Pas de corrélation entre amplitude VEMP et susceptibilité à MS (MSSQ) =>Susceptibilité MS n'influence pas VEMP  =>Repondération dynamique des indices vestibulaires. Tout ceci se produit après une exposition d'1' seulement, et de plus sans la perception consciente de l'utilisateur.
Ling <i>et al.</i> , (2012)	<i>Visualisation :</i>	<i>Baseline :</i>	<i>Baseline :</i> 7'	88 (53H et 35F) $\mu = 28$ ; [18-70]	Peu d'information sur les données	Fréquence cardiaque récoltée sur 60 sujets non décrits	Pas d'étude du lien entre fréquence cardiaque et cybercinétose

Étude	Dispositifs	Contenu	Temps exposition	Effectif + âge ( $\mu$ , range) + arrêts ou abandons	Effet mesuré sur cybercinétose	Effet mesuré sur physiologie	Lien entre physiologie et cybercinétose
	Casque eMagin Z800 FOV : 40° Diag 60 Hz <i>Interaction :</i> - <i>Audio :</i> Hauts parleurs	EV neutre sans stéréoscopie  <i>EV :</i> Prise de parole devant un public virtuel avec attitude variable  Possibilité de naviguer avec flèches du clavier	<i>EV :</i> 5' avec stéréoscopie (C-S) et 5' sans (C_NS) (aléatoire)	Sujets sains  2 éliminés car n'ont pas suivi instructions	traitées, si ce n'est que Range SSQ (-235,62, 235,62)  Pas d'effet de la stéréoscopie sur cybercinétose (SSQ score C-NS=-0,57 ± 17.95 C-S=2,4 ± 13.04)	FC (C-N) : 71,04 ± 6.96 FC (C-NS) : 75,41 ± 13.04 FC (C-S) : 75,14 ± 7.18  Augmentation significative de FC dans les conditions « parler en public », mais pas de différence significative entre NSC et SC	
Dennison <i>et al.</i> (2016)	<i>Visualisation :</i> Écran FOV : 60°H 40°V 1920x1280, 60Hz  Casque OR DK2 FOV: 100°H 100°V, 960x1080, 75 Hz	<i>Baseline :</i> Image statique de l'EV  <i>EV :</i> Navigation libre dans un jeu Half Life	<i>Baseline :</i> 2' par condition (Casque vs Ecran)  <i>EV :</i> 10' par condition (Casque vs Ecran)	20 (14H et 6F) $\mu = Nd ; >18$ ans  Sujets sains, avec expérience jeux vidéo  <b>11 abandons</b> avec casque	Effet Display et Temps =>cybercinétoseV-Casque> cybercinétoseV-Ecran =>si Casque cybercinétoseV-10'>cybercinétoseV-2' =>si Ecran cybercinétose V faible	Effet Display =>Tachygastrie** Casque>Ecran =>Bradygastrie** Casque<Ecran =>Clignements yeux Casque>Ecran =>Conductance doigt Casque<Ecran =>Fréquence Cardiaque Casque>Ecran =>Fréquence Respiratoire Casque<Ecran  Effet Temps	Corrélations significatives entre =>Bradygastrie et SSQ score de cybercinétose et Désorientation =>Clignements et SSQ score Oculomoteur =>MSSQA et SSQ score Oculomoteur =>MSSQA et sortie précoce de l'EV  Estimation de =>SSQ cybercinétose Score par bradygastrie et respiration (37,4 %)

Étude	Dispositifs	Contenu	Temps exposition	Effectif + âge ( $\mu$ , range) + arrêts ou abandons	Effet mesuré sur cybercinétose	Effet mesuré sur physiologie	Lien entre physiologie et cybercinétose
	<p><i>Interaction :</i> Xbox controller</p> <p><i>Audio :</i> -</p>			<p>(1 sur 2-4', 5 sur 4-6', 5 sur 6-8') =&gt; 55 %</p> <p>Analyses sur 9</p>	<p>=&gt;baisse cybercinétose V au repos</p> <p>Post SSQ Casque &gt;&gt;Ecran</p> <p>Si casque, 11 abandons dus à MS (cybercinétoseV = 3)</p>	<p>=&gt;EGC variable</p> <p>=&gt;Augmentation de : Clignements, Conductance doigt, Fréquence Cardiaque, Fréquence Respiratoire</p> <p>Pas d'effet sur le pouls</p> <p>Rotations de la tête</p> <p>=&gt;Yaw et Pitch Casque&gt;Ecran</p> <p>** Très Significatif</p>	<p>=&gt;SSQ Nausée faiblement par bradygastrie et respiration (20,1 %)</p> <p>=&gt;SSQ Oculomoteur par Clignements, amplitude Pouls, Respiration et MSSQA (74.7 %)</p> <p>=&gt;SSQ Désorientation par ondes lentes estomac et respiration (34.9 %)</p> <p>Modèle basé sur 9 sujets et sur (EEG, GSR, EOG, PPG, ECG et respiration) sur période 4-6' :</p> <p>=&gt;Prédit 77,8 % appartenance (Casque ou Ecran)</p>
Russel <i>et al.</i> , (2014)	<p><i>Visualisation :</i> Casque de RV Pas autre info</p> <p><i>Interaction :</i> -</p> <p><i>Audio :</i> Ecouteurs</p>	<p><i>Baseline :</i> -</p> <p><i>EV :</i> Observation d'une vidéo de mer très agitée</p>	<p><i>Baseline :</i> 7'</p> <p><i>EV :</i> 10'</p>	<p>60 (12H + 48F) <math>\mu = 19</math> ; Nd</p> <p>Sujets sains avec susceptibilité cybercinétose</p> <p>Répartis en : =&gt;G-DBC : Diaphragmatic</p>	<p>Pas de différence significative entre groupes sur âge, MMSQ, SES sur baseline</p> <p>Après expé VR :</p> <p>MSAQ post et SRS plus bas pour G-DBC</p>	<p>Pas de différence significative entre groupes sur baseline</p> <p>Fréq. Resp : DBC :14,9 et CC : 13,9</p> <p>Fréq. Cardi. : DBC :72,4 et CC : 75,8</p> <p>VFC : DBC :4,7 et CC :5,2</p> <p>Différence significative pendant expérience VR sur</p> <p>Fréq. Resp : DBC :11,38 et CC : 16,21</p> <p>VFC : DBC :7,46 et CC :6,38</p>	<p>Pendant expérience VR, le G-DBC a montré</p> <p>=&gt;moins de symptômes de MS que le G-CC, =&gt;Fréquence Respiratoire DBC &lt; FR CC</p> <p>Pour G-DBC corrélation positive significative entre Fréquence Respiratoire et SRS (évaluation MS).</p>

Étude	Dispositifs	Contenu	Temps exposition	Effectif + âge ( $\mu$ , <i>range</i> ) + arrêts ou abandons	Effet mesuré sur cybercinétose	Effet mesuré sur physiologie	Lien entre physiologie et cybercinétose
				Breathing Condition =>G-CC : Control Condition			

## Annexe 4 : Conditions d'exposition dans les études portant sur la stabilité posturale

Tableau 30 : Détail des conditions d'exposition à la réalité virtuelle des différentes études retenues.

Dispositifs d'affichage	Modalités d'interaction	Effet sur la cybercinétose	Effet sur la posture	Matériel	Tâche, contenu et conditions	Population N (hommes + femmes) âge	Temps d'exposition	Auteurs
Écran	Observation d'un flux visuel	Oui	Oui	Projecteur LCD 1280 x 800 px ; 60 hz  Ecran 4 x1,6 m  FOV : 60 x 26°	Observation d'un flux visuel (nuage de points en 3D) figurant un déplacement propre à vitesse constante  2 conditions : flux radial ou oscillant  Position assise	23 (7+16)  22,9 ± 6 ans	5 essais de 30 sec par condition	Palmisano <i>et al.</i> , (2018)
	Manette	Oui	Oui	Écran CRT de 66 cm de diagonale  FOV : 60 x 48°  Manette de jeu	Jeu Xbox <i>Pure</i> (course de quad)  Position debout	24 adultes (12+12)  23 ans (18-27 ans)  25 enfants (12+13)  11 ans (10-12 ans)	50 min	Chang <i>et al.</i> , (2012)
		Oui	Oui	Écran Plasma de 1,65 m de diagonale  FOV : 60x48°  Manette de jeu	Jeu Xbox <i>Forza Motosport 2</i>  2 conditions : joueur ou observateur  Position assise	26 (11+15)  23 ± 7 ans	40 min	Dong <i>et al.</i> , (2011)
	Tapis de marche	Non	Oui	Ecran incurvé 180°  Tapis roulant intégré à une plateforme dynamique à 6 DDL	Marche naturelle en ligne droite dans un environnement rural	30 militaires (28+2)  29 ± 6 ans	45 min	Sinitski <i>et al.</i> , (2018)

Dispositifs d'affichage	Modalités d'interaction	Effet sur la cybercinétose	Effet sur la posture	Matériel	Tâche, contenu et conditions	Population N (hommes + femmes) âge	Temps d'exposition	Auteurs
Visiocasque	Observation d'un flux visuel	Oui	Non	<i>Oculus Rift DK2</i> FOV : 100 x 100	Observation d'un nuage de points en rotation  Conditions : 6 vitesses de rotation, 2 directions, et 2 positions (assis puis debout)	15 (11+4)  Plus de 18 ans	4 essais de 30 sec par condition (48 min au total)	Dennison & D'Zurma (2017)
	Interaction par les mouvements de tête	Oui	Oui	<i>Oculus Rift DK2</i> FOV : 100 x 100°	Jeu <i>Balancer Rift</i> , consistant à manipuler un plateau par l'intermédiaire des mouvements de la tête pour déplacer une bille dans un labyrinthe  Position assise	36 (18+18)  21 ± 1 an	15 min	Munafo <i>et al.</i> , Etude 1 (2017)
		Oui	Oui	Casque <i>Oculus DK1</i> FOV : 110° diagonale	Immersion dans un nuage de points en 3D  Tâche de mouvements de tête autour de l'axe Z  2 conditions : écologique (scène défile en sens opposé à la tête) et non écologique (scène défile dans le même sens que la tête)  Position assise	20 (6+14)  28 ± 10 ans	5 essais de 1 min par condition	Arcioni <i>et al.</i> , (2019)
	Manette	Oui	Oui	NVisor SX FOV : 47 x 35° Manette de jeu	Navigation (jeu <i>Quake III</i> ) dans le but de retrouver des cibles  4 conditions de contrôle : rotations et translations, rotations uniquement, direction du regard, aucun contrôle (observation)	28 (20+8), mais 32 initialement (4 abandons)  30 ± 7 ans	8 min par condition	Conradi & Alexander (2012)
Oui		Non	<i>Oculus Rift DK2</i> FOV : 100 x 100° Ecran à LED	Navigation dans une station spatiale pour retrouver des cibles	20 (15+5)  Entre 18 et 60 ans	10 min par condition	Dennison & D'Zurma (2018)	

Dispositifs d'affichage	Modalités d'interaction	Effet sur la cybercinétose	Effet sur la posture	Matériel	Tâche, contenu et conditions	Population N (hommes + femmes) âge	Temps d'exposition	Auteurs
				FOV : 60 x 40° Manette de jeu	Conditions : Casque et écran avec perturbation visuelle, casque sans perturbation visuelle			
		Oui	Oui	<i>Oculus Rift DK2</i> FOV : 100x100° Manette de jeu	Navigation (jeu <i>Affected</i> , consistant à se déplacer dans un bâtiment pour rejoindre un point final  Position assise	36 (18+18) 23 ± 3 ans	15 min	Munafo <i>et al.</i> , Etude 2 (2017)
		Oui	Oui	<i>NVisor SX</i> FOV : 47 x 35° Manette de jeu	Navigation par groupe de 4 dans un bâtiment, armé d'un fusil factice, afin de sécuriser 15 salles consécutives  Conditions : en virtuel et en réel (4 salles seulement à sécuriser)  Position debout	24 militaires en virtuel Entre 18 et 23 ans  24 militaires en réel Entre 18 et 25 ans	Exercice d'évacuation répété 20 fois	Walker <i>et al.</i> , (2010)
	Autres métaphores d'interaction	Oui	Non	<i>Oculus Rift CV1</i> avec chaise pivotante, fauteuil roulant et manette de jeu  <i>HTC Vive</i> avec tapis omnidirectionnel	Navigation dans un bâtiment  4 modalités de contrôle du déplacement dans la scène  Position assise ou debout	20 (10+10) 23 ± 3 ans	8 essais par condition	Aldaba <i>et al.</i> , (2017)
	Tapis de marche	Non	Non	<i>Oculus Rift DK2</i> FOV : 100 x 100° Tapis roulant unidirectionnel	Marche en ligne droite à vitesse préférentielle (préréglée), dans un environnement urbain	11 jeunes sains (5+6) 28 ± 7 ans  11 âgés sains (3+8) 66 ± 3 ans  11 âgés parkinsoniens (3+8) 65 ± 7 ans	4 sessions de 5 min	Kim <i>et al.</i> , (2017)

## **Annexe 5: Résultats des mesures sur les rayonnements émis par des visiocasques**

Le rapport du CSTB présentant les résultats des mesures sur les rayonnements émis par des visiocasques est disponible sur le site internet de l'agence

## Notes

---



# anses

**CONNAÎTRE, ÉVALUER, PROTÉGER**

AGENCE NATIONALE DE SÉCURITÉ SANITAIRE  
de l'alimentation, de l'environnement et du travail

14 rue Pierre et Marie Curie 94701 Maisons-Alfort Cedex  
Tél : 01 42 76 40 40  
[www.anses.fr](http://www.anses.fr) — @Anses\_fr