



HAL
open science

Virtualia 2016. La réalité virtuelle au service de la recherche

Sophie Madeleine

► **To cite this version:**

Sophie Madeleine. Virtualia 2016. La réalité virtuelle au service de la recherche. Séminaire : Virtualia 2016, la réalité virtuelle au service de la recherche, Oct 2016, Caen, France. 92 p., 2018. hal-01760241

HAL Id: hal-01760241

<https://hal.science/hal-01760241v1>

Submitted on 15 May 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Virtualia 2016

La réalité virtuelle au service de la recherche

*Actes du séminaire organisé par le CIREVE à Caen (19 octobre 2016),
Publiés sous la direction de Sophie MADELEINE*

2018

- CIREVE -

CENTRE INTERDISCIPLINAIRE DE RÉALITÉ VIRTUELLE

UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE

Table des matières

S. Madeleine, <i>Virtualia 2016. Introduction</i>	3
J. Griefu, F. Lecroq, Th. Galinho, H. Boukachour, <i>Environnements industriels virtualisés et processus d'apprentissage</i>	5
Ph. Brunet, J. Dehut, <i>Images 3D et humanités numériques : modélisation et restitution du geste théâtral</i>	15
G. Lecouvey, J. Gonneaud, N. Legrand, G. Rauchs, F. Eustache, B. Desgranges, <i>Réalité virtuelle et mémoire</i>	22
N. Benguigui, C. Mandil, M. Mallek, L. Lejeune, R. Thouvarecq, <i>Étude des liens entre perception et action dans des environnements virtuels</i>	37
E.-G. Dupuy, A. Maneuvrier, E. Vlamynck, S. Besnard, B. Bienvenu, L.-M. Decker, <i>Le syndrome d'Ehlers-Danlos type hypermobile : évolution des stratégies posturales en réponse à un programme de rééducation à visée somesthésique</i>	52
C. Weismann-Arcache, <i>Réalité virtuelle et humain augmenté : subjectivation, désobjectivation ?</i>	67
L. Haddouk, <i>Réalité psychique en visioconsultation</i>	75
Résumés	85
Biographies	88

Virtualia 2016 ***Introduction***

Sophie Madeleine

Université de Caen Normandie
Ingénieur de recherche au Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle (CIREVE)

Le séminaire *Virtualia* est né en 2006 en même temps que le Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle (CIREVE) de l'Université de Caen Normandie. Son objectif est de permettre aux équipes associées au CIREVE d'exposer leurs méthodologies et les résultats de leurs travaux dans le domaine de la Réalité Virtuelle, tout en s'ouvrant à des communications extérieures. Il a connu quatre éditions de 2006 à 2009¹.

2016 fut l'occasion de relancer VIRTUALIA et de concrétiser le partenariat avec les Universités de Rouen et du Havre dans le cadre de la COMUE. Une Structure Fédérative de Recherche « CIREVE » est en effet en cours de labellisation au sein de Normandie Université. 2016 est également une année importante car elle marque à la fois le dixième anniversaire du CIREVE et la finalisation d'une plate-forme de réalité virtuelle normande, unique en son genre sur le territoire français. Elle est composée d'une salle immersive quatre faces de 45 m², équipée d'un tapis roulant particulièrement adapté pour l'analyse de la marche en temps réel (GRAIL de Motek Medical). Les calculateurs de cette salle immersive sont mutualisés avec un amphithéâtre attenant de 150 places, de manière que les expérimentations effectuées avec un sujet unique dans la salle immersive puissent être suivies par un auditoire nombreux (besoins de formation notamment). Les équipes utilisent le matériel au fur et à mesure des développements informatiques et de nouveaux protocoles d'expérimentation germent dans l'esprit des chercheurs qui voient dans la réalité virtuelle des possibilités de tests jamais atteintes.

Une centaine de chercheurs utilise régulièrement le plateau technique CIREVE, dans des visées de recherche qui leur sont propres. Il est toutefois apparu qu'un certain nombre de problématiques concernaient toutes les disciplines et qu'une partie de la réflexion sur les mondes virtuels pouvait être mutualisée. Le séminaire VIRTUALIA permet d'offrir un espace de rencontre à ces chercheurs, issus d'horizons différents, pour discuter de l'utilisation de l'outil d'un point de vue épistémologique. Il est par exemple capital de s'interroger sur la notion de présence. Le sujet se comporte-t-il de la même façon dans l'environnement virtuel et dans le monde réel ? Les chemins de circulation choisis dans le modèle virtuel sont-ils les mêmes que ceux qui seraient empruntés en réalité ? Les conclusions établies dans le modèle virtuel sont-elles directement transposables à la réalité ? Un des enjeux du travail est d'évaluer la

¹ voir http://www.unicaen.fr/cireve/CIREVE_manifestations.php?fichier=colloque2011

pertinence subjective des modèles virtuels, ce qui est capital avant de généraliser leur utilisation dans des actions de formation par exemple. L'utilisation d'une technologie n'est jamais complètement neutre. Dans le cadre des mondes virtuels, l'interaction de l'homme avec le monde de synthèse n'est possible qu'au travers de logiciels et d'interfaces matérielles. Il faut s'assurer que les processus cognitifs soient adéquats avant de s'interroger sur le résultat des simulations. Naturellement, le séminaire permet également à chaque discipline d'exposer les résultats des dernières recherches réalisées grâce à la réalité virtuelle.

Les domaines scientifiques concernés par la réalité virtuelle sont multiples : les civilisations et les patrimoines culturels, la médecine, les neurosciences, la psychologie, les sciences du mouvement et du sport, l'ingénierie, l'informatique. L'Université de Caen Normandie étant pluridisciplinaire, le spectre des utilisations est très large. Elles se répartissent en trois axes principaux et un axe en émergence :

LA REPRÉSENTATION : la réalité virtuelle permet de représenter et de visualiser, interactivement et en trois dimensions, des environnements disparus, dégradés, inaccessibles, ou des environnements futurs.

Domaines concernés : civilisations, patrimoine, linguistique...

L'EXPÉRIMENTATION : en permettant d'interagir en temps réel avec un monde numérique 3D, la réalité virtuelle offre de nouvelles perspectives d'expérimentations dans des environnements de plus en plus proches du réel et en même temps parfaitement contrôlables.

Domaines concernés : santé, neuropsychologie, psychologie, activités physiques et sportives...

LA CREATION ET LE DEVELOPPEMENT D'OUTILS : les informaticiens créent et testent des applications concernant les méthodes de navigation en monde virtuel, de restitution de la réalité.

Domaine concerné : informatique.

LA FORMATION (axe en émergence) : par la représentation de la connaissance, par les diverses possibilités d'expérimentation, la réalité virtuelle est un formidable outil de formation.

Domaines concernés : sciences du langage, médecine, informatique (serious game, simulation...).

Une partie importante de la réflexion développée lors du séminaire Virtualia 2016 a été consacrée aux enjeux sociétaux liés à la réalité virtuelle : notions de mémoire, d'apprentissage des gestes techniques, d'être humain « augmenté » etc. Les articles publiés attestent du savoir-faire, bien réel cette fois, que le CIREVE a acquis en termes de création de mondes virtuels pour représenter, expérimenter et former. La publication des actes du séminaire Virtualia vise à mettre en lumière des recherches particulièrement innovantes qui s'effectuent dans un cadre technologique exceptionnel.

Environnements Industriels Virtualisés et Processus d'Apprentissage

Jean Grieu, Florence Lecroq, Thierry Galinho et Hadhoum Boukachour

Université du Havre

Laboratoire d'Informatique, de Traitement de l'Information et des Systèmes (LITIS)

Introduction et contexte :

Les technologies des environnements virtuels (réalité virtuelle, augmentée, 3D,...) ne cessent d'offrir de nouveaux outils pour mieux comprendre les systèmes complexes qui nous entourent dans tous les domaines, notamment dans les activités industrielles.

La montée en puissance des réseaux de communication, la large diffusion des tablettes et des téléphones portables de dernière génération, permettent d'appréhender l'apprentissage sur de nouveaux supports avec de nouvelles méthodes pédagogiques. En pratique, un utilisateur, ou un groupe d'utilisateurs, peut s'immerger dans un environnement virtuel via un outil de visualisation adapté au contexte pédagogique comme un écran d'ordinateur, un écran de projection ou un casque de réalité virtuelle.

En effet, nous utilisons aujourd'hui ces dispositifs pour modéliser des systèmes industriels à des fins d'apprentissage ou d'aide à la décision. Ce nouveau thème de recherche résulte de la rencontre de deux équipes multidisciplinaires de chercheurs au sein de l'université du Havre, l'une s'intéressant à l'aide à la décision et à la prévention des risques industriels, l'autre travaillant sur l'utilisation des technologies des jeux vidéo 3D appliquée à l'apprentissage.

I - Prévention des risques

A - Systèmes d'aide à la décision fondés sur le raisonnement par analogie

Nos recherches se situent dans le cadre des systèmes d'aide à la décision (figure 1) qui doivent permettre de représenter, de suivre et d'analyser l'évolution d'une situation.

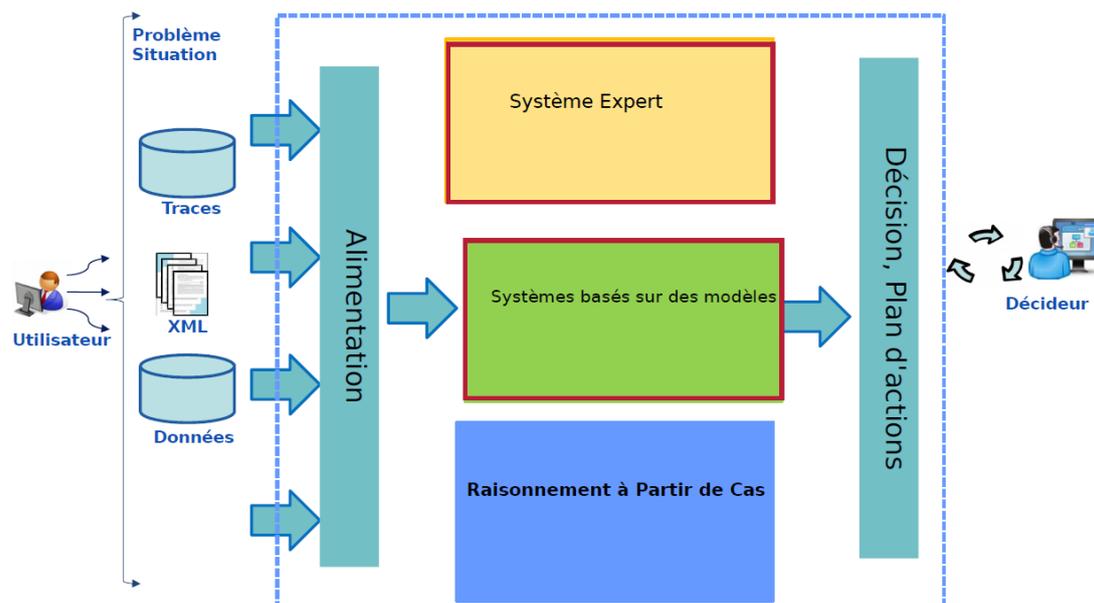


Fig.1 : Représentation d'un système d'aide à la décision

Un tel système permet de représenter la situation observée mais aussi son évaluation. Il est possible d'évaluer la situation en déterminant les conséquences potentielles qu'elle est susceptible d'engendrer. L'ensemble du processus peut être mené en s'appuyant sur des situations antérieures dont on connaît les conséquences. Il s'agit alors d'utiliser un raisonnement par analogie reposant sur l'hypothèse suivante : si une situation A ressemble à une situation B, alors il est probable que les conséquences de la situation A soient similaires à celles de la situation B.

Le Raisonnement à Partir de Cas (RàPC)¹ est une méthodologie de résolution de problèmes s'appuyant sur la réutilisation des expériences passées pour résoudre de nouveaux problèmes. L'aide à la décision est un des domaines d'application les plus prometteurs du RàPC. Il permet de mettre en synergie la capacité de résolution de problème de l'homme avec celle du système informatique. Les mémoires de l'un et de l'autre se renforcent mutuellement pour participer à la résolution du problème.

Le RàPC est un mode de raisonnement s'appuyant sur une base de cas, un cas étant la donnée d'un problème et d'une solution de ce problème. Le problème à résoudre est appelé « cas cible » et les cas déjà résolus sont appelés « cas sources ». Le RàPC se fonde sur un cycle de cinq étapes (figure 2).

¹ Kolodner 1993.

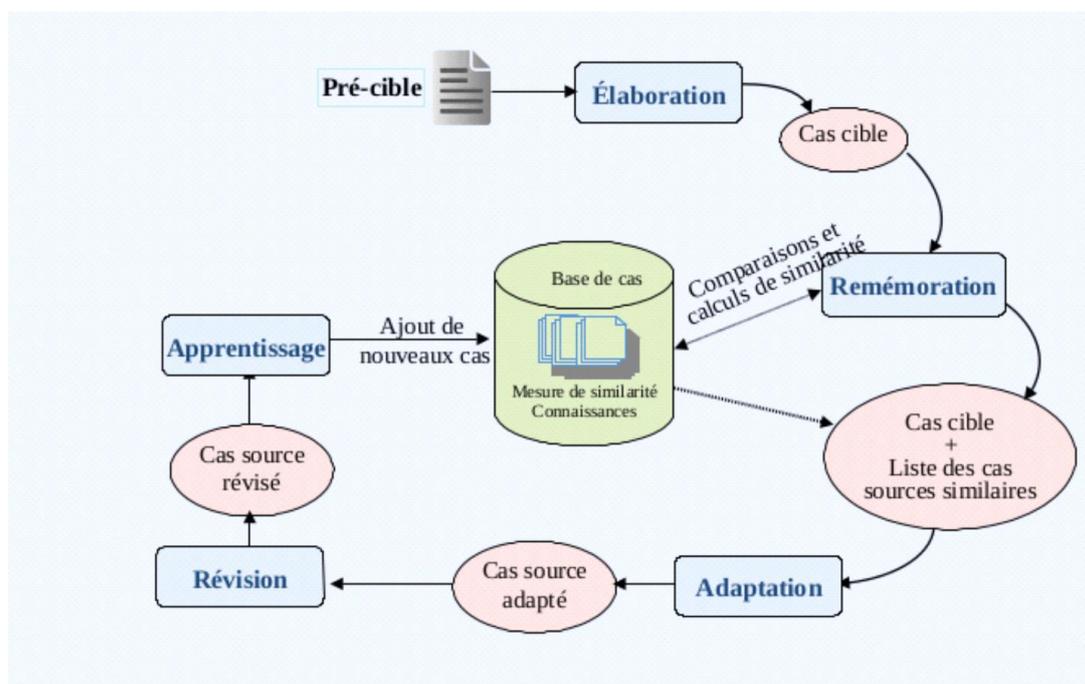


Fig. 2 : Le cycle du Raisonnement à Partir de Cas avec ses cinq étapes (élaboration, remémoration, adaptation, révision et apprentissage)

On distingue les différents types de RàPC suivants :

- cas cible statique et cycle statique,
- cas cible dynamique et cycle statique,
- cas cible dynamique et cycle dynamique.

La situation suivie fait état d'un nombre important de paramètres dynamiques, autrement dit des paramètres qui varient au cours du temps. Les systèmes permettant la gestion de ces situations doivent donc être dynamiques afin de pouvoir rendre compte des changements dans la description de celle-ci, provoqués par son évolution dans le temps. Cela nécessite un système capable de se reconfigurer quand cela est nécessaire, bénéficiant donc d'une architecture suffisamment souple et adaptative.

La complexité de cette catégorie de systèmes, qui se traduit par le nombre important de données à manipuler et la dynamique de la situation à traiter, nous a conduits à choisir les systèmes multi-agent pour la modélisation².

B - Rôle du système multi-Agent

Donnons d'abord une définition succincte de ce qu'est un SMA (Système Multi-agent) :

C'est un système constitué d'agents. Le plus souvent, un agent est un processus informatique (les agents peuvent être distribués sur plusieurs machines³, mais cela peut être également un robot, un humain, etc... Un agent est une entité adaptative, autonome, capable de communication et d'action⁴.

² Jennings 1998.

³ Moulin 1996.

⁴ Ferber 1995 et Wooldridge 2002.

Le SMA initial a été prévu comme un système de veille préventive. L'objectif d'un tel système est de surveiller de façon permanente l'état courant des zones industrielles à risque, appelé situation courante (ou cas cible dans le cas du RàPC), afin de permettre aux décideurs d'avoir le plus tôt possible des informations sur le risque potentiel engendré par cette situation courante⁵.

II - Un campus virtuel pour l'enseignement des sciences & techniques

La désaffection des étudiants pour les sciences de l'ingénieur nous oblige à repenser nos méthodes d'enseignement pour les inciter à revenir vers nos formations. C'est dans cet esprit que nous avons pensé la création d'une plate-forme pédagogique en ligne.

Il existe de nombreux systèmes d'enseignement à distance à travers le monde. Mais ces plate-formes conventionnelles s'adressent à des étudiants habitués à travailler seuls. Après avoir étudié les résultats d'interviews menées auprès de nos étudiants, nous avons développé GE3D⁶, une plate-forme pour l'enseignement à distance, en accord avec leurs souhaits et nos critères. Même si notre solution utilise certains éléments provenant des jeux en 3D, c'est toujours un outil pédagogique. Nous utilisons une solution hybride, compromis entre 3D temps réel et 3D pré calculée, ce qui nous permet de tirer avantage des deux modes de génération d'images de synthèse. GE3D est un outil multi-utilisateur, avec une technologie synchrone, c'est-à-dire que toute action d'un utilisateur dans le monde virtuel sera perçue au même moment par les autres utilisateurs de la plate-forme.

Le choix d'un campus virtuel plutôt que d'une plate-forme traditionnelle d'enseignement à distance a été évident pour les étudiants du département Génie Électrique et Informatique Industrielle de l'IUT du Havre. Cette génération d'utilisateurs, les « e-natives », a en effet adopté depuis longtemps les technologies utilisées dans les jeux vidéo.

Les choix techniques ont été faits en respectant les spécifications suivantes :

- technologie web 3D fluide ;
- technologie *open source* pour nous permettre d'effectuer nos propres développements ;
- une plate-forme avec une architecture client-serveur ;
- côté client : système économe en ressources matériel et réseau ;
- son de qualité numérique.

Nous décrivons l'utilisation de cet espace virtuel pour un cours sur les automates programmables.

Le scénario pédagogique typique d'un cours sur les automates industriels se déroule de la manière suivante :

⁵ Boukachour 2002.

⁶ Grieu 2010.

- un rendez-vous est donné à tous les étudiants dans l'amphithéâtre (fig. 3) ;

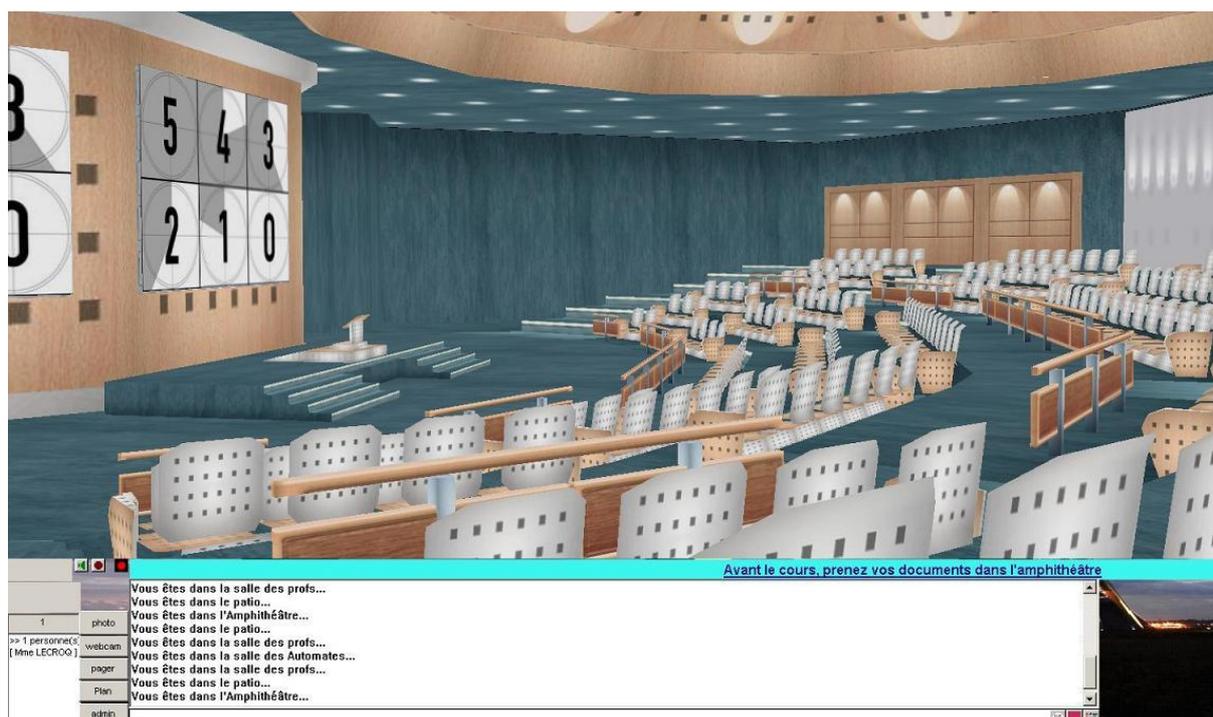


Fig. 3 : L'amphithéâtre dans le campus virtuel GE3D

- avant d'accéder à la salle de cours, les étudiants téléchargent un polycopié à trous qu'ils devront remplir durant le cours ;
- pendant la présentation, l'enseignant peut utiliser l'écran pour afficher des diapositives ou des vidéos. Il peut également utiliser le tableau blanc ainsi qu'un microphone pour la partie audio. En même temps, les étudiants complètent leur polycopié à trous et posent des questions à l'aide du *chat* public si nécessaire ;
- après le cours, les étudiants remplissent un questionnaire à choix multiples en ligne. En cas de succès, ils peuvent accéder à la salle d'exercices. Sinon, ils repassent leur questionnaire dans une salle virtuelle d'examen ;
- dans la salle d'exercices, le professeur donne des exercices et les étudiants proposent leur solution à l'aide du tableau blanc (fig. 4);

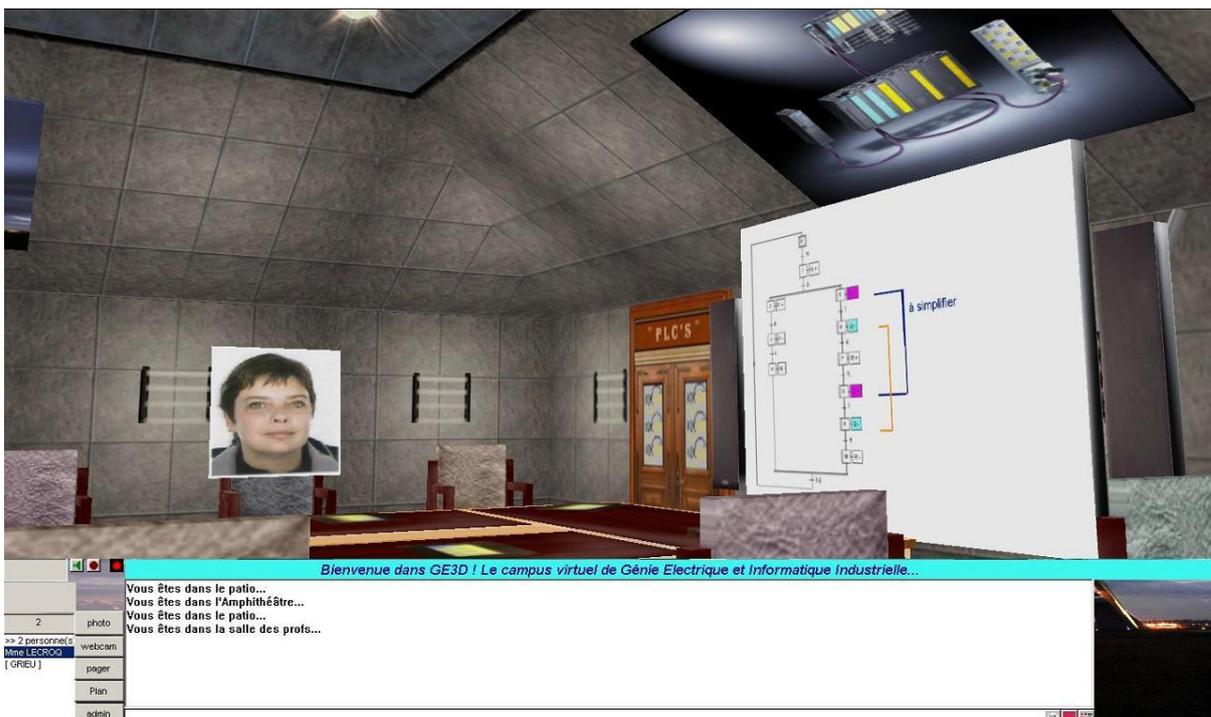


Fig. 4 : La salle d'entraînement aux exercices avec le tableau blanc interactif

- lorsque tous les exercices sont terminés, tout le monde accède à la salle industrielle. Ici, le professeur montre comment fonctionnent les équipements et reste présent pour répondre aux éventuelles questions (fig. 5) ;



Fig. 5 : La salle de travaux pratiques avec des étudiants

- lorsque les étudiants ont réussi tous les exercices, ils peuvent télécharger les cahiers des charges des processus industriels décrits dans les différentes vidéos disponibles dans la salle (fig. 6);



Fig. 6 : La mezzanine de la salle de travaux pratiques avec ses cahiers des charges des parties opératives

- après avoir préparé leur programme, les étudiants retrouvent l'enseignant dans la salle des automates réels pour valider leur solution (fig. 7).



Fig. 7 : Le simulateur de partie opérative piloté par un API (automate programmé industriel)

III - ITS (Intelligent Tutoring System) module d'IA (Intelligence Artificielle) dans GE3D

Pour le prototypage, le SMA a été appliqué à la prévention du décrochage de l'apprenant à distance. Il s'agit dans ce cas de prévenir le risque d'abandon. Les adaptations suivantes visent à individualiser le parcours de l'apprenant, notamment dans un environnement virtuel 3D. On parle alors d'ITS (Intelligent Tutoring System). Le résultat combinant les travaux sur le campus virtuel 3D, le système de RàPC (ou Case Based Reasoning CBR) et le SMA (Multi Agent System ou MAS) est illustré par la figure suivante :

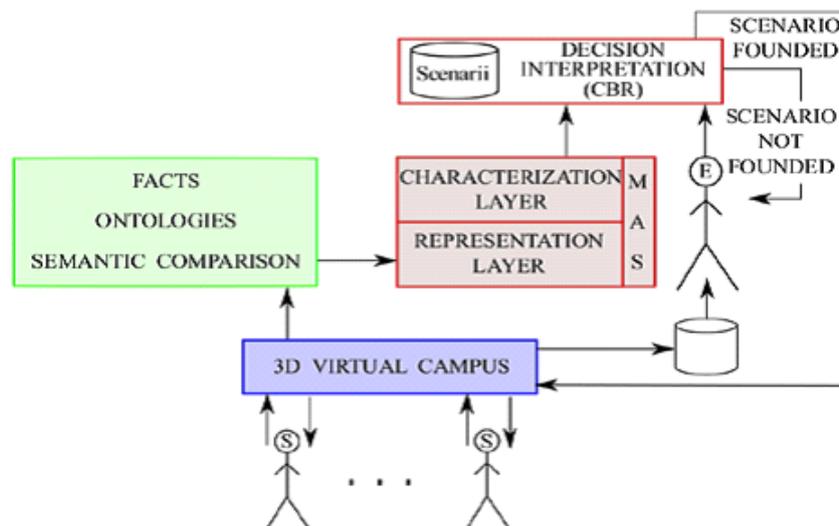


Fig. 8 : L'intégration de l'ITS dans le campus virtuel

Dans ce système⁷, nous retrouvons le moteur SMA générique (indépendant du domaine), la partie connaissance (en vert) permettant de spécifier le domaine, et enfin la partie d'immersion 3D forcément dépendante de l'environnement. On peut noter que l'humain intervient dans le processus de décision (dans certains cas) comme prévu par le paradigme du RàPC.

Conclusion et perspectives

À l'heure de la quatrième révolution industrielle, les automates programmables industriels (API) ont une place de plus en plus importante au sein de l'industrie 4.0. En effet, l'ensemble des éléments des parties opératives doivent communiquer leurs données via les réseaux industriels aux API et autres appareils de supervision.

De plus, l'industrie 4.0 intègre la simulation 3D. Avant de réaliser une pièce, un moteur, un convoyeur, voire même une usine, les décideurs étudient les résultats obtenus avec des simulateurs, pour ensuite valider leurs créations.

C'est dans le cadre de l'enseignement de cette spécialité (API) que la virtualisation des processus industriels apporte toute sa spécificité et son efficacité :

- tout d'abord, par son coût : en effet, l'acquisition d'une partie opérative réelle, constituée de vérins, de moteurs, de capteurs et autres actionneurs, représente une

⁷ Person 2012.

dépense hautement prohibitive pour un centre de formation, alors que la virtualisation, par son moindre coût, permet d'obtenir de nombreuses parties opératives copiables à l'infini ;

- ensuite, pour la sécurité : une partie opérative industrielle virtualisée sera aisément mise en route par un apprenant qui n'aura rien à craindre des fausses manœuvres pour sa sécurité et celle des équipements ;
- enfin, pour le réalisme : la simulation du processus industriel permet aux étudiants d'observer immédiatement l'action de leur programme. Précédemment, leur attention n'était que toute relative face à une diode qui s'allumait pour représenter la mise en route d'un convoyeur. Aujourd'hui, lorsque leur programme est validé sur le simulateur, ils sont fiers de leur travail et d'autant plus impliqués pour le réaliser.

Cependant, à l'heure actuelle, nous pouvons citer quelques inconvénients liés à l'utilisation de ces technologies :

- la modélisation ad hoc d'objets en 3D reste une activité très chronophage ;
- les casques d'immersion proposés actuellement sont encore lourds et peuvent provoquer des nausées ;
- le choix et la conception des interfaces permettant les interactions demeurent des verrous technologiques à lever ;
- le manque de maturité d'un apprenant peut engendrer une confusion entre virtualité et réalité.

Le 13 octobre 2016, a été inauguré le Pôle Ingénieur et Logistique (PIL) au Havre. Cette structure accueille notre cellule « Immersion 3D » qui sert d'appui au développement d'applications de simulation de processus industriels et d'apprentissage des métiers de la logistique (projet CLASSE 2 du GRR LMN). Les réalisations en cours portent essentiellement sur le pilotage d'installations industrielles virtualisées par des Automates Programmables Industriels (figure 7). Par la suite, nous envisageons l'analyse comportementale des apprenants grâce à des capteurs (« Eyetracking » et casque « EEG (ElectroEncéphaloGraphie) ») et la conception d'Interfaces Homme-Machine adaptées ».

Nous pouvons espérer que les techniques de traitement de données massives, les « Big Data », nous permettront de mieux cerner les comportements des apprenants en personnalisant leur parcours pédagogique afin de réduire les risques d'abandon.

Enfin, les technologies 3D nous ont montré leur utilité dans la compréhension des systèmes complexes. En ce sens, elles participent déjà à la démarche de simplicité qui consiste à concevoir des interfaces simples, intuitives et ergonomiques pour l'aide à la décision dans des univers de plus en plus complexes.

Remerciements :

Ces travaux sont en partie financés dans le cadre du contrat FEDER (Fonds Européens de Développement Régional) CLASSE (Corridor Logistique Application à la vallée de la Seine et à son Environnement) Action 5.5 (Modèles Multi-échelles de corridors logistiques : modélisation, simulation et optimisation).



Ce projet est cofinancé par l'Union européenne.
L'Europe s'engage en Normandie
avec le Fonds européen de Développement Régional (FEDER)



Bibliographie :

- Boukachour H. (2002), *Système de veille préventive pour la gestion de situation d'urgence : modélisation par organisations d'agents. Application aux risques industriels*, Thèse de Doctorat en Informatique, LITIS, Université du Havre, France.
- Ferber J. (1995), *Les systèmes multi-agents*, Paris, InterEditions.
- Grieu J., Lecroq F., Person P., Galinho T., Boukachour H. (2010), « A virtual campus for technology-enhanced learning », in *Education Engineering (EDUCON) IEEE 2010*, Madrid, IEEE Publisher, p. 725-730.
- Jennings N., Wooldridge M., Sycara K. (1998), « A roadmap of agent research and development », in *Autonomous Agent and Multi-Agent Systems*, 1(5), p. 7-38.
- Kolodner J. (1993), *Case-based reasoning* », San Mateo CA, Morgan Kaufman.
- Moulin B., Chaib-draa B. (1996), « An Overview of Distributed Artificial Intelligence, Foundations of Distributed Artificial Intelligence », in *Foundations of distributed artificial intelligence*, New York, John Wiley & Sons Editor, p. 3-55.
- Person P., Galinho T., Lecroq F., Boukachour H., Grieu J. (2012), « Intelligent Tutor Design for a 3D Virtual Campus », In *Proceedings of the 6th IEEE International Conference Intelligent Systems (IS12)*, Sofia, p. 74-79.
- Wooldridge M. (2002), *An Introduction to Multiagent Systems*, New York, John Wiley & Sons Editor.

Images 3D et humanités numériques : modélisation et restitution du geste théâtral

Ph. Brunet, J. Dehut

Université de Rouen

Équipe de Recherche Interdisciplinaire sur les Aires Culturelles (ERAC - EA 4705)

Non fuit in solo Roma peracta die. Non, Rome ne s'est pas faite en un jour comme le rappelle la célèbre maxime¹. Nous avons cependant accompli un certain chemin en quelques mois, depuis qu'à l'issue d'une rencontre informelle est né le désir de partager des expériences autour de la restitution du geste théâtral antique, de sa modélisation et de la reconstitution virtuelle de Rome². Voici donc quelques étapes et réflexions d'un projet en cours qui appartient au champ des humanités numériques, humanités numériques prises ici dans leur acception la plus restreinte puisqu'il s'agit d'une interdisciplinarité entre les humanités, et plus particulièrement l'Antiquité grecque, et le numérique.

L'une des caractéristiques de cette métadiscipline que deviennent les humanités numériques réside dans son apport au sujet des questions de la visualisation des données et de la modélisation³. Une modélisation qui s'entend ici comme un moyen « d'acquérir des connaissances par la production de représentations »⁴. Passé ce double constat, celui d'un intérêt commun pour le sujet et celui de la préexistence d'un champ disciplinaire ou épistémologique, reste une question cardinale, celle de la méthode la plus idoine pour nous permettre de restituer le geste théâtral antique en trois dimensions. La modélisation s'appuie ici en amont sur les recherches entreprises par Philippe Brunet et la compagnie Démodocos qui ont constitué une somme de connaissances, le produit d'une recherche de vingt ans, formalisé notamment dans le spectacle vivant et aboutissant depuis quelque temps à la réalisation de films.

En quoi a consisté ce travail préalable sur le mouvement et le geste ?

Le travail sur la gestuelle antique a commencé dans les années 1996-1997 dans un atelier-théâtre à l'université François Rabelais de Tours. À partir de l'iconographie antique et de la statuaire, l'imagination corporelle des jeunes acteurs a pu se nourrir, et enrichir ainsi l'interprétation des textes antiques. Cette interprétation des textes d'Homère ou d'Eschyle a privilégié, à partir de l'enseignement du regretté professeur Stephen Daitz, une restitution de la phonétique, de l'intonation autant que de la scansion. Autrement dit, la mise en mouvement était conditionnée dès le commencement par des lois rythmiques mises en œuvre par les

1. Pour une analyse philologique de cet adage médiéval : Tosi 2010, 949-950.

2. Nous tenons à remercier chaleureusement Philippe Fleury et toute l'équipe du CIREVE, tant pour leur invitation que pour leur accueil.

3. Cette question de la modélisation dans les humanités numériques est bien traitée. Nous renvoyons ici à Mccarty 2005, 20-72 pour une approche problématisée.

4. Cette définition que nous traduisons et tronquons est celle qu'en donne Ciula & Eide 2016, 2. Sur la question de la méta-discipline : McCarthy 2016, 75 sq. Sur la question de la visualisation : Drucker 2011.

poètes grecs (anapestes de marche ou dactyles, strophes iambo-trochaïques, etc). Le travail sur la gestuelle a démarré sur les textes d'Homère et notamment de Catulle en 1998 (*Pleurs d'Ariane*) dans le champ épique et sur les drames d'Eschyle (*A quand Agamemnon ?* en 1997, *Orestie* en 1998). Une proposition chorégraphique a été faite pour l'ensemble des chœurs des *Perses* dès 2001. Ajoutons que le travail s'est fait aussi bien sur la langue ancienne que sur la langue de traduction, pourvu que la traduction permît la restitution des mètres originaux. Cette démarche a généré la naissance d'une gestuelle, d'un code de signes, très nécessaires dans le cas du théâtre masqué des Grecs. L'aboutissement de ce code a été la création d'une quasi langue commune en 2014 pour le cycle thébain d'*Œdipe roi* et des *Sept contre Thèbes*, augmenté des *Bacchantes* et d'*Antigone*. Le travail gestuel s'est trouvé particulièrement bien représenté par certains comédiens, comme Susie Vusbaumer, qui mène actuellement un doctorat sur les gestes du masque⁵, et qui est dans la compagnie depuis 1998.

Le travail métrique proprement dit a bénéficié des logiciels de Gilles de Rosny (sur homeros.fr) et des apports plus traditionnels de la recherche académique.

Le travail chorégraphique a connu à partir des années 2011 une systématisation permise par la découverte d'un principe d'alternance des pieds sis au sein même de l'organisation métrique des vers : rôles de Créon en 2008 et de Cassandre en 2010, dont les dochmies furent interprétés par Philippe Brunet, qui a transmis ce principe de jeu à Fantine Cavé-Radet pour son rôle d'Antigone, puis aux comédiens de la troupe Démodocos, et notamment Daniel Rasson qui a ainsi interprété l'ensemble des chœurs d'*Agamemnon*. En 2012, la pièce des *Bacchantes* a pu se monter avec des chœurs intégralement chorégraphiés selon ce principe de danse inhérent à la métrique, notamment dans les dimètres ioniques mineurs et leur variante anacréontique, anaclastique, ou syncopée. Ce principe de jeu a été confirmé par les acteurs comiques d'*Amphitryon* en 2013, puis par ceux d'*Œdipe roi* et des *Sept contre Thèbes* sur une musique de François Cam et une chorégraphie de Fantine Cavé-Radet en 2014. La même expérience a été étendue aux textes lyriques : le *Pythique* de Pindare, avec musique reconstituée par F. Cam, et partitions anciennes des *Hymnes de Delphes* et de l'*Hymne au Soleil* de Mésomède. Pour ces chorégraphies mises en place par Fantine Cavé-Radet, une écriture a été proposée, un système de notation qui accompagne le schéma métrique.

Ces expériences de mise en jeu ont fait l'objet de captations, voire de films en voie d'achèvement⁶. Le geste théâtral capté quitte la réalité scénique éphémère au profit d'une permanence plastique qui ne garde de sa réalité première que la forme. Ce geste appelle une nouvelle écriture, qui, pour l'instant, se cherche dans le rapprochement de plans souvent difficiles à raccorder : images de captation tournées pendant une ou plusieurs représentations, images secondairement tournées. Un intérêt naît même de l'hétérogénéité assumée du grain, de la lumière, des variations dans le jeu. Le lissage virtuel, de ce point de vue, est-il un avantage ? Néanmoins la tentation était grande de proposer des modèles chorégraphiques, même si parfois l'acteur a du mal à laisser son avatar vivre sa vie loin de lui ; c'est là qu'a

5. Codirection Philippe Brunet (univ. de Rouen) et Guy Freixe (univ. de Franche-Comté).

6. *Chronique d'un chœur à l'été 2016*, dvd 23', Théâtre Démodocos 2017 ; *Les Bacchantes, récit d'une capture*, long métrage (1h53) par le Théâtre Démodocos, présenté à l'Accattone le 29 mars 2017, Dionysies 2017.

commencé la collaboration avec Julien Dehut, qui, dans sa recherche doctorale sur les humanités numériques, est parti en quête d'une méthode qu'il a, pour commencer, expérimentée sur lui-même.

La question de la réalisation d'un modèle sur ordinateur pourrait sembler insurmontable d'un point de vue technique. Aucun membre de notre groupe de recherche n'est en effet informaticien. Aussi, nous allons présenter rapidement la solution que nous avons mise en place, avant d'évoquer les premières interrogations que soulève notre modèle. La situation de l'informatique au sein de notre société a beaucoup évolué depuis le milieu des années 90⁷. Il nous semble évident que sans l'existence de projets pionniers et pilotes tel que celui de la Rome virtuelle⁸, nous n'aurions pas été capables d'avancer sur cette question. Le numérique, en progressant dans la place qu'il occupe dans notre société, renforce une dimension pharmacologique qui lui est inhérente⁹. Le numérique est à la fois un remède et un poison. Du côté du poison, *panem et circenses*, il faudrait procéder avec prudence, mais une partie des productions de l'industrie du divertissement pourrait sans doute se ranger sous cette catégorie ; et parmi ces produits, certains jeux vidéo et certains films. Or, ces deux médias (films et jeux vidéo) se sont considérablement développés en nombre de productions par an, concurremment avec le développement du numérique¹⁰. Corollairement à ce développement, les outils pour les produire sont devenus plus accessibles, à la fois en termes de coût et de facilité d'utilisation. Il est ainsi désormais possible d'utiliser ces technologies avec pour finalité de mener des recherches, c'est-à-dire de produire de la connaissance, et donc d'être plutôt du côté du remède que du poison.

Le système que nous avons mis en place utilise des caméras conçues initialement pour des consoles de jeux et nous permet de capturer le mouvement d'un acteur¹¹. Les caméras, reliées à un ordinateur, filment ensemble un sujet. Elles sont très précisément situées dans l'espace les unes par rapport aux autres. Après cette captation, un traitement est appliqué de manière logicielle, notamment une détection de contours¹². Cette procédure permet d'isoler un squelette qui comprend le mouvement numérisé de l'acteur. Il nous est alors possible de transférer ce squelette à des polygones et donc d'animer un avatar selon les mouvements de

7. Sur l'évolution de l'informatique : Ceruzzi 2003. Sur l'enjeu de la distinction entre numérique et informatique : Doueïhi 2013, 8-12.

8. Pour une perspective spécifique aux humanités numériques sur la question des mondes virtuels : Johanson 2016, 111-126.

9. Sur cette question, nous suivons la thèse de Stiegler 2007, 27-54.

10. Ce point mériterait à lui seul une étude. A titre de comparaison, le catalogue BNF recense depuis 1992 les productions de jeux vidéo. Ce catalogue compte 62 occurrences pour les années 70 à 90, 250 pour la dizaine suivante, et 1117 pour l'intervalle 2000-2010. Ce catalogue est basé uniquement sur des produits physiques (CD-ROM par exemple). Or, la production de jeux vidéo s'est dématérialisée avec internet, ce qui est un des facteurs de son élargissement en termes de nombres d'acteurs. Il faudrait ajouter de surcroît la scène du jeu vidéo indépendant. Le site <http://www.indiedb.com/> compte 16610 jeux indépendants sortis depuis fin 2005, c'est-à-dire pratiquement la totalité du catalogue de la BNF.

11. Il s'agit de caméras Playstation Eye.

12. Cette détection de contour est basée sur les travaux de Marr & Hildreth 1980 et s'appuie sur des recherches sur la vision. Pour une perspective épistémologique la détection de contours : Shagrir 2010.

cet acteur. L'avantage de ce dispositif, en dehors de son coût¹³, réside dans sa transportabilité. Le lieu premier de ces reconstitutions est en effet le théâtre. Il nous est donc possible de capturer les mouvements en représentation. Un autre avantage de ce dispositif réside dans le fait qu'il permet de capturer trois acteurs simultanément, ce qui en représente le nombre maximum sur scène depuis Sophocle, en dehors du chœur.

Une fois cette capture réalisée, dès avant sa projection sur un corps virtuel, se pose alors pour notre modèle une première question qui est celle du réalisme. Le réalisme est central dans l'expérience de la virtualité¹⁴. Ce que l'on montre doit être convaincant. Et notre conviction est emportée, ou non, à travers notre perception¹⁵. Or, ramenée à notre tentative de modélisation, la question du réalisme pose une série d'interrogations en cascade. Le premier questionnement réside dans le fait qu'aucun œil vivant n'est encore là pour nous dire si la reconstitution que nous proposerons sera convaincante. Plus personne n'a vu jouer les *Perses* d'Eschyle comme la pièce a été jouée à Athènes en 472 a.C., peu de temps après les guerres médiques¹⁶. Nous devons d'abord reconstituer les données à partir de la philologie, de l'iconographie, de l'archéologie avant de réussir à produire un modèle synthétique. L'absence de point de comparaison pourrait alors paraître confortable : l'expérience contemporaine d'être spectateur d'une pièce antique ne sera-t-elle pas jugée réaliste, car elle ne connaît pas de point de comparaison chez ce spectateur ? Au contraire, cette perspective nous oblige à la vigilance envers le moindre détail. Le champ du théâtre grec se révèle ainsi être composé de nombreux sous-champs essentiels à notre modélisation : les costumes, qui ne sont pas les tenues habituelles¹⁷, ou les masques que l'on connaît seulement de manière indirecte, notamment avec le fonds de Lipari¹⁸.

Ces problématiques sont déjà celles du spectacle vivant, mais elles nous semblent démultipliées par les possibilités qu'offre le numérique notamment à travers la question de ce corps que l'on met en scène. Le corps que l'on nous montre dans la statuaire représente un corps idéalisé, qui ne constitue donc pas le corps réel en jeu dans le théâtre¹⁹. Ce constat nous renvoie avec acuité au corps d'aujourd'hui qui constitue notre référentiel commun. Or, nous avons la possibilité de modéliser n'importe quel corps : un corps idéal, un corps contemporain, ou un corps antique probable, comme celui que tentent de retrouver certains travaux d'anthropologie historique²⁰. D'autre part, dans le cadre du théâtre grec, tous les rôles, même féminins, sont joués par des hommes. Faut-il donc montrer un homme costumé en femme ? Serait-ce là le plus réaliste ? Serait-ce là l'expérience la plus à même de favoriser l'immersion du spectateur ? À terme, même si nous visons une représentation dans un théâtre

13. Le prix unitaire de la caméra est d'environ 10 euros, nous en avons utilisé quatre pour cet essai, sur seize possibles.

14. Nous suivons ici Gelin 2006.

15. Pour une approche philosophique et notamment phénoménologique de ces enjeux : Boyer 2015.

16. Sur le contexte de la pièce : Brunet 2002.

17. Pour toutes ces questions, Athénée de Naucratis dans *Les Deipnosophistes* est une source inestimable.

18. Bernabò Brea 1981.

19. Sur ce point : Gombrich 2006, 85.

20. Porter 1999 constitue un bon point de départ pour l'étude de cette question. Pour un bilan historiographique : Gherchanoc 2015. Sur la question du corps et du costume dans le théâtre grec, par exemple : Piqueux 2015. Sur la question du mouvement dans le théâtre : Capponi 2015. Sur les spécificités de la représentation masculine : Bologne 2011.

romain virtuel, la réponse pourrait être que, comme le théâtre grec est joué avec des masques, cela importerait peu. Or du point de vue de notre modélisation, la question du sexe de notre avatar s'est révélée être lourde de conséquences.

Le vraisemblable que produit un moteur 3D, comme le CryEngine ou Unity, est fondé notamment sur le respect de la physique. Une physique est jugée réaliste si, lorsqu'un événement se produit, la chute d'un arbre par exemple, celui-ci se comporte de manière prévisible et attendue dans le cadre de nos conditions terrestres. La chute de l'arbre, comme le bruit que produit celui-ci en tombant, sont programmés pour être en conformité avec notre expérience du réel²¹. Dans la réalité, le réel peut cependant nous surprendre. Si une tasse de café en céramique tombe sur le sol, peut-être serons-nous étonnés de l'étendue ou de la position des débris, qui peuvent parfois atterrir dans des endroits incongrus, ou de la façon dont le liquide s'est dispersé sur le sol. Sur ce point il est rare d'être surpris dans les simulations. Une physique bien gérée est au contraire programmée pour ne pas nous surprendre. Cependant un moteur de rendu en trois dimensions peut lui aussi nous étonner et produire des erreurs, sans doute excusables au vu de la quantité de polygones qu'il doit gérer²². De son point de vue, il n'y a pas forcément de différence ontologique entre un avatar et un mur. Et lorsqu'un personnage traverse une paroi, cela ne lui pose aucun problème. Évidemment, de notre point de vue, quelque chose du vraisemblable se trouve remis en cause dans notre expérience. Ces bugs de collision sont rentrés dans le champ du possible de tous ceux qui utilisent un moteur 3D aujourd'hui. Et ils sont parfois si fréquents qu'ils participent de l'expérience de l'utilisateur, au même titre que les conditions environnementales.

Ce hiatus est bien mis en scène dans notre première simulation. Il s'agit de la projection d'un mouvement capturé depuis un homme vers une femme modélisée en trois dimensions. Tant que le modèle était un homme, nous n'avons pas vu le problème. Mais il y a des différences anatomiques qui étaient prévisibles et que nous n'avons pas anticipées. Notamment la taille des hanches. Dans cet exemple, la physique est bonne, mais les mains traversent les hanches sans aucune gêne apparente. Et comme justement la physique est bonne, une fois habillée, habits dont le mouvement est calculé en temps réel dans la simulation, notre avatar déchire progressivement ses vêtements. C'est la raison pour laquelle nous la présentons dévêtue. Ce que nous mesurons dans cet échec n'est cependant pas imputable au moteur, mais à l'altérité. En remettant en cause les principes de Polyclète sur la proportion du corps, nous pourrions élargir les épaules et réduire les hanches par exemple. Du point de vue de l'animation, cela résoudrait une partie du problème, mais pas du point de vue du réalisme. Il nous faudra donc tenir compte dans la captation du mouvement de l'altérité qui se joue avec notre modèle, ou modéliser un corps aux proportions similaires à celui de

21. Nous faisons ici référence à l'expérience de pensée de Georges Berkeley (apocryphe) et qui pose la question du bruit que fait un arbre en tombant, lorsque personne n'est présent pour l'entendre (sans doute extrapolée depuis son *Traité des principes de la connaissance humaine*, Berkeley 1985, 330-341). La réponse pour Berkeley est que l'arbre ne fait pas le même bruit. Une réponse qui diffère beaucoup de celle qu'apporte la physique restituée des moteurs 3D...

22. En ce sens, nous nous savons destinés inexorablement à faire de la retopologie sur notre modèle afin d'en diminuer le nombre de polygones. Nous devons tenir compte de ce point si nous souhaitons l'intégrer dans un ensemble plus vaste qui demande lui aussi du temps de calcul. A cette fin de perception de ces enjeux spécifiques, nous avons développé un avatar moins complexe qui évolue dans une application multi-support en temps réel.

l'acteur ou actrice. Ce sont là les prémices d'une recherche en cours pour laquelle nous avons encore beaucoup à apprendre et à faire.

Bibliographie

- Barba E. et Savarese N. (2008), *L'énergie qui danse. Un dictionnaire d'anthropologie théâtrale*, Paris, L'Entretemps, 2^e édition.
- Berkeley G. (1985), *Œuvres*, 1, Paris, PUF.
- Bernabò Brea L. (1981), *Menandro e il teatro greco nelle terracotte liparesi*, Genova, Sagep.
- Bologne J.-C. (2011), *Histoire de la coquetterie masculine*, Paris, Perrin.
- Boyer E. (2015), *Le conflit des perceptions*, Paris, MF.
- Brunet Ph. (2002), *Eschyle, Les Perses*, Paris, Les Belles Lettres, p. VIII-XX.
- Brunet Ph. (2011), « L'acteur qui marche : une passerelle entre la tragédie grecque et le nô », in *Identités métisses*, Paris, L'Harmattan, p. 149-153.
- Brunet Ph. (2012), « La voix et le geste au pouls de la Muse », *Approches*, n°150, p.141-154.
- Brunet Ph. (2012), « Mètre et danse : pour une interprétation chorégraphique des mètres grecs », *Poesia, musica e agoni nella Grecia antica*, Atti del IV convegno di MOISA, Lecce 28-30 octobre 2010, p. 557-571.
- Brunet Ph. (2013), « Les *Bacchantes* d'Euripide, une expérience de dramaturgie dionysiaque », in *Tragique et comique liés, dans le théâtre, de l'Antiquité à nos jours (du texte à la mise en scène)*, in Actes du colloque organisé à l'Université de Rouen en avril 2012 : éd. M. Torres et A. Ferry, Publications numériques du CEREdI, p. 1-17.
- Brunet Ph. (2014), « La philologie à l'épreuve de la scène : métrique et chorégraphie du grec ancien », *Revista do Programa de Pós-graduação em Arte da UnB*, V.13 n° 2, p. 36-46.
- Brunet Ph. (à paraître), « Interactions voix-geste-instrument dans la poésie et le théâtre grecs » in *Corps et voix dans les danses grecques antiques*.
- Capponi M. (2015), « Langage du corps, corps du langage : ce qu'il advient du geste dans le texte théâtral », in *Langages et métaphores du corps dans le monde antique*, V. Dasen et J. Wilgaux (dir.), Rennes, Presses universitaires de Rennes, p. 119-130.
- Ceruzzi P.E. (2003), *A History of Modern Computing*, Cambridge, MIT Press, p. 307-344.
- Ciula A. et Eide Ø. (2017), « Modelling digital humanities: Signs in context », *Digital Scholarship Humanities*, 32, 1, p. 33-46.
- Doueïhi M. (2013), *Qu'est ce que le numérique ?*, Paris, PUF.
- Drucker J. (2011), « Humanities Approaches to Graphical Display », *Digital Humanities Quarterly*, 5, 1.
- Gelin R. (2006), *Comment la réalité peut-elle être virtuelle ?* Paris, Le Pommier.
- Gherchanoc F. (2015), « L'histoire du corps dans l'Antiquité : bilan historiographique », *Dialogues d'histoire ancienne*, supp. 14, p. 9-18.

- Gombrich E. (2006), *Histoire de l'art*. Paris, Phaidon Press Ltd.
- Johanson C. (2016), « Making virtual worlds » in *A new companion to digital humanities*, S. Schreibman, R. Siemens *et al.*, Malden, Blackwell, p. 111-126.
- Marr D. et Hildreth E. (1980), « Theory of Edge Detection ». *Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, 1167, p. 187-217.
- McCarty W. (2016), « Becoming interdisciplinary », in *A new companion to digital humanities*, S. Schreibman, R. Siemens *et al.*, Malden, Blackwell, p. 75 sq.
- McCarty W. (2005), *Humanities Computing*, Basingstoke, Palgrave Macmillan.
- Piqueux A. (2015), « Rembourrages et image du corps dans la comédie ancienne et moyenne : témoignages archéologiques et textes comiques » in *Penser et représenter le corps dans l'Antiquité*, F. Prost et J. Wilgaux (dir.), Rennes, Presses universitaires de Rennes, p. 133-150.
- Porter J. (1999), *Constructions of the Classical Body*, Ann Arbor, University of Michigan Press.
- Schreckenberg H. (1960), *ΔPAMA, Vom Werden der griechischen Tragödie aus dem Tanz. Eine philologische Untersuchung*, Würzburg, Verlag Antike.
- Shagrir O. (2010), « Marr on Computational-Level Theories », *Philosophy of Science*, 77, 4, p. 477-500.
- Stiegler B. (2007), « Questions de pharmacologie générale. Il n'y a pas de simple *pharmakon* », *Psychotropes*, 13, 3, p. 27-54.
- Tosi R. (2010), *Dictionnaire des sentences latines et grecques*, Grenoble, Million.

Réalité virtuelle et mémoire

**Grégory Lecouvey, Julie Gonneaud, Nicolas Legrand, Géraldine Rauchs,
Francis Eustache et Béatrice Desgranges**

**Université de Caen Normandie, EPHE, INSERM, U1077, CHU de Caen,
Neuropsychologie et Imagerie de la Mémoire Humaine, 14000 Caen, France**

Introduction

Les chercheurs en neuropsychologie ont développé une grande variété d'outils permettant d'évaluer le fonctionnement cognitif. Les plus récents présentent le double avantage de reposer sur un cadre théorique et d'être standardisés et normés. Toutefois, généralement proposés sous un format papier/crayon, ils ont tendance à appréhender le fonctionnement cognitif de manière parcellaire et leur validité écologique, ou capacité à prédire le comportement des individus en situation réelle, est également remise en cause¹. Les neuropsychologues ont proposé plusieurs solutions pour accroître la validité écologique des épreuves en développant des épreuves qualifiées de semi-écologiques telles que le *Behavioural Assessment of the Dysexecutive Syndrome* (BADS²) ou le *Rivermead Behavioural Memory Test*³, ou en proposant une adaptation informatisée de tests classiques⁴. Plus récemment, des épreuves d'un nouveau genre reposant sur la réalité virtuelle ont fait leur apparition principalement dans le cadre de recherches. Le but de cet article est de présenter les améliorations que la réalité virtuelle est susceptible d'apporter aux évaluations neuropsychologiques classiques et de fournir des exemples d'applications dans le domaine de la mémoire épisodique, et notamment de la mémoire prospective⁵.

1. La mémoire épisodique

L'évaluation et la réhabilitation de la mémoire épisodique « classique » occupent une place prépondérante en neuropsychologie. Son évaluation classique à partir de tests papier/crayon ne permet pas d'appréhender la complexité de son fonctionnement ce qui a conduit certains chercheurs à employer la réalité virtuelle afin de construire des épreuves plus proches de son fonctionnement au quotidien. A titre d'exemple, R.-J. Matheis et ses collègues⁶ ont proposé une épreuve en réalité virtuelle afin d'évaluer les capacités d'apprentissage de 20 patients traumatisés crâniens en comparaison à 20 sujets témoins. Les participants étaient immergés

¹ Rizzo *et al.* 2004.

² Wilson *et al.* 1996.

³ Wilson *et al.* 1985.

⁴ Reeves *et al.* 2007.

⁵ Voir Lecouvey *et al.* (sous presse a) pour des exemples dans d'autres domaines.

⁶ Matheis *et al.* 2007.

dans un bureau virtuel grâce à un visiocasque et devaient mémoriser 16 objets ainsi que leur localisation dans l'environnement. Il leur était ensuite demandé de rappeler librement les items puis de reconnaître leur localisation spatiale dans l'environnement après 30 minutes. Les patients incapables d'apprendre initialement les 16 items rappelaient moins efficacement ces items et leur localisation spatiale que les sujets sains et les autres patients. La corrélation retrouvée entre le rappel des items et le rappel à long terme des 16 mots du *California Verbal Learning Test* (test classique de mémoire épisodique) suggère une bonne validité constructive de l'épreuve. Toutefois, puisque ces deux scores n'étaient pas parfaitement corrélés, les auteurs ont supposé que ces deux tests apportaient des informations complémentaires, prédictives de la performance des sujets en situation réelle. G. Plancher et ses collègues⁷ ont évalué la mémoire épisodique de façon encore plus complexe, en différenciant le rappel des composantes factuelles et spatio-temporelles, ainsi que la capacité à associer ces éléments (i.e. *binding*). Des sujets jeunes et âgés étaient invités à conduire dans un environnement urbain inspiré des rues parisiennes. De manière intéressante, les sujets âgés étaient moins efficaces que les sujets jeunes pour le rappel des informations spatiales et temporelles (éléments rarement évalués par les épreuves classiques) alors qu'ils rappelaient autant d'éléments factuels. En proposant la même épreuve à des patients avec troubles cognitifs légers (ou *Mild Cognitive Impairment*) et des patients souffrant de la maladie d'Alzheimer, les chercheurs ont montré que les scores recueillis, notamment le score relatif à la composante spatiale, permettaient de discriminer des sujets âgés sains des patients avec troubles cognitifs légers et des patients Alzheimer⁸. Des résultats analogues ont été obtenus par une équipe de recherche de Bordeaux à partir d'une adaptation du *California Verbal Learning Test*, baptisée *Human Object Memory for Everyday Scenes* (HOMES⁹) permettant d'évaluer la mémoire d'objets issus de scènes domiciliaires. Les sujets étaient immergés dans deux versions d'un appartement virtuel constitué de quatre pièces (chambre, salle de bain, cuisine et salon) au sein duquel ils devaient mémoriser 40 items, parmi lesquels 20 étaient communs aux deux appartements. Une épreuve de rappel libre et de reconnaissance des items leur était ensuite proposée. A l'instar des résultats observés avec la version classique du test, les auteurs rapportent un rappel libre déficitaire mais une reconnaissance préservée chez les sujets âgés sains alors que les patients atteints de la maladie d'Alzheimer échouaient pour les deux types de rappel¹⁰.

Plusieurs recherches se sont enfin intéressées aux bases neurales des différentes composantes de la mémoire épisodique en utilisant la réalité virtuelle¹¹. N. Burgess et ses collègues¹² ont par exemple demandé à des sujets jeunes de se déplacer, grâce à un joystick, sur une route sur laquelle ils rencontraient plusieurs personnages tenant un objet entre les mains. Par la suite, les sujets étaient soumis à une épreuve en IRMf consistant à rappeler, au sein de l'environnement virtuel, chaque objet, sa localisation et le moment auquel ils l'avaient rencontré. Les auteurs ont mis en évidence l'implication spécifique de la région

⁷ Plancher *et al.* 2010.

⁸ Plancher *et al.* 2012.

⁹ Sauzéon *et al.* 2011.

¹⁰ Sauzéon *et al.* 2016.

¹¹ Burgess *et al.* 2002 ; Burgess *et al.* 2001; Rauchs *et al.* 2008.

¹² Burgess *et al.* 2001.

parahippocampique pour la récupération de la composante spatiale du souvenir alors que les régions préfrontales et pariétales étaient activées lors du rappel de la composante factuelle.

2 La mémoire prospective

2.1. Définition

La mémoire prospective (MP), définie comme la mémoire des intentions, permet le rappel de deux composantes : une composante prospective qui correspond au souvenir d'une intention au moment approprié, et une composante rétrospective qui correspond à l'action qui doit être réalisée¹³. L'intention est dite « *event-based* » (EB) lorsque sa récupération est déclenchée par l'apparition d'un indice dans l'environnement immédiat de l'individu et « *time-based* » (TB) lorsque l'action doit être réalisée à un horaire déterminé à l'avance. La MP est impliquée dans un large éventail d'activités de la vie quotidienne, des plus simples aux plus complexes. Elle est donc essentielle à l'autonomie des individus. Un déficit de MP peut avoir des répercussions sur le plan professionnel et social (e.g. oubli de rendez-vous, de tâches à réaliser), et en termes de sécurité (e.g. erreurs dans la prise de médicaments, oubli de fermer le gaz après avoir cuisiné). Elle reste aujourd'hui peu étudiée et rarement évaluée, notamment parce que peu d'outils sont disponibles. La complexité du fonctionnement de la MP et la difficulté à mettre au point des épreuves pour l'évaluer en font un candidat idéal à l'utilisation de la réalité virtuelle.

2.2. Évaluation de la mémoire prospective chez des sujets sains jeunes

La première étude de validation d'une technique proche de la RV pour évaluer la MP a été réalisée en 2001 par N. Titov et R.-G. Knight. Dans cette étude, les auteurs utilisaient une procédure nommée *Prospective Remembering Video Procedure*, qui consistait en la projection d'une vidéo qui montrait la perspective d'un individu marchant dans une rue. Alors que la vidéo défilait, les sujets devaient rappeler 21 intentions apprises antérieurement (e.g. acheter un Big Mac au McDonald's ou se renseigner sur les horaires d'ouverture de la compagnie d'assurance). La première expérience avait pour objectifs d'étudier l'effet de la familiarité de l'environnement et de valider la technique proposée. Pour le premier objectif, deux groupes étaient constitués : le premier groupe réalisait l'épreuve dans une partie familière de la ville, le second dans une partie non familière. Pour le second objectif, les performances à l'épreuve étaient comparées à celles qui étaient obtenues sur trois mesures de MP plus traditionnelles réalisées en milieu naturel : demander un questionnaire à l'expérimentateur, le renvoyer à une date précise et notifier la date de complétion. Les résultats montrent que la tâche du *Prospective Remembering Video Procedure* était mieux réussie dans l'environnement familier et qu'elle reflétait bien l'efficacité de la MP en milieu naturel. Dans une autre partie de l'étude, les auteurs ont comparé les performances d'un groupe d'étudiants à la *Prospective Remembering Video Procedure* et à une épreuve analogue réalisée cette fois-ci sur le terrain appelée *In vivo Prospective Memory Procedure*. Les corrélations positives retrouvées entre

¹³ Lecouvey *et al.* 2015a et 2015b.

les deux épreuves indiquent que la technique permettait de recueillir des mesures reflétant leurs capacités en situation réelle, cela malgré l'absence de liberté de déplacement dans l'environnement. Cette étude a ouvert la voie à des évaluations de la MP plus complexes et complètes que les évaluations classiques, développées au sein d'environnements virtuels plus élaborés et plus immersifs.

Dans une perspective fondamentale, G. Kalpouzos et ses collègues¹⁴ ont également utilisé la réalité virtuelle afin d'identifier les substrats cérébraux des étapes de la MP. Pour cela, des sujets jeunes devaient rappeler 22 actions prospectives EB dans un environnement virtuel urbain et familier au sein duquel ils pouvaient se déplacer grâce à un joystick. L'originalité de cette étude était de combiner la réalité virtuelle, l'IRMf, la technique *d'eye-tracking* et l'analyse d'un rapport verbal fourni par les sujets. Ces investigations ont permis de préciser les processus cognitifs en jeu lors du fonctionnement de la MP EB, selon un modèle baptisé PROMEDY (pour *PROspective MEmory DYnamic*). L'étude a également contribué à la description des réseaux cérébraux impliqués lors des différentes phases de la MP.

2.3. Études dans le vieillissement normal

Dans le vieillissement normal, les études traditionnelles mettent en évidence un phénomène particulièrement intéressant connu sous le nom de « *age prospective memory paradox* » ou effet paradoxal de l'âge sur la MP. Ce phénomène se manifeste par un bénéfice de performance lié à l'âge lorsque les tâches sont réalisées en milieu naturel alors qu'à l'inverse, les sujets jeunes sont plus performants que les sujets âgés pour les tâches de laboratoire¹⁵. Ce résultat laisse supposer que les épreuves de MP en milieu naturel et en laboratoire engagent des processus différents, même lorsque les tâches proposées sont semblables. Des épreuves plus complexes basées sur des techniques plus ou moins proches de la RV ont été proposées afin de mieux comprendre ce paradoxe.

Dans une première étude, K. Mc Dermott et R.-G. Knight¹⁶ ont montré, grâce à la *Prospective Remembering Video Procedure*, que des sujets âgés étaient moins efficaces que des sujets jeunes et des sujets d'âge intermédiaire pour rappeler le contenu de l'intention liée à l'indice prospectif (la composante rétrospective), alors même qu'ils repéraient ces indices prospectifs et se souvenaient de l'existence d'une intention aussi efficacement que les sujets d'âge intermédiaire (composante prospective). Dans une autre étude, R.-G. Knight et ses collègues¹⁷ ont utilisé une épreuve pour laquelle les sujets étaient invités à faire défiler les photographies d'une rue commerçante appelée « *The Virtual Street* ». L'environnement virtuel, présenté sur un ordinateur, était constitué de photos et de vidéos représentant une rue commerçante. Cette rue était scindée en deux zones dont le niveau de distraction différait. Plus précisément, dans la zone avec forte distraction, des vidéos de personnes se déplaçant dans la rue étaient superposées aux photos affichées. Au cours de l'épreuve, des sujets jeunes et âgés devaient se mettre dans la peau d'un inspecteur afin de i) vérifier si différents magasins d'alimentation étaient en règle, ii) rapporter la présence de chiens errants et iii) vérifier et

¹⁴ Kalpouzos *et al.* 2010.

¹⁵ Kvavilashvili *et al.* 2012 ; Niedźwieńska *et al.* 2012.

¹⁶ Mc Dermott & Knight 2004.

¹⁷ Knight *et al.* 2007.

surveiller les zones de chargement de véhicules de livraison. En parallèle, les sujets devaient réaliser une liste d'achats mais cette tâche n'était pas une tâche de MP puisque la liste était consultable à tout moment. Les auteurs ont montré globalement un déclin lié à l'âge pour l'ensemble des tâches à réaliser, plus important dans la condition avec forte distraction pour laquelle les sujets âgés avaient besoin de plus de temps pour réaliser les tâches. Ces résultats s'inscrivent dans la continuité des travaux de S. Farrimond¹⁸ qui avaient utilisé le même environnement au sein duquel les sujets devaient également effectuer une liste d'achats (tâche de MP EB). Les auteurs avaient montré que le nombre de présentations des intentions au moment de l'encodage (1 *versus* 3) influençait uniquement les performances de rappel de la composante rétrospective chez les sujets âgés. De manière intéressante, ces deux études mettent en évidence un effet délétère de l'âge sur la MP caractérisé par un rappel moins efficace de la composante rétrospective.

A l'instar de ces études et en réponse au problème posé par « l'effet paradoxal de l'âge sur la MP », nous¹⁹ avons proposé à un groupe de sujets sains, jeunes et âgés, une épreuve de MP dans un environnement virtuel représentant une ville virtuelle (figure 1) modélisée par le laboratoire « *Mémoire et Cognition* » de l'Université de Paris Descartes, et adaptée à l'évaluation de la MP. Les sujets se déplaçaient en voiture dans la ville grâce à un volant et deux pédales et devaient rappeler neuf intentions apprises antérieurement, dont six étaient de nature EB et trois TB. Pour les intentions EB, l'indice était soit fortement lié à l'action à réaliser (e.g. acheter un carnet de timbres à la poste), soit sans lien évident avec cette action (e.g. acheter des lunettes à la fontaine). Le but de cette étude était de déterminer si les performances des sujets âgés différaient de celles des sujets jeunes, et d'étudier l'effet de la force du lien entre l'indice et l'intention en condition EB. Enfin, grâce à une évaluation neuropsychologique complémentaire, nous voulions déterminer quelles fonctions cognitives contribuaient significativement aux effets de l'âge relevés sur la MP, le cas échéant. Nos résultats indiquent que les sujets âgés étaient moins efficaces pour le rappel des composantes prospective et rétrospective dans toutes les conditions. De plus, contrairement aux sujets jeunes qui obtenaient de meilleures performances en condition EB où l'indice et l'action étaient fortement liés par rapport aux deux autres conditions, aucun effet global de la nature de la tâche n'était observé chez les sujets âgés. En revanche, le rappel de la composante rétrospective était plus difficile que le rappel de la composante prospective pour les sujets âgés en condition EB avec lien faible et en TB, mais pas en condition EB avec lien fort. En d'autres termes, lorsque le lien était fort en EB, la détection de l'indice suffisait pour déclencher la récupération automatique de l'intention grâce aux processus réflexifs-associatifs peu coûteux sur le plan cognitif. En revanche, dans les deux autres conditions, le rappel de la composante rétrospective nécessitait l'implication de processus contrôlés et devenait plus difficile pour les sujets âgés. Ce résultat est cohérent avec les études présentées précédemment qui suggéraient que le rappel de la composante rétrospective était plus sensible aux effets de l'âge, tout au moins lorsque la force du lien entre l'indice et l'intention était faible. En outre, cette étude a montré que le déclin lié à l'âge du *binding* était le meilleur prédicteur du déclin de la MP au cours du vieillissement normal, reproduisant ainsi les résultats

¹⁸ S. Farrimond *et al.* 2006.

¹⁹ Lecouvey *et al.* sous presse b.

que nous avons obtenus précédemment avec une épreuve de MP de laboratoire²⁰. Enfin, les difficultés des sujets âgés pour le rappel des intentions EB avec lien faible étaient plutôt liées au déclin de la mémoire épisodique classique et des processus de planification alors que celles relatives au rappel des intentions TB étaient plutôt liées au déclin du processus de binding au cours du vieillissement. Enfin, d'une manière plus générale, il apparaissait que les difficultés des sujets âgés lors du rappel des intentions de nature différente reposaient d'une part sur l'altération de processus identiques, et d'autre part, des processus plus spécifiques à chaque type d'intentions.

De manière générale, ces études en réalité virtuelle sont en accord avec le déclin de MP observé au cours du vieillissement en laboratoire, mais s'opposent aux résultats relevés en milieu naturel, ce qui pourrait sembler paradoxal pour une technologie dont la vocation est de simuler des situations réalistes. Néanmoins, le bénéfice lié à l'âge en milieu naturel pourrait ne pas s'expliquer par un fonctionnement plus efficient de la MP *per se* mais par une compensation fonctionnelle des modifications cognitives qui apparaissent au cours du vieillissement, grâce notamment à l'utilisation d'aides externes et à une meilleure structuration et organisation des activités au quotidien, sur une échelle temporelle plus large qu'en laboratoire. La réalité virtuelle, en autorisant un contrôle expérimental de ces variables, permet de mesurer le fonctionnement de la MP avec plus de précision. Quant aux aspects motivationnels également évoqués pour expliquer ce résultat surprenant (i.e. moindre motivation des sujets jeunes en milieu naturel), ils n'ont pas fait l'objet d'études en réalité virtuelle mais il est plausible que le caractère ludique des épreuves proposées en réalité virtuelle stimule la motivation des sujets jeunes.

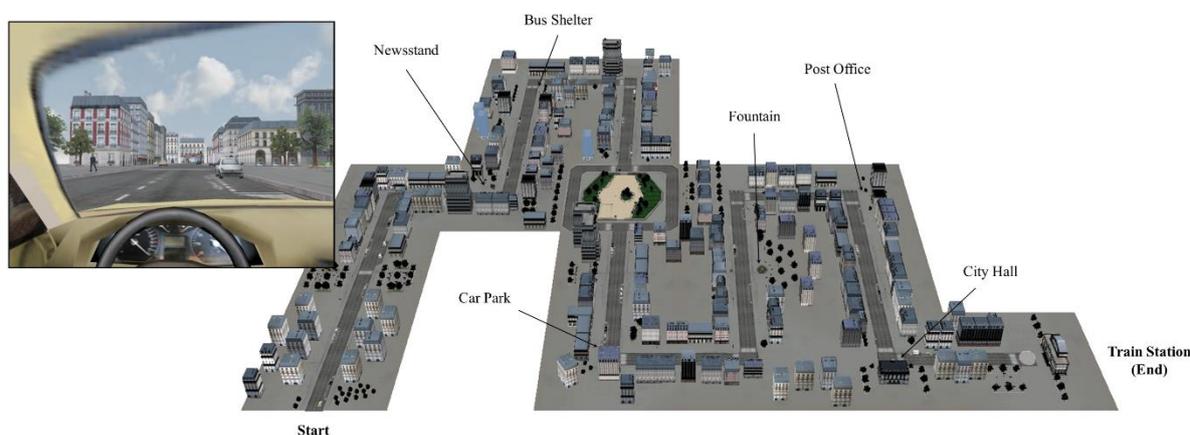


Fig. 1 : Modélisation en réalité virtuelle d'un quartier de Paris (à gauche) et de la carte montrant les indices prospectifs (à droite) (collaboration Laboratoire mémoire et Cognition, Université Paris Descartes, CIREVE de Caen et U 1077)

2.4 Étude de la mémoire prospective chez des patients cérébrolésés

Les études menées auprès de patients en réalité virtuelle ont pour objectif de mettre en évidence les capacités cognitives préservées et altérées et, le cas échéant, de mieux caractériser les déficits cognitifs et leurs répercussions fonctionnelles, afin d'envisager une

²⁰ Gonneaud *et al.* 2011.

prise en charge adaptée. Dans une étude de cas publiée en 2005, N. Titov et R.-G. Knight ont proposé une version proche de la « *Virtual Street* », décrite ci-dessus, à 3 patients victimes de lésions cérébrales à l'origine de déficits cognitifs légers, modérés ou sévères. Conformément à leurs attentes, chaque patient obtenait des performances inférieures au sujet sain apparié. De manière intéressante, les performances des patients étaient cohérentes avec leur plainte cognitive et avec les descriptions cliniques de leur entourage médical. Ce résultat démontre la sensibilité de l'épreuve et la possibilité de construire des tests standardisés, avec une validité écologique satisfaisante. Dans cette optique, B.-M. Brooks et ses collègues²¹ ont utilisé la réalité virtuelle auprès d'un groupe de patients traumatisés crâniens en comparaison à un groupe de sujets témoins. Les sujets participaient à un déménagement virtuel à l'intérieur d'un bungalow composé de quatre pièces. Ils pouvaient se déplacer dans l'environnement grâce à un joystick et manipuler les objets *via* une souris. Il leur était demandé i) de déplacer des objets d'une pièce à l'autre dans la nouvelle maison (tâche en cours), ii) d'étiqueter comme « fragiles » des objets en verre (condition EB), iii) d'ouvrir la porte aux déménageurs toutes les cinq minutes (condition TB), iv) de fermer la porte de la cuisine quand ils quittaient la pièce (condition AB). Des différences significatives ont été observées entre les performances des patients traumatisés crâniens et des sujets sains en faveur de ces derniers dans toutes les conditions, avec une majoration des différences en condition EB et AB. La sensibilité plus faible pour le rappel d'intentions TB s'explique probablement par l'utilisation d'un intervalle trop bref entre les différentes récupérations de l'intention qui permettait aux patients de maintenir l'intention en mémoire de manière consciente. En outre, l'épreuve proposée en réalité virtuelle était plus sensible à leurs déficits que le *Rivermead Behavioral Memory Test* comme le suggèrent leurs performances déficitaires sur une seule mesure de ce test. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par R. Morris et ses collègues²² avec la même épreuve proposée à des patients avec lésions neurochirurgicales focales localisées au niveau du lobe préfrontal. Cette étude suggérait que les patients utilisaient des stratégies peu adaptées, avaient tendance à rompre les règles plus fréquemment et commettaient plus d'erreurs prospectives. Des résultats analogues ont été retrouvés auprès de patients avec lésions cérébrales et présentant des troubles exécutifs au quotidien d'après leur entourage et leurs soignants²³. Ces trois études suggèrent une sensibilité satisfaisante de l'épreuve du bungalow virtuel pour détecter et caractériser les déficits de ce type de patients ainsi qu'une validité écologique satisfaisante. Enfin, aucune étude publiée à ce jour ne s'est intéressée à l'évaluation de la MP chez des patients souffrant de la maladie d'Alzheimer. Nous avons proposé une adaptation de l'épreuve utilisant la ville virtuelle à des patients à un stade léger et des patients à un stade modéré de la maladie²⁴. Les résultats de cette étude sont sans équivoque puisqu'ils montrent un déficit important de la MP dès le stade léger de la maladie d'Alzheimer avec une atteinte exacerbée du rappel de la composante rétrospective chez ces patients. En outre, contrairement à nos prédictions basées sur les résultats obtenus par des études fondées sur des épreuves de MP plus classiques, nos résultats indiquent que la MP continue de se dégrader avec l'évolution de la maladie jusqu'à atteindre un effet plancher particulièrement

²¹ Brooks *et al.* 2004.

²² Morris *et al.* 2002.

²³ Sweeney *et al.* 2010.

²⁴ Lecouvey *et al.* en préparation.

inquiétant pour les patients non institutionnalisés et vivant seuls à domicile. Enfin, d'un point de vue méthodologique, cette étude souligne que lorsque les outils numériques sont adaptés aux populations auxquelles ils sont adressés, ils sont particulièrement pertinents pour appréhender les modifications du fonctionnement cognitif et leurs répercussions fonctionnelles.

2.5. Effet du sommeil sur la MP : le Mémorial virtuel

Les effets bénéfiques du sommeil sur le renforcement et l'intégration des souvenirs récents ont été largement documentés ces dernières années²⁵. La consolidation de la mémoire épisodique bénéficie plus spécifiquement du sommeil lent, qui prédomine en début de nuit et que l'on distingue du sommeil paradoxal davantage présent en fin de nuit²⁶.

Ces premières études de l'effet du sommeil sur la mémoire humaine se sont essentiellement concentrées sur la consolidation de souvenirs rétrospectifs. Ce n'est que récemment que d'autres études ont investigué l'effet du sommeil sur la MP, d'abord chez le sujet sain jeune. La première étude réalisée dans ce domaine a montré que, si un intervalle de 12 heures de veille entraîne une baisse significative des performances de rappel, comparée à un intervalle de rétention de 20 minutes, les performances de MP restent stables si cet intervalle contient une nuit de sommeil²⁷, soulignant l'effet bénéfique de cette phase pour la protection contre les interférences. Une autre étude, réalisée par S. Diekelmann²⁸ a permis d'identifier la phase de sommeil la plus impliquée dans ce processus de consolidation. Grâce à un protocole de privation partielle de sommeil en début ou en fin de nuit, ces auteurs ont montré que l'effet bénéfique du sommeil sur la MP est présent lorsque le sommeil lent profond est conservé mais disparaît si seul le sommeil paradoxal est présent. Ces mêmes auteurs ont par la suite établi que le sommeil non seulement favorise le rappel des composantes prospective et rétrospective des intentions, mais aussi facilite la mise en jeu de processus de rappel associatif spontané, en particulier lorsque les ressources attentionnelles requises au moment du rappel sont limitées et que les processus de surveillance contrôlée de l'environnement ne sont pas nécessaires²⁹. Il est important de préciser que cette consolidation n'est pas systématique puisque le sommeil semble être à l'origine d'un tri parmi les représentations à consolider en fonction de leur pertinence³⁰ ou de la possibilité d'une utilisation future³¹. Dans ce cadre, C. Barner et ses collègues³² ont montré que l'effet bénéfique du sommeil sur la consolidation d'une intention en mémoire ne s'exprime que si celle-ci est maintenue active durant la phase de sommeil et n'a pas déjà été réalisée avant l'endormissement, et si l'activation de cette intention est proche temporellement de la période de son encodage en mémoire.

En parallèle de ces études qui s'intéressent à l'effet du sommeil sur la consolidation d'intentions, une méthodologie complémentaire consiste à étudier l'effet délétère de la

²⁵ Rauchs *et al.* 2011 ; Diekelmann & Born 2010.

²⁶ Rauchs *et al.* 2005.

²⁷ Scullin & McDaniel 2010.

²⁸ Diekelmann *et al.* 2013a.

²⁹ Diekelmann *et al.* 2013b.

³⁰ Rauchs *et al.* 2011.

³¹ Wilhelm *et al.* 2011.

³² Barner *et al.* 2017.

privation de sommeil sur le rappel subséquent d'intentions. Les résultats rapportés par ces études sont très contrastés. T. Grundgeiger et ses collègues³³ ont par exemple observé un effet délétère de la privation de sommeil sur le rappel d'intentions de type EB s'exprimant tant sur les processus coûteux en terme de fonctions exécutives que sur les processus moins coûteux. M.-J. Esposito et ses collègues³⁴ ont, quant à eux, rapporté que la privation totale de sommeil avait un impact sur la capacité des participants à rappeler des intentions de type TB en diminuant la vigilance objective et subjective des participants et altérait les processus d'intégration de la vérification régulière de l'heure avec l'estimation temporelle³⁵.

Dans leur ensemble, ces études ont évalué la MP au moyen d'épreuves de laboratoire assez éloignées des situations de la vie quotidienne, et n'ont abordé le rappel des intentions de type TB qu'à travers un contexte de privation de sommeil, et non de consolidation sur une nuit entière. En outre, ces études n'ayant inclus que des sujets jeunes sains, les effets du vieillissement sur ce type spécifique de consolidation mnésique restent mal compris, alors même qu'ils sont bien documentés sur la consolidation de souvenirs rétrospectifs³⁶.

Afin de mieux comprendre l'effet du sommeil sur la MP chez des sujets jeunes et des sujets âgés, dans la continuité des travaux réalisés avec la ville virtuelle, nous avons collaboré avec le CIREVE pour modéliser un nouvel environnement représentant le musée Mémorial de Caen (figure 2). Cet environnement riche, au sein duquel les sujets se déplacent librement, autorise la réalisation d'une grande variété d'intentions. Il permet également un contrôle accru des déterminants de la performance en MP : enregistrement des déplacements du sujet, de la fréquence et de la temporalité de la consultation d'une horloge et d'une carte de l'environnement ou encore du monitoring de l'environnement.

Dans le cadre de cette nouvelle étude (Legrand *et al.* en préparation), nous avons inclus 31 sujets jeunes (âge moyen = 22 +/- 2.9) et 29 sujets âgés (âge moyen = 62.6 +/- 4.6). Les sujets étaient invités à participer à une visite virtuelle du musée et devaient y rappeler 12 intentions apprises au préalable. Nous avons introduit un délai de 12 heures entre l'apprentissage des intentions et leur rappel, ce qui s'approche ainsi davantage des circonstances de rappel d'une intention en MP dans la vie quotidienne. Ce délai de 12 h permettait en outre d'étudier l'influence du sommeil.

³³ Grundgeiger *et al.* 2014.

³⁴ Esposito *et al.* 2015.

³⁵ Occhionero *et al.* 2017.

³⁶ Mander *et al.* 2013.



Fig. 2 : Modélisation en réalité virtuelle du musée Mémorial de Caen, ici le Hall du musée et l'amphithéâtre (collaboration Musée Mémorial, CIREVE de Caen et U 1077)

Les participants devaient mémoriser 8 intentions de type EB et 4 intentions de type TB, puis explorer le Mémorial virtuel tout en rappelant ces intentions. Dans une condition expérimentale, la mémorisation se faisait le soir et le rappel, le matin, après une nuit de sommeil et dans l'autre condition, la mémorisation se faisait le matin et le rappel le soir, après une journée de veille. Afin d'évaluer l'effet du sommeil en fonction du niveau de monitoring auto-initié nécessaire à la détection des indices lors de ces rappels, certaines des intentions EB impliquaient un haut niveau de monitoring tandis que d'autres impliquaient un bas niveau de monitoring. De plus, nous avons cherché à évaluer l'effet de la congruence sémantique des intentions sur les performances de rappel. Dans cette optique, ces intentions EB pouvaient présenter un lien fort entre l'indice prospectif et l'indice rétrospectif, tandis que d'autres présentaient un lien faible.

Lors d'une session préalable comprenant un intervalle de seulement 10 minutes, nous avons pu observer qu'il n'existe pas de différences dans les performances globales de rappel des intentions entre les sujets jeunes et âgés, et que ces performances sont stables même si

l'heure de réalisation des tests varie, qu'elle se situe à 8 heures le matin ou à 20 heures le soir. Toutefois, une analyse plus détaillée du rappel de la composante prospective nous a permis d'observer une interaction entre le niveau de monitoring exigé pour le rappel des intentions et la catégorie d'âge des participants. En effet, les sujets âgés sont plus performants pour détecter l'indice prospectif que les sujets jeunes si le rappel de ces intentions requiert peu de ressources attentionnelles, mais ils sont moins performants que les sujets jeunes si ce même rappel nécessite une quantité plus importante de ressources attentionnelles.

Cette différence a cependant été atténuée lors du rappel réalisé après une nuit de sommeil complète : les sujets jeunes ont en effet été les seuls à améliorer leurs performances pour le rappel de la composante prospective des intentions impliquant un faible niveau de monitoring. Le rappel des intentions impliquant de plus grandes allocations de ressources attentionnelles n'a en revanche pas bénéficié du sommeil, chez les sujets jeunes comme chez les sujets âgés.

Une différence entre les sujets jeunes et les sujets âgés a également été observée dans la consolidation des intentions présentant un lien sémantique faible entre la composante prospective et la composante rétrospective. Si les deux groupes ont bénéficié du sommeil pour la consolidation des intentions présentant un lien fort, seuls les sujets jeunes ont consolidé efficacement les intentions faiblement congruentes. Ces résultats soulignent ainsi l'importance du sommeil chez les sujets jeunes lorsqu'il s'agit d'encoder des représentations non familières.

Concernant le rappel des intentions de type TB, nous avons pu observer un effet global du sommeil significatif, les performances des deux groupes étant proches des performances maximales après une nuit de sommeil. Toutefois les intentions de type TB présentent la particularité d'impliquer des associations peu intuitives et arbitraires entre des horaires (composante prospective) et des actions à réaliser (composante rétrospective). La mémorisation et le rappel de ces composantes prises séparément ont été correctement effectués par les deux groupes, mais nous avons également cherché à évaluer la qualité du rappel de l'association entre ces composantes. En d'autres termes, nous voulions savoir si les participants ont réalisé la bonne action au bon horaire ou s'il leur arrivait d'inverser certaines des associations tout en rappelant correctement les différentes composantes. Nous avons ainsi pu observer que le sommeil a un effet facilitateur particulièrement marqué pour le rappel de ces associations. Plus précisément, alors que seulement la moitié des associations était correctement rappelée après un intervalle de 12 heures de veille, un intervalle de sommeil de même durée était suivi de presque 75 % d'associations correctement rappelées. De manière intéressante, l'effet du sommeil sur le rappel des composantes prospective et rétrospective était négligeable pour ce type d'intentions, ce qui suggère que ce sont les associations en mémoire qui sont renforcées au cours du sommeil.

Ces résultats nous permettent ainsi d'affiner notre compréhension de la consolidation des intentions en MP en fonction des processus cognitifs impliqués, et d'observer leur évolution dans le vieillissement. Si les sujets âgés semblent plus efficaces que les sujets jeunes lors du rappel d'intentions n'engageant pas de grandes capacités attentionnelles, ces derniers peuvent néanmoins rattraper leur retard après une nuit de sommeil en renforçant les liens en mémoire permettant des stratégies de rappel associatif spontané. Les sujets jeunes ont également été plus performants pour créer des liens nouveaux permettant de consolider des intentions non congruentes, suggérant une plus grande propension dans cette population

à restructurer les schémas mnésiques pour s'adapter à une situation inhabituelle. Les schémas mnésiques correspondent à des structures cognitives héritées de l'adaptation de l'individu à son environnement et à la répétition d'expériences similaires. Le sommeil semble jouer un rôle central dans leur reconfiguration³⁷, tant pour intégrer de nouvelles informations qui leur sont similaires que pour créer de nouvelles structures. Cette capacité à créer de nouvelles associations a été observée avec les intentions de type TB, mais cette fois dans les deux catégories d'âge, suggérant que le déclin de la consolidation mnésique lors du sommeil apparaissant avec l'âge se traduit davantage par une plus grande difficulté pour restructurer des schémas mnésiques préexistants sous une configuration originale ou inhabituelle, tandis que la capacité à créer de nouvelles associations n'impliquant pas de structures préexistantes semble préservée. Ces résultats dans leur ensemble sont cohérents avec le rôle bénéfique du sommeil dans la consolidation des associations permettant le rappel des intentions de MP³⁸, le rôle du sommeil dans la reconfiguration des schémas mnésiques préexistants³⁹ et la dégradation de ces mécanismes médiés par le cortex préfrontal avec l'âge⁴⁰.

Conclusion

L'introduction de la réalité virtuelle en neuropsychologie est très prometteuse, aussi bien pour sa participation à la compréhension du fonctionnement cognitif, que pour son intérêt dans l'évaluation clinique. Elle fournit une mesure à la fois complète, sensible et spécifique des fonctions cognitives et concilie la validité expérimentale des épreuves de laboratoire et la validité écologique des évaluations « sur le terrain ». Les sujets peuvent être placés dans une multitude de situations complexes, réelles ou imaginaires, ce qui permet d'obtenir des mesures conjointes des déficits cognitifs et du handicap qu'ils occasionnent au quotidien⁴¹. La réalité virtuelle ouvre ainsi la voie à de nouveaux types d'évaluations et de prises en charge plus en phase avec les besoins des patients. En autorisant la mise au point d'épreuves impliquant le recrutement dynamique de plusieurs fonctions cognitives, elle pourrait par exemple aider à objectiver des déficits cognitifs auxquels les tests classiques ne sont pas sensibles (par exemple chez des patients avec un *Déficit Cognitif Subjectif*) ou à mettre en évidence les répercussions fonctionnelles d'un tel déficit (chez les patients avec des *troubles cognitifs légers*).

L'exploitation de la réalité virtuelle n'en est qu'au stade des recherches avec des environnements-prototypes pour lesquels les interactions sont limitées. Sa complexité pour les utilisateurs les moins avertis et le fait que certains sujets soient victimes de vertiges ou de nausées en phase d'immersion constituent un frein à son introduction en pratique clinique. Celle-ci nécessite de surcroît le développement d'épreuves standardisées et normées au coût non négligeable. Pourtant, en dépit d'un investissement initial important, l'utilisation de la

³⁷ Hennies *et al.* 2016.

³⁸ Diekelmann *et al.* 2013b ; Scullin & McDaniel 2010.

³⁹ Hennies *et al.* 2016.

⁴⁰ Mander *et al.* 2013.

⁴¹ Déjos *et al.* 2012.

réalité virtuelle devrait permettre de réduire le coût humain et financier de l'évaluation écologique et de la prise en charge individualisée.

Bibliographie

- Barner C., Seibold M., Born J., Diekelmann S. (2017), « Consolidation of prospective memory: effects of sleep on completed and reinstated intentions », *Front Psychol*, t. 7, p. 1-18.
- Brooks B.-M., Rose F.-D., Potter J., Jayawardena S., Morling A. (2004), « Assessing stroke patients' prospective memory using virtual reality », *Brain Inj.*, t. 18, n°4, p. 391-401. doi:10.1080/02699050310001619855
- Burgess N., Maguire E.-A., O'Keefe J. (2002), « The Human Hippocampus and Spatial and Episodic Memory », *Neuron*, t. 35, n°4, p. 625-641. doi:10.1016/S0896-6273(02)00830-9
- Burgess N, Maguire E.-A, Spiers H.-J., O'Keefe J. (2001), « A Temporoparietal and Prefrontal Network for Retrieving the Spatial Context of Lifelike Events », *NeuroImage*, t. 14, n°2, p. 439-453. doi:10.1006/nimg.2001.0806
- Déjos M., Sauzéon H., N'Kaoua B. (2012), « La réalité virtuelle au service de l'évaluation clinique de la personne âgée : le dépistage précoce de la démence », *Rev. Neurol.*, t. 168, n°5, p. 404-414. doi:10.1016/j.neurol.2011.09.005
- Diekelmann S., Born J. (2010), « The memory function of sleep », *Nat. Rev. Neurosci*, t. 11, n°2, p. 114-26.
- Diekelmann S., Wilhelm I., Wagner U., Born J. (2013a), « Sleep to implement an intention », *Sleep*, t. 36, n°1, p. 149-153.
- Diekelmann S., Wilhelm I., Wagner U., Born J. (2013b), « Sleep improves prospective remembering by facilitating spontaneous-associative retrieval processes », *PLoS One*, t. 8, n°10, e77621.
- Esposito M.-J., Occhionero M., Cicogna P. (2015), « Sleep deprivation and time-based prospective memory », *Sleep*, t. 38, n°11, p. 1823-1826.
- Farrimond S, Knight R.-G, Titov N. (2006), « The effects of aging on remembering intentions : performance on a simulated shopping task », *Appl Cogn Psychol*, t. 20, p. 533-555.
- Gonneaud J., Kalpouzos G., Bon L., Viader F., Eustache F., Desgranges B. (2011), « Distinct and shared cognitive functions mediate event- and time-based prospective memory impairment in normal ageing », *Memory*, t. 19, n°4, p. 360-377. doi:10.1080/09658211.2011.570765
- Grundgeiger T., Bayen U.-J., Horn S.-S. (2014), « Effects of sleep deprivation on prospective memory », *Memory*, t. 22, n°6, p. 679-686.
- Hennies N., Lambon Ralph M.-A., Kempkes M., Cousins J.-N., Lewis P.-A. (2016), « Sleep Spindle Density Predicts the Effect of Prior Knowledge on Memory Consolidation », *J. Neurosci*, t. 36, n°13, p. 3799-3810.
- Kalpouzos G., Eriksson J., Sjölie D., Molin J., Nyberg L. (2010), « Neurocognitive Systems Related to Real-World Prospective Memory », *PLoS one*, t. 5, n°10, e13304.

- Knight R.-G., Nicholls J., Titov N. (2007), « The effects of old age and distraction on the assessment of prospective memory in a simulated naturalistic environment », *Int. Psychogeriatr*, t. 20, p. 124-134.
- Kvavilashvili L., Cockburn J., Kornbrot D.-E. (2012), « Prospective memory and ageing paradox with event-based tasks : A study of young, young-old, and old-old participants », *Q. J. Exp. Psychol. (Hove)*, t. 17, p. 180-196.
- Lecouvey G., Gonneaud J., Eustache F., Desgranges B. (2015a), « Les processus cognitifs de la mémoire prospective », *Revue de Neuropsychologie*, t. 7, n°3, p. 199-206.
- Lecouvey G., Gonneaud J., Eustache F., Desgranges B. (2015b), « Les grandes théories de la mémoire prospective : vers une vision dynamique des processus cognitifs engagés lors du rappel programmé d'intentions », *Revue de neuropsychologie*, 7, 3, p. 207-215.
- Lecouvey G., Gonneaud J., Desgranges B., Eustache F. (sous presse a), « Réalité virtuelle et neuropsychologie », in D. Mellier (dir.), Rouen, PURH.
- Lecouvey G., Gonneaud J., Piolino P., Madeleine S., Orriols E., Fleury P., Eustache F., Desgranges B. (sous presse b), « Is binding decline the main source of the ageing effect on prospective memory? A ride in a virtual town », *Socioaffect Neurosci Psychol*.
- Mander B.-A., Rao V., Lu B., Saletin J.-M., Lindquist J.-R., Ancoli Israel S., Jagust W., Walker M.-P. (2013), « Prefrontal atrophy, disrupted NREM slow waves and impaired hippocampal-dependent memory in aging », *Nat. Neurosci*, t. 16, n°3, p. 357-364.
- Matheis R.-J., Schultheis M.-T., Tiersky L.-A., DeLuca J., Millis S.-R., Rizzo A. (2007), « Is learning and memory different in a virtual environment ? », *Clin. Neuropsychol.*, t. 21, n°1, p. 146-161.
- McDermott K., Knight R.-G. (2004), « The effects of aging on a measure of prospective remembering using naturalistic stimuli », *Appl. Cogn. Psychol.*, t. 18, p. 349-362.
- Morris R., Kotitsa M., Bramham J., Brooks B., Rose F.-D. (2002), « Virtual reality investigation of strategy formation, rule breaking and prospective memory in patients with focal prefrontal neurosurgical lesions », *4th Intern. Conf. Disability, Virtual Reality & Assoc. Tech.*, Veszprém, Hungary, p. 101-108.
- Niedźwieńska A., Barzykowski K. (2012), « The age prospective memory paradox within the same sample in time-based and event-based tasks », *Neuropsychol. Dev. Cogn. B Aging Neuropsychol Cogn.*, t. 19, p. 58-83.
- Occhionero M., Cicogna P., Esposito M.-J. (2017), « The effect of sleep loss on dual time-based prospective memory tasks », *The American Journal of Psychology*, t. 130, n°1, p. 93-103.
- Plancher G., Gyselinck V., Nicolas S., Piolino P. (2010), « Age effect on components of episodic memory and feature binding : A virtual reality study », *Neuropsychology*, t. 24, n°3, p. 379-390.
- Plancher G., Tirard A., Gyselinck V., Nicolas S., Piolino P. (2012), « Using virtual reality to characterize episodic memory profiles in amnesic mild cognitive impairment and Alzheimer's disease : Influence of active and passive encoding », *Neuropsychologia*, t. 50, n°5, p. 592-602.
- Rauchs G., Desgranges B., Foret J., Eustache F. (2005), « The relationships between memory systems and sleep stages », *J. Sleep Res.*, t. 14, p. 123-140.

- Rauchs G., Orban P., Balteau E., Schmidt C., Degueldre C., Luxen A., Maquet P., Peigneux P. (2008), « Partially segregated neural networks for spatial and contextual memory in virtual navigation », *Hippocampus*, t. 18, n°5, p. 503-518. doi:10.1002/hipo.20411
- Rauchs G., Bertran F., Gaubert M., Desgranges B., Eustache F. (2011), « Liens entre sommeil et mémoire au fil de la vie », *Revue de neuropsychologie*, t. 3, n°1, p. 33-40.
- Reeves D.-L., Winter K.-P., Bleiberg J., Kane R.-L. (2007), « ANAM genogram : historical perspectives, description, and current endeavors », *Arch. Clin. Neuropsychol*, t. 22, Suppl. 1, p. 15-37. doi:10.1016/j.acn.2006.10.013
- Rizzo A.-A., Schultheis M., Kerns K.-A., Mateer C. (2004), « Analysis of assets for virtual reality applications in neuropsychology », *Neuropsychol. Rehabil.*, t. 14, n° 1-2, p. 207-239. doi:10.1080/09602010343000183
- Sauzéron H., Arvind Pala P., Larrue F. (2011), Wallet G., Déjos M., Zheng X., Guitton P., N'Kaoua B., « The use of virtual reality for episodic memory assessment : effects of active navigation », *Exp. Psychol.*, t. 59, n°2, p. 99-108. doi:10.1027/1618-3169/a000131
- Sauzéron H., N'Kaoua B., Arvind Pala P., Taillade M., Auriacombe S., Guitton P. (2016), « Everyday-like memory for objects in ageing and Alzheimer's disease assessed in a visually complex environment : The role of executive functioning and episodic memory », *J. Neuropsychol.*, t. 10, n°1, (1^{ère} publication 2014), p. 33-58. doi:10.1111/jnp.12055
- Scullin M.-K., McDaniel M.-A. (2010), « Remembering to execute a goal : sleep on it ! », *Psychol. Sci.*, t. 21, n°7, p. 1028-1035.
- Sweeney S., Kersel D., Morris R.-G. *et al.* (2010), « The sensitivity of a virtual reality task to planning and prospective memory impairments: Group differences and the efficacy of periodic alerts on performance », *Neuropsychol. Rehabil.*, t. 20, p. 239-263.
- Titov N., Knight R.-G. (2001), « A video-based procedure for the assessment of prospective memory », *Appl. Cognit. Psychol*, t. 15, n°1, p. 61-83.
- Titov N., Knight R.-G. (2005), « A computer-based procedure for assessing functional cognitive skills in patients with neurological injuries : The virtual street », *Brain Inj*, t. 19, p. 315-322.
- Wilhelm I., Diekelmann S., Molzow I., Ayoub A., Mölle M., Born, J. (2011), « Sleep selectively enhances memory expected to be of future relevance », *J. Neurosci*, t. 31, n°5, p. 156361569.
- Wilson B.-A., Cockburn J., Baddeley A. (1985), *The Rivermead Behavioural Memory Test*, Bury St Edmunds, Thames Valley Test Company.
- Wilson B.-A., Alderman N., Burgess P.-W., Emslie H., Evans, J.-J. (1996), *Behavioural Assessment of the Dysexecutive Syndrome*, Bury St Edmunds, Thames Valley Test Company.

Étude des liens entre perception et action dans des environnements virtuels

N. Benguigui¹, C. Mandil¹, M. Mallek^{1,2}, L. Lejeune¹, & R. Thouvarecq²

1. Université de Caen-Normandie, UFR STAPS, CESAMS EA4260

2. Université de Rouen, UFR STAPS, CETAPS EA3832

Introduction

Les récents progrès des systèmes immersifs de réalité virtuelle se situent aussi bien au niveau des espaces de simulation, de la qualité des graphismes, des possibilités de mouvements que dans les délais dans la restitution des effets de ces mouvements au plan de la scène visuelle¹. De ce fait, la réalité virtuelle est identifiée aujourd'hui dans le domaine des sciences du mouvement comme un outil de premier plan pour étudier les relations entre perception et action². Elle est aussi un sujet d'étude à part entière dans le but de comprendre quels sont les éléments clés pour améliorer la qualité des simulateurs³. Les questions posées dans ce domaine concernent les notions d'immersion et de présence⁴, de perception de la profondeur⁵, d'interaction en temps réel⁶ ou de mal des simulateurs⁷. Dans un autre registre, la réalité virtuelle permet de concevoir des environnements parfaitement contrôlés. Elle donne aussi la possibilité de décorrélérer les informations dans l'espace ou le temps de la perception et de l'action ou de substituer une modalité sensorielle à une autre afin de comprendre comment les informations sont utilisées pour contrôler le mouvement. Elle offre donc des possibilités de mettre en place des expérimentations de plus en plus élaborées se rapprochant de situations réelles avec un parfait contrôle des conditions expérimentales. Un des domaines où la réalité virtuelle peut jouer un rôle particulièrement important est celui du débat entre une conception prédictive et une conception prospective des interactions que l'individu entretient avec son environnement. Ce débat est source de progrès dans la compréhension des mécanismes perceptifs et moteurs impliqués dans ces interactions mais suscite encore des controverses et des oppositions.

La conception prédictive s'inscrit dans le cadre de modèles cognitivistes⁸ dits traditionnels de la perception et du contrôle moteur. Dans ces modèles, la perception repose sur l'élaboration de représentations qui rendent compte, de manière indirecte puisqu'élaborées par construction par le système cognitif, de ces interactions à partir d'indices prélevés dans l'environnement et de connaissances stockées en mémoire⁹. Sur la base de ces

¹ Bideau *et al.* 2010 ; Goldberg *et al.* 2014 ; Wright 2014.

² Faure *et al.* 2016.

³ Reimer *et al.* 2006.

⁴ Slater & Usoh 1993, Stoffregen *et al.* 2003.

⁵ Gray *et al.* 2006.

⁶ Morice *et al.* 2008.

⁷ Kennedy *et al.* 2000.

⁸ Neisser 1967.

⁹ Marr 1982.

représentations, la motricité est contrôlée sur un mode prédictif à partir de programmes moteurs stockés en mémoire qui contiennent les commandes nécessaires pour réaliser l'action et la réguler en cours d'exécution, en cas de mauvaise réalisation, sur la base d'une copie du programme moteur¹⁰.

La conception prospective repose sur les travaux de J.-J. Gibson¹¹ et d'une remise en cause des postulats de la conception cognitiviste. Selon cette approche, le contrôle de l'action est réalisé à partir de la recherche (prospective) d'invariants qui sont perçus directement dans l'environnement, c'est-à-dire sans avoir besoin de recourir à l'utilisation d'informations stockées en mémoire. La motricité est ainsi pilotée à partir de lois de contrôle permettant de coupler information et mouvement¹².

Dans ce contexte, cette contribution a pour but dans un premier temps d'illustrer ce débat à travers des études réalisées dans des tâches d'interception. Le principe de la démarche est d'identifier des situations et des comportements permettant de tester les hypothèses prédictives et prospectives, de les reproduire en situation contrôlée (virtuelle) et de manipuler les informations pour comprendre leur utilisation. Dans un second temps, nous aborderons l'utilisation de la réalité virtuelle augmentée pour manipuler l'information disponible et déterminer le bénéfice de l'ajout d'informations tactiles en situation de navigation. Nous concluons enfin sur la nécessaire adéquation entre les questions de recherche dans le domaine des sciences du mouvement et l'utilisation de la réalité virtuelle.

Les mouvements de rebroussement

Un exemple intéressant pour comprendre les limites des modèles prédictifs est de s'intéresser aux mouvements de rebroussement dans les actions d'interception. Ces mouvements correspondent à des déplacements qui peuvent paraître erronés puisqu'ils sont dans un premier temps orientés du côté opposé au point d'interception. On peut par exemple observer ces mouvements chez des gardiens de but professionnels, experts de ce type de tâche, particulièrement sur des trajectoires courbes du fait d'une rotation de balle¹³.

Pour expliquer ces mouvements, G. Montagne et ses collègues¹⁴ ont d'abord proposé que l'information utilisée corresponde à la projection de la balle sur l'axe d'interception (X_{0B} , voir figure 1, à gauche). Pour tester cette hypothèse, ils ont réalisé une expérience dans laquelle les participants devaient attraper des balles qui s'approchaient de la zone d'interception avec des angles différents. Les résultats ont confirmé l'hypothèse de l'utilisation X_{0B} en montrant des mouvements de rebroussement dans des situations d'approche rentrantes alors même que les participants avaient la main placée à l'endroit d'interception dès le début de l'essai.

¹⁰ Schmidt & Lee 2011.

¹¹ Gibson 1979.

¹² Warren 1988, 2006.

¹³ Dessing & Craig 2010, Movie S1 sur la page <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0013161>

¹⁴ Montagne *et al.* 1999.

Dans une étude plus récente cependant, R. Arzamarski et ses collègues¹⁵ ont tenté de répliquer ces résultats, mais sans succès, posant ainsi un certain nombre de question sur l'origine de ces différences. Dans le même temps, D.-M. Jacobs et C.-F. Michaels¹⁶ ont observé des mouvements de rebroussement dans une tâche de capture de balle dans laquelle les balles se déplaçaient au bout d'une corde et décrivaient une courbe. Ce dernier résultat suggère l'utilisation de $X1_B$ qui correspond à la projection de la balle selon le vecteur vitesse de son déplacement (figure 1, au centre). Il existe donc une controverse concernant l'information utilisée ($X0_B$ vs. $X1_B$) pour guider le mouvement dans ce type de tâche et pour expliquer ces mouvements de rebroussement. Pour traiter cette question, nous avons utilisé des trajectoires rectilignes et courbes avec un dispositif de réalité virtuelle afin de prédire l'occurrence des mouvements de rebroussement selon la possible utilisation de $X0_B$ ou $X1_B$. (figure 1, à gauche et au centre). La tâche consistait à intercepter une balle virtuelle projetée sur un plan horizontal en déplaçant la main sur un axe vertical (figure 1 à droite et figure 2, à gauche).

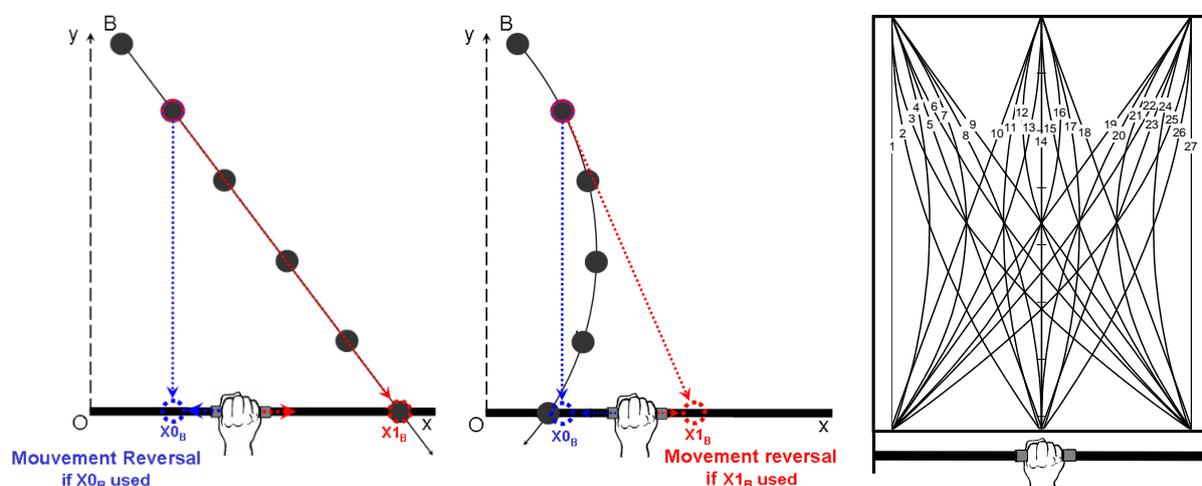


Fig. 1. À gauche et au centre : Représentation d'une interception de balle se déplaçant selon une trajectoire rectiligne et courbe. L'utilisation de $X0_B$ devrait produire des mouvements de rebroussement pour la trajectoire rectiligne mais pas pour la trajectoire courbe. L'utilisation de $X1_B$ devrait produire les résultats opposés. A droite sont représentées les trajectoires utilisées dans l'expérimentation réalisée (voir aussi la fig. 2).

¹⁵ Arzamarski *et al.* 2006.

¹⁶ Jacobs & Michaels 2006.

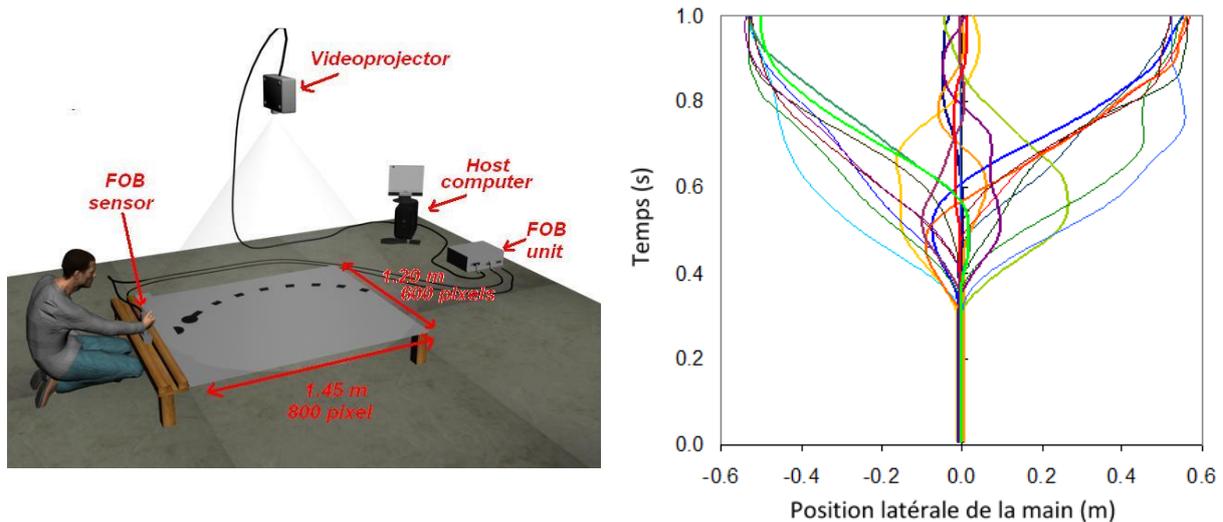


Fig. 2. A gauche : Dispositif utilisé pour tester l'interception de balles virtuelles (figure réalisée par Antoine Morice, Aix-Marseille Université). A droite : Cinématique de la main au cours du temps depuis le début d'un essai ($T = 0$ s) jusqu'à l'arrivée au niveau de l'axe d'interception ($T = 0.8$ s). Des mouvements de rebroussement apparaissent clairement correspondant à des mouvements latéraux alors que la main est placée d'emblée au point d'interception ou des mouvements latéraux dans la direction opposée au point d'arrivée.

Les résultats de cette expérience ont montré un nombre important de mouvements de rebroussement (figure 2 à droite) principalement pour les trajectoires courbes, avec néanmoins des mouvements de rebroussement pour deux trajectoires rectilignes (figure 3). Pour identifier l'information qui détermine ces mouvements de rebroussement, nous avons calculé X_{0B} et X_{1B} 200ms avant le début du mouvement (un temps correspondant à un délai visuo-moteur classique pour l'utilisation de l'information) comme prédicteur de l'amplitude des mouvements de rebroussement. X_{1B} est apparu comme le meilleur prédicteur avec un R^2 de .71, largement meilleur que X_{0B} avec un R^2 de .18. Cependant, une régression multiple a montré que X_{0B} contribuait de manière additive à l'explication des mouvements de rebroussement ($R^2=.86$ quand X_{0B} est ajouté à l'équation prédictive). Un autre résultat intéressant a été observé avec une diminution du nombre de mouvements de rebroussement avec les blocs de pratique. Il a été possible de montrer que cette diminution était fortement corrélée à une augmentation du délai d'initiation du mouvement d'interception ($R^2=.75$).

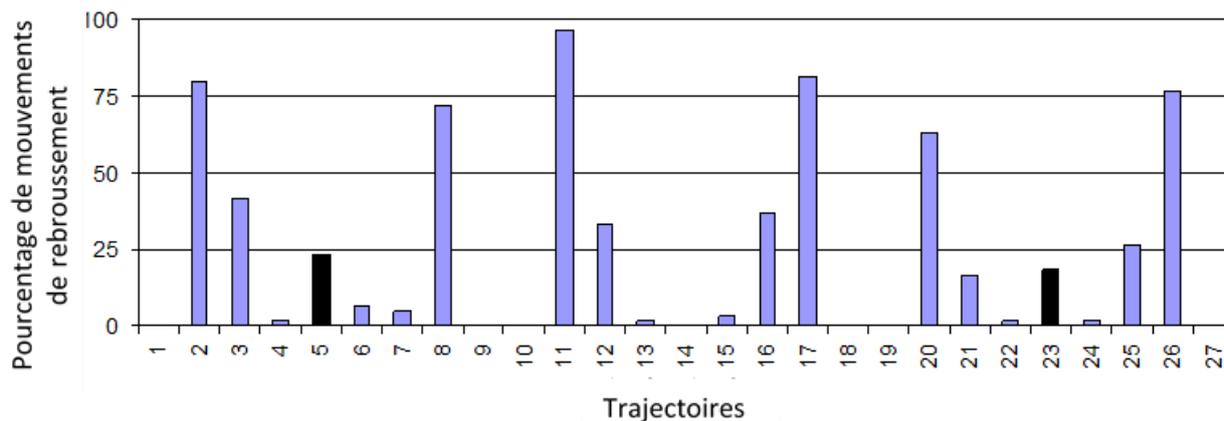


Fig. 3. Pourcentage des mouvements de rebroussement pour chacune des trajectoires. Les barres bleues correspondent à des trajectoires courbes, les barres noires correspondent à des trajectoires rectilignes (voir aussi la figure 1 à droite pour la correspondance des trajectoires).

Finalement, cette étude a montré que la manipulation des trajectoires rectilignes et courbes grâce à la réalité virtuelle permettait d'identifier l'origine pluri-informationnelle des mouvements de rebroussement. Les trajectoires courbes sont responsables de la majorité des mouvements de rebroussement, mais les trajectoires rectilignes peuvent en produire aussi dans certaines conditions. Les analyses réalisées montrent que $X1_B$ est la source principale d'information pour expliquer les mouvements de rebroussement¹⁷ mais que $X0_B$ y contribue également¹⁸. La nature de la combinaison de ces deux informations et les processus sous-jacents restent à déterminer. L'utilisation de la réalité virtuelle et de nouvelles trajectoires pourrait contribuer à répondre à ces questions.

Cette étude a aussi montré que le nombre de mouvements de rebroussement diminuait avec la pratique. Cela s'explique par une augmentation du délai d'initiation correspondant à une stratégie d'attente très certainement pour produire moins de mouvements de rebroussement. Dans une conception prospective du contrôle du mouvement, il ne faut pas considérer ces mouvements de rebroussement comme des erreurs mais plutôt l'expression d'un couplage dans des conditions très particulières par rapport à des informations dont la valeur prédictive est finalement faible. On peut néanmoins considérer qu'il s'agit de mouvements coûteux en temps et en énergie. Il est ainsi intéressant d'observer une volonté de minimiser le coût, non pas en utilisant d'autres sources d'information, mais plutôt en retardant la mise en œuvre du couplage avec une information qui devient d'autant plus fiable en termes d'orientation du mouvement que le moment d'interception approche.

L'hypothèse du modèle interne de la gravité

Un autre exemple de l'utilisation de la réalité virtuelle peut être pris avec l'hypothèse prédictive des modèles internes pour interagir avec l'environnement. Cette hypothèse propose que des modèles internes permettraient de se représenter certaines propriétés de

¹⁷ Jacobs & Michaels 2006.

¹⁸ Montagne *et al.* 1999.

l'environnement (telle que la gravité) et de prédire par exemple les trajectoires de balles pour les intercepter. Ces modèles se développeraient et s'affineraient avec l'expérience¹⁹. Bien que séduisante et étayée par un certain nombre de données expérimentales²⁰, cette hypothèse et les travaux expérimentaux associés restent discutables²¹. Selon l'approche prospective, ces modèles internes n'auraient pas lieu d'être dans la mesure où l'interception serait réalisée sur la base de régulations continues du mouvement. La pratique et l'expertise conduiraient à des régulations plus rapides, plus précises et mieux adaptées correspondant à une optimisation du couplage information-mouvement²². Pour alimenter le débat sur cette question, nous avons pris comme support l'expertise en sport de balle et développé un programme de recherche pour tester cette hypothèse.

Deux études ont été mises en place. La première est une expérience psychophysique dans un environnement virtuel reproduisant un terrain de basket (figure 4 à gauche), avec comme objectif de tester la sensibilité des participants dans la perception des modifications des propriétés physiques de la trajectoire. Dans le cas d'une utilisation effective de modèles internes qui se développeraient avec la pratique, les experts devraient en avoir développé de plus consistants et être plus performants dans la détection des modifications de ces propriétés. Nous proposons dans la seconde expérience non plus une tâche seulement perceptive mais une tâche de poursuite visuo-motrice dans laquelle la perception et l'action pourront être couplées par une régulation prospective du mouvement. Le but de cette dernière sera de déterminer si l'expertise dans les sports de balle se situe plutôt à ce niveau face à des modifications des propriétés physiques de la trajectoire. Il s'agira pour ce faire d'examiner la mise en jeu des adaptations et des ajustements nécessaires et de déterminer si les experts sont plus performants. Dans cette contribution, seuls les résultats de la première expérience seront présentés, les résultats de la seconde étant en cours de traitement.

Dans la première expérience, deux groupes de participants ont été comparés, le premier comprenant 16 joueurs de basket experts et le second 14 non-experts dans cette pratique et dans les sports de balle en général. Les participants devaient juger le plus rapidement possible si la hauteur de la trajectoire après le rebond leur paraissait trop haute ou trop basse par rapport à ce qu'ils attendaient. Au moment du premier rebond, la valeur de gravité (G) ou du coefficient de restitution (CR) du rebond au sol pouvait prendre 12 valeurs différentes (figure 4 à droite). Afin de contrôler la tendance des participants à centrer leurs réponses par rapport à la gamme de trajectoires proposée (*centering bias*²³), deux intervalles de hauteur de balle pour le 1^{er} rebond ont été utilisés, lors de deux conditions différentes : de 2.16 m à 4.32 m (condition 1, valeur centrale : 3.24 m) et de 1.68 m à 3.84 m (condition 2, valeur centrale : 2.76 m). Dans chaque condition, les participants passaient trois blocs de 40 essais : 10 hauteurs différentes x 2 modifications différentes (G et CR) x 2 vitesses horizontales, le tout présenté dans un ordre aléatoire.

¹⁹ McIntyre *et al.* 2001.

²⁰ Zago *et al.* 2004.

²¹ Baurès *et al.* 2007.

²² Le Runigo *et al.* 2010.

²³ Mantel *et al.*, 2008.

Pour chaque participant nous avons ajusté une fonction logistique de forme $f(x) = \frac{1}{1+e^{-((x-\alpha)/\beta)}}$ ²⁴ sur la probabilité observée de réponses « trop haut » et « trop bas » calculée à chaque hauteur de rebond. Trois variables dépendantes ont ainsi pu être extraites : le biais (point d'égalité subjective permettant de déterminer si les participants se représentent correctement la hauteur du rebond), le JND (différence juste perceptible permettant la précision de l'estimation ou la sensibilité du jugement), et le coefficient de détermination (R^2 permettant de déterminer la consistance des réponses). Nous avons analysé chacune de ces variables suivant le plan factoriel (Expertise x Gamme utilisée x Prédicteur CR-G).

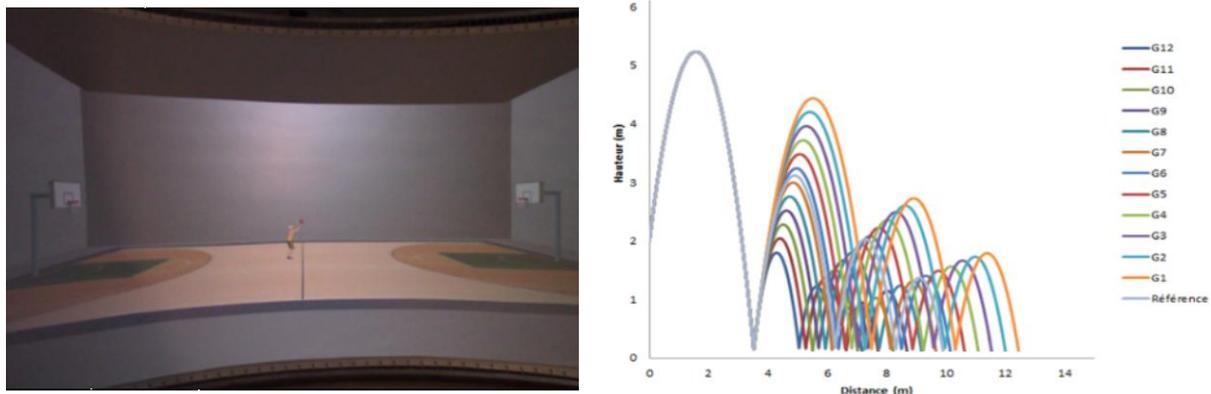


Fig. 4. À gauche : Présentation de l'environnement virtuel conçu pour la tâche de jugement de la trajectoire post-rebond. A noter que pour la tâche de poursuite visuo-motrice, le même dispositif a été utilisé avec l'adjonction d'un effecteur dans la scène virtuelle qui était contrôlé par un dispositif de capture de mouvement permettant aux participants de poursuivre la balle. À droite : Représentation graphique des trajectoires de balle pour la condition de changement des valeurs de la gravité.

Les résultats n'ont pas montré d'effet de l'expertise, ni de la gamme utilisée, ni du prédicteur CR-G pour les variables des réponses binaires JND et R^2 . En ce qui concerne la variable Biais, l'analyse statistique n'a pas montré d'effet significatif de l'expertise, ni du prédicteur CR et G mais a montré en revanche un effet de l'intervalle de hauteurs utilisé. Dans la condition haute, les participants avaient une valeur de biais significativement plus importante ($M = 3.11$ m) que dans la condition basse ($M = 2.91$ m) - (tableau 1 et figure 5).

Tableau 1. Moyennes et Ecart-type des R^2 , Biais et JND en fonction des intervalles et des prédicteurs CR-G pour les deux groupes de participants.

	R^2		Biais		JND		
	G	CR	G	CR	G	CR	
	modifiée	modifié	modifiée	modifié	modifiée	modifié	
Range	0.96	0.98	2.89	2.89	0.13	0.14	
	2.76	(±0.05)	(±0.01)	(±0.18)	(±0.22)	(±0.06)	(±0.05)
Experts	Range	0.98	0.99	3.10	3.15	0.13	0.14
	3.24	(±0.01)	(±0.02)	(±0.18)	(±0.18)	(±0.05)	(±0.05)

²⁴ Treutwein & Strasburger 1999.

	Range	0.93	0.96	2.98	2.88	0.18	0.18
Non-sportifs	2.76	(±0.04)	(±0.03)	(±0.31)	(±0.25)	(±0.12)	(±0.12)
	Range	0.98	0.99	3.09	3.11	0.16	0.13
	3.24	(±0.02)	(±0.01)	(±0.26)	(±0.27)	(±0.10)	(±0.07)

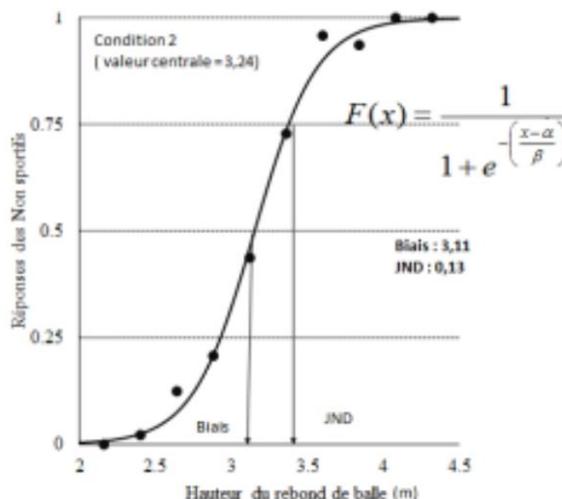
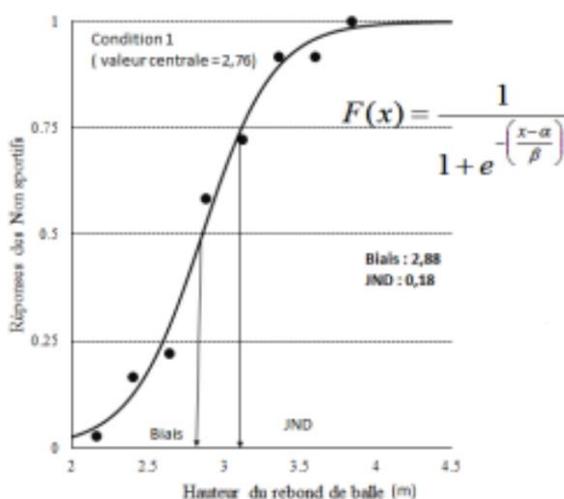
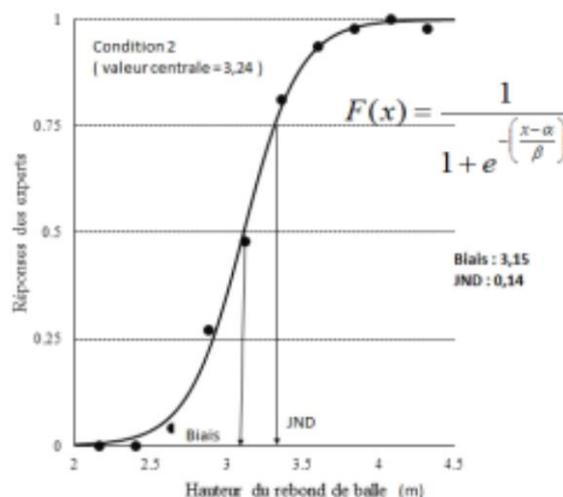
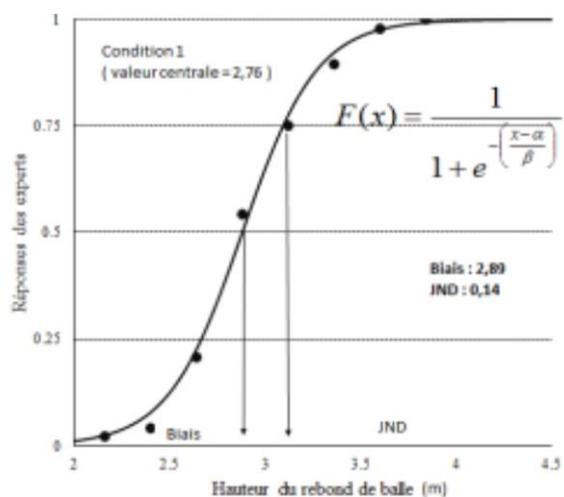


Fig. 5. Moyenne des réponses des experts en haut et des non-sportifs en bas en fonction de la hauteur de balle post-rebond pour les deux intervalles dans le cas où les trajectoires sont modifiées en CR. Les courbes sont ajustées sur une sigmoïde F , avec α le biais (PSE) et β nous indique sur la différence entre le Biais et le JND.

Bien que pratiquant depuis de nombreuses années et de manière intensive, il apparaît donc que les experts ne sont pas meilleurs que les non-experts dans la perception des irrégularités du rebond de basket. Ils sont tout autant affectés que les non-experts par l'effet d'intervalle et ils ne détectent pas plus rapidement les trajectoires de balles modifiées brutalement lors de la manipulation du CR que celles modifiées progressivement lors de la manipulation de la gravité.

Pour conforter ce résultat obtenu dans un environnement virtuel qui pourrait expliquer cette absence de différenciation, nous avons réalisé une expérimentation reposant sur des vidéos dans laquelle le coefficient de restitution du rebond était modifié par des ballons de basket plus ou moins gonflés (figure 6). Cette étude reposant sur les mêmes principes que celle qui vient d'être présentée aboutit aux mêmes résultats confirmant ainsi ceux obtenus dans un environnement virtuel.



Fig. 6. Image extraite d'une vidéo qui permettait de traiter la même question que celle posée à partir de la situation virtuelle (figure 4). Le ballon qui apparaît en haut à gauche de l'image pouvait avoir une hauteur entre 1.90 m et 3.11 m ou entre 2.12 m, 3.58 m après le 1^{er} rebond. Les valeurs de gonflage étaient modifiées afin d'avoir les rebonds de hauteurs différentes.

Nos résultats apparaissent en accord avec ceux de B. Abernethy²⁵ et de R.-M. Rowe et F.-P. McKenna²⁶ qui montrent que les processus perceptifs seuls ne se différencient pas avec l'expertise en sport de balle. S'inscrivant dans la continuité des travaux de R. Baurès et ses collègues²⁷, nos résultats suggèrent que l'expertise n'est pas liée à l'utilisation de modèles internes plus élaborés. Elle pourrait être plutôt le résultat d'un couplage perception-action optimisé²⁸.

Dans cette logique, nous avons réalisé une seconde expérimentation dans laquelle les sujets devaient interagir directement avec le ballon avec un effecteur affiché dans la scène virtuelle (figure 4). Comme dans l'expérience précédente, des modifications étaient opérées après le rebond sur la gravité et le coefficient de restitution afin de solliciter les processus perceptivo-moteurs. Il s'agissait ici de tester l'hypothèse selon laquelle l'expertise dans les sports de balle se traduirait par des régulations du mouvement plus précises et plus rapides. Les résultats de cette expérience sont en cours de traitement.

²⁵ Abernethy 1991.

²⁶ Rowe & McKenna 200.

²⁷ Baurès *et al.* 2007.

²⁸ Savelsbergh & van der Kamp 2000.

Utilisation d'un environnement virtuel pour tester l'intérêt de l'apport d'informations augmentées vibrotactiles en situation de navigation

Dans les activités de locomotion et de navigation, la régulation du mouvement est principalement assurée par la prise d'informations visuelles. Pourtant, ces informations peuvent parfois être difficiles à utiliser en cas de surcharge attentionnelle ou de dégradations des conditions d'accès. Les dispositifs vibrotactiles offrent la possibilité d'utiliser une modalité sensorielle différente en mobilisant le sens du toucher pour transmettre des informations en remplacement ou en complément des informations visuelles. Ces informations sont transmises à l'aide de vibrateurs posés à la surface de la peau. Elles sont caractérisées par des paramètres de vibration au niveau de leur localisation, de leur fréquence, de leur rythme, de leur organisation spatiotemporelle, etc. Elles peuvent être utilisées seules ou de manière combinée. Par exemple, la localisation particulière d'une stimulation peut permettre d'indiquer la direction dans laquelle s'orienter²⁹. Ces dispositifs peuvent être utilisés pour la régulation du mouvement et plus spécifiquement dans la gestion des contacts avec l'environnement et des approches, mais il est alors nécessaire de déterminer quelle information coder et comment la coder sous forme de stimulations vibrotactiles.

Pour examiner ces questions, nous avons développé un dispositif de réalité virtuelle d'atterrissage en hélicoptère couplé avec un dispositif vibrotactile. Ce dispositif développé en collaboration avec le CIREVE (Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle, Université de Caen Normandie) permet de simuler des atterrissages qui sont contrôlés à l'aide d'un joystick approprié à ce type de tâche. Ce joystick donne la possibilité de réguler la vitesse d'approche en fonction de l'altitude perçue visuellement sur un écran et/ou tactilement par la mise en jeu de huit vibrateurs.

Dans cette étude, un environnement visuel dit normal, c'est-à-dire texturé et de ce fait donnant un accès aisé à des informations sur l'altitude et l'approche et un environnement dégradé, c'est-à-dire sans information de texture et rendant l'accès aux informations d'altitude et d'approche moins aisé ont été comparés³⁰ (figure 7 à gauche). En complément de ces deux conditions, une condition de vision dégradée avec des informations tactiles et une condition d'information tactile seule ont été utilisées. Pour tester la question de la sensibilité de différentes régions du corps et de l'importance de l'orientation des informations tactiles, le dispositif tactile pouvait être placé à trois endroits du corps différents, i.e., sur l'abdomen verticalement et horizontalement et sur l'avant-bras (figure 7 à droite).

²⁹ Van Erp *et al.* 2005

³⁰ Flach *et al.* 1992.

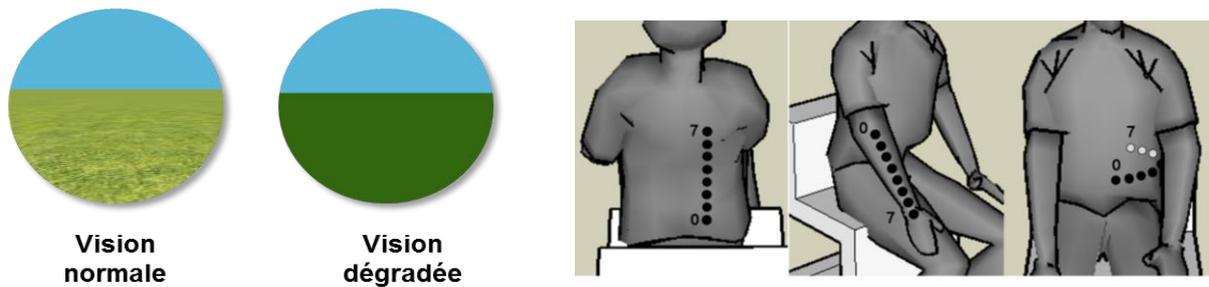


Fig. 7. À gauche : La scène visuelle pouvait être présentée en condition normale, c'est-à-dire avec un sol texturé permettant d'accéder aisément à des informations d'altitude et d'approche et en condition dégradée, c'est-à-dire sans texture avec un accès à ces informations moins aisé. À droite : Le dispositif pouvait être placé sur l'abdomen en position verticale (à gauche), en position horizontale (à droite) ou sur l'avant-bras (au centre)

Les résultats de cette étude ont montré que si la modalité tactile était assez loin de permettre à elle seule de réguler la vitesse d'approche de manière équivalente à la modalité visuelle, elle permettait néanmoins d'améliorer cette régulation en condition de vision dégradée (figure 8). Cet effet est également apparu au niveau de la régulation tout au long des essais (figure 9). Avec des informations tactiles seules, la régulation de l'approche semble moins bien contrôlée et conduit à une vitesse au moment de l'impact plus importante. L'observation des trajectoires en condition de vision dégradée laisse apparaître des décélérations précoces et non maîtrisées. L'utilisation d'informations tactiles en complément d'une vision dégradée permet d'améliorer la qualité de la décélération et réduit ainsi la vitesse d'impact comme lors d'une approche avec une vision normale. En revanche, il n'est pas apparu de différence entre les potentielles conditions de positionnement sur le corps et d'orientation. Les informations concernant l'altitude, telles que nous les avons codées, sont accessibles à travers les variations spatiotemporelles de la stimulation tactile, indépendamment de leur localisation et leur orientation.

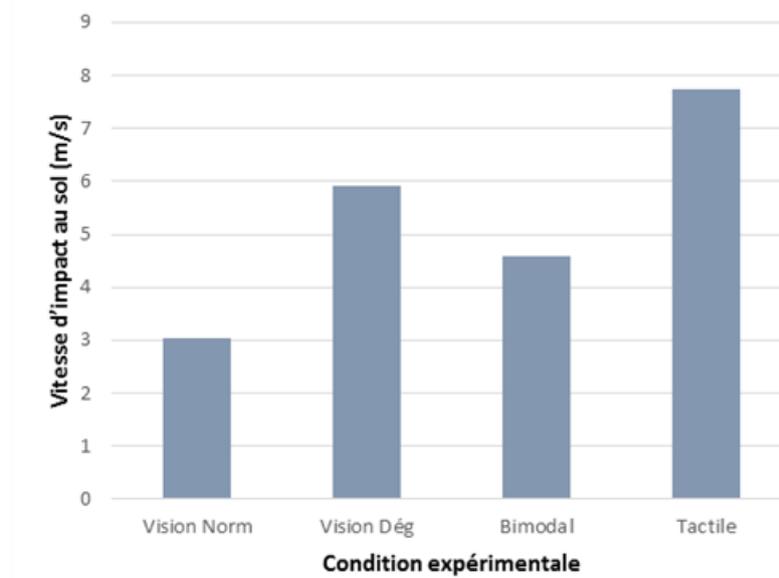


Fig. 8. Vitesse d'impact au sol en fonction des quatre conditions d'approche testées

La réalité virtuelle nous offre ici la possibilité de manipuler l'information disponible pour l'individu lors de l'approche au sol et ainsi de déterminer les conditions les plus favorables d'utilisation des dispositifs tactiles. Sur le plan visuel, la manipulation des différentes sources d'information (luminosité, éléments de texture, etc.) permet de préciser les contextes dans lesquels l'ajout d'information tactile améliore la précision de l'atterrissage (vol de nuit, amerrissage, etc.). Au niveau tactile, le couplage entre le dispositif tactile et l'environnement virtuel permet d'exploiter différentes variables informationnelles (altitude, vitesse, temps avant contact, etc.). En effet, si l'orientation de la stimulation ne semble pas affecter l'accès aux informations relatives à l'altitude, les expérimentations suivantes permettront de préciser l'influence de ces différentes variables (transmises sous forme tactile) sur la régulation d'une approche au sol.

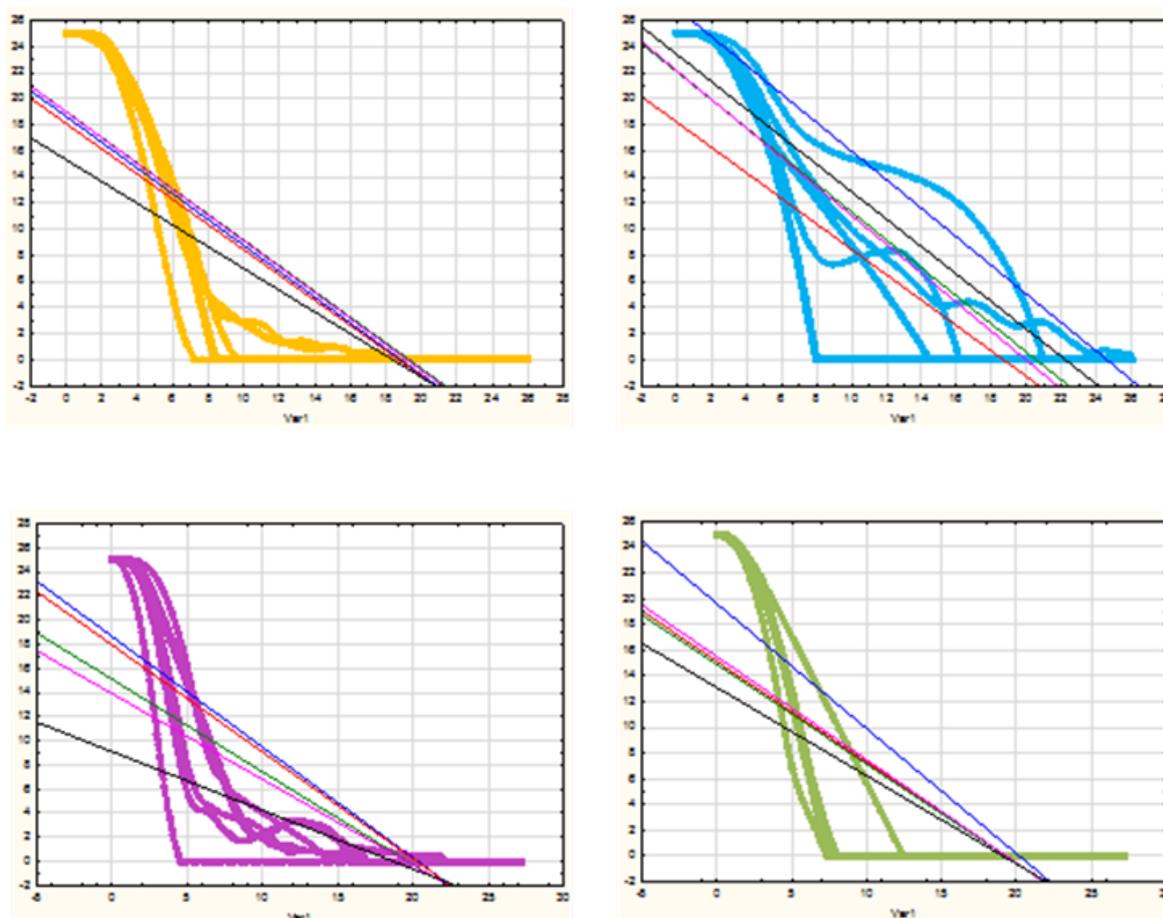


Fig. 9. Altitude moyenne en fonction du temps et du type d'information disponible

Conclusion

Il apparaît clairement que la réalité virtuelle offre des perspectives de recherche nombreuses, prometteuses et déjà très largement exploitées dans le domaine des sciences du mouvement. Les dispositifs s'améliorant au fil des années, il est possible d'avoir des simulations d'interaction avec un temps réel de plus en plus effectif, c'est-à-dire des délais de

mise à jour qui se réduisent. De plus, les espaces de mouvement s'accroissent et les graphismes gagnent en réalisme jusque dans la représentation de personnages virtuels. Ces progrès permettent la mise en place de questionnements et de manipulations de plus en plus élaborés afin de mieux comprendre le fonctionnement des processus perceptifs et moteurs impliqués dans les interactions avec l'environnement virtuel et réel. Il est, dans ce contexte, tentant de se laisser séduire par des simulateurs toujours plus performants et impressionnants par leur qualité technologique. Il faut cependant être bien conscient que si l'utilisation se situe dans le cadre d'une démarche expérimentale qui n'est pas directement liée à l'amélioration des simulateurs, il faut éviter de tomber dans le piège d'une escalade technologique qui l'emporte sur la valeur de la question scientifique. Pour illustrer ce propos, deux récentes études de Maroua Mallek réalisées dans le cadre de sa thèse montrent qu'une amélioration de la tâche virtuelle vers plus de réalisme ou de sophistication n'est pas forcément la garantie de résultats plus pertinents. Dans une première étude, il a été possible de montrer, en utilisant une tâche virtuelle de poursuite visuomanuelle 2D sur tablette graphique consistant à suivre une cible mobile, que des experts en sport de balle se différenciaient clairement de novices et de moins experts dans leur précision et la qualité de la poursuite. Cette étude a permis de montrer que la qualité des couplages entre perception et action au niveau des délais de régulation était un élément majeur pour comprendre l'expertise dans les sports de balle. Pour confirmer ce résultat et en obtenir de plus nets dans une tâche plus proche de la réalité, une étude impliquant une simulation en 3D ajoutant donc la profondeur associée à des lunettes stéréoscopiques a été mise au point. Il est apparu dans un premier temps que la tâche n'était pas discriminante de l'expertise. Les différences entre experts et novices ne sont finalement apparues qu'après avoir traité séparément dans les trois dimensions verticales, horizontales et de profondeur de la tâche de poursuite. Ainsi, des différences entre experts et novices ne sont apparues que dans les dimensions verticales et horizontales déjà traitées dans la première expérience mais pas dans la profondeur. Il est à ce stade prématuré de conclure de manière tranchée sur ce résultat, mais il pourrait signifier qu'un environnement virtuel 2D est suffisant pour révéler l'expertise en sport de balle dans la mesure où elle se manifeste principalement dans ces dimensions. Dans ces conditions, une simulation plus élaborée et qui paraît plus proche de la réalité est non seulement inutile mais peut atténuer ou masquer des effets pourtant présents. Ce dernier exemple montre la nécessité d'une adéquation entre la problématique et les possibilités offertes par la technologie de réalité virtuelle utilisée.

Bibliographie

- Abernethy B. (1991), « Visual strategies and decision-making in sport », *International Journal of Sport Psychology*, 22, p. 189-210.
- Adamovich S.-V., Fluet, G.-G., Tunik E., Merians A.-S. (2009), « Sensorimotor training in 496 virtual reality : a review », *NeuroRehabilitation*, 25, 1, p. 29-44.
- Arzamarski R., Harrison S.-J., Hajnal A., Michaels C.-F. (2007), « Ball interception : hand movements during linear ball trajectories », *Experimental Brain Research*, 177, 3, p. 312-323.

- Baurès R., Benguigui N., Amorim M.-A., Siegler I.-A. (2007), « Intercepting free falling objects : better use Occam's razor than internalize Newton's law », *Vision research*, 47, 23, p. 2982-2991.
- Bideau B., Kulpa R., Vignais N., Brault S., Multon F. et Craig C. (2010), « Using virtual reality to analyze sports performance », *IEEE Computer Graphics and Applications*, 30, 2, p. 14-21.
- Dessing J.-C., Craig C.-M. (2010), « Bending It Like Beckham: How to Visually Fool the Goalkeeper », *PLoS ONE*, 5, 10 : e13161. doi:10.1371/journal.pone.0013161
- Faure V., Lobjois R., Benguigui N. (2016), « The effects of driving environment complexity and dual tasking on drivers' mental workload and eye blink behavior », *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour*, 40, p. 78-90.
- Flach J.-M., Hagen B.-A., Larish J.-F. (1992), « Active regulation of altitude as a function of optical texture », *Perception & Psychophysics*, 51, 6, p. 557-568.
- Gibson, J.-J. (1979), *The Ecological Approach to Visual Perception*, Boston, Houghton Mifflin.
- Goldberg B., Amburn C., Brawner K., Westphal, M. (2014), « Developing models of expert performance for support in an adaptive marksmanship trainer », *Proceedings of the Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference (I/ITSEC)*, Orlando, FL.
- Gray R., Regan D., Castaneda B. et Sieffert R. (2006), « Role of feedback in the accuracy of perceived direction of motion-in-depth and control of interceptive action », *Vision Research*, 46, 10, p. 1676-1694.
- Jacobs D.-M., Michaels, C.-F. (2006), « Lateral interception I : operative optical variables, attunement, and calibration », *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 32, p. 443-458.
- Kennedy R., Stanney K., Dunlap W. (2000), « Duration and Exposure to Virtual Environments : Sickness Curves During and Across Sessions », *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 9, 5, p. 463-472.
- Le Runigo C., Benguigui N., Bardy B.-G. (2010), « Visuo-Motor Delay, Information-Movement Coupling and Expertise in Ball Sport », *Journal of Sports Sciences*, 28, p. 327-337.
- Mantel B., Bardy B.-G., Stoffregen T. (2008), « Critical boundaries and median values in affordance perception », in *Studies in perception and action*, IX, S. Cummins-Sebree, M.-A. Riley, K. Shockley (Eds.), Mahwah, Erlbaum, p. 222-225.
- Marr D.-A. (1982), *Vision : A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*, New York, W. H. Freeman and Company.
- McIntyre J., Zago M., Berthoz A., Lacquaniti F. (2001), « Does the brain model Newton's Laws ? », *Nature Neuroscience*, 4, 7, p. 693-694.
- Montagne G., Laurent M., Durey A. and Bootsma R.-J. (1999), « Movement reversals in ball catching », *Experimental Brain Research*, 129, p. 87-92.
- Morice A., Siegler I. et Bardy B. (2008), « Action-perception patterns in virtual ball bouncing : Combating system latency and tracking functional validity », *Journal of neuroscience methods*, 169, 1, p. 255-266.
- Neisser U. (1967), *Cognitive psychology*, New York, Appleton-Century-Crofts.

- Peper L., Bootsma R.-J., Mestre D.-R., Bakker F.-C. (1994), « Catching Balls : how to get the Hand to the right Place at the right Time », *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 20, p. 591-612.
- Reimer B., D'Ambrosio L.-A., Coughlin J.-F., Kafrisen M.-E., Biederman J. (2006), « Using self-reported Data to assess the Validity of Driving Simulation Data », *Behavior Research Methods*, 38, 2, p. 314-324.
- Rowe R.-M., McKenna F.-P. (2001), « Skilled Anticipation in real-World Tasks : Measurement of attentional Demands in the Domain of Tennis », *Journal of Experimental Psychology. Applied*, 7, p. 60-67.
- Savelsbergh G.-J.-P., Van der Kamp J. (2000), « Information Learning to co-ordinate and control Movements : Is there a Need for Specificity of Practice ? », *International Journal of Sport Psychology*, 31, p. 467-484.
- Schmidt R.-A., Lee T.-D. (2011), *Motor Control and Learning : a behavioral Emphasis*, Champaign (IL), Human Kinetics.
- Slater M., Usoh M. (1993), « Presence in immersive virtual environments », in *Virtual Reality Annual International*, p. 90-96.
- Stoffregen T., Bardy B.-G., Smart L.-J., Pagulayan R. (2003), « On the Nature and Evaluation of Fidelity in virtual Environments », in *Virtual and adaptive Environments : Applications, Implications, and human Performance Issues*, L.-J. Hettinger, M.-W. Haas (Eds.), p. 111-128.
- Treutwein B., Strasburger H. (1999), « Fitting the psychometric function », *Perception & Psychophysics*, 61, 1, p. 87-106.
- Van Erp J.-B., Veen H.-A.-V., Jansen C., Dobbins T. (2005), « Waypoint Navigation with a vibrotactile waist Belt », *ACM Transactions on Applied Perception*, 2, 2, p. 106-117.
- Warren W.-H. (1988), « Actions Mode and Laws of Control for the visual Guidance of Action », In *Complex Movement Behavior : « The » Motor-Action Controversy*, O.-G. Meijer and K. Roth (Eds.), Amsterdam, p. 339-380.
- Warren W.-H. (2006), « The Dynamics of Perception and Action », *Psychological Review*, 113, p. 358-389.
- Wright W.-G. (2014), « Using virtual Reality to augment Perception, Enhance Sensorimotor 647 Adaptation, and Change our Minds », *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8, 56.
- Zago M., Bosco G., Maffei V., Losa M., Ivanenko Y.-P., Lacquaniti F. (2004), « Internal Models of Target Motion : Expected Dynamics Overrides measured Kinematics in Timing manual Interceptions », *Journal of Neurophysiology*, 91, p. 1620-1634.

Le syndrome d'Ehlers-Danlos type hypermobile : évolution des stratégies posturales en réponse à un programme de rééducation à visée somesthésique

Emma G. Dupuy¹, Arthur Maneuvrier¹, Elodie Vlamynck¹, Stéphane Besnard¹, Boris Bienvenu^{1,2}, Leslie M. Decker¹

1 : Université de Caen Normandie, INSERM, COMETE, 14000 Caen, France.

2 : Département de Médecine Interne, Centre Hospitalier Universitaire de Caen, 14033 Caen, France.

Introduction

Le syndrome d'Ehlers-Danlos (SED) est un groupe mixte de maladies héréditaires dont la caractéristique commune est une modification structurelle des différents collagènes, se répercutant par une altération du tissu conjonctif. Cette altération est à l'origine d'une symptomatologie multisystémique dominée par une hyperlaxité articulaire, une modification de l'élasticité et une fragilité du tissu cutané. Ce syndrome se subdivise en treize formes établies selon leurs origines pathogéniques¹. Au sein du SED, le type hypermobile (SEDh) constitue la forme la plus rencontrée avec une prévalence approximative de 1 cas pour 5000 habitants à 1 pour 20 000, dont 82% de femmes. Bien que son origine génétique demeure encore non établie, la présence conjointe d'une hypermobilité articulaire généralisée et d'une hyperélasticité cutanée variable accompagnées de troubles proprioceptifs, permet son diagnostic². Plus spécifiquement, de précédentes études menées sur le SEDh ont récemment démontré la présence de troubles de la proprioception articulaire, constituant potentiellement le principal facteur altérant l'autonomie fonctionnelle des patients³. Une hypothèse forte quant au fondement neurophysiologique de ces troubles postule que l'hypermobilité généralisée propre au SEDh induit une extension excessive et répétée des ligaments, détériorant, de fait, l'intégrité des récepteurs proprioceptifs articulaires (i.e. récepteurs de Pacini et de Ruffini, et organes tendineux de Golgi). Toutefois, on peut émettre l'hypothèse que, conjointement à l'altération du signal proprioceptif, la modification de l'élasticité cutanée affecte la transmission des pressions provenant des mécanorécepteurs cutanés vers les aires corticales. Il apparaît donc probable que, plus qu'une altération de la proprioception, les patients atteints de SEDh présentent un déficit somesthésique. Ainsi, les déficits fonctionnels majeurs présentés par ces patients, tels que les chutes ou les maladresses, les enfermant parfois dans la kinésiophobie⁴, pourraient être la résultante directe de ce déficit.

En effet, les informations somesthésiques, issues des muscles, des articulations et de la peau, jouent un rôle déterminant dans la perception, l'équilibre et, plus globalement, le mouvement. Selon les modèles proposés à l'heure actuelle, l'équilibre et le mouvement sont tous deux fondés sur l'intégration hétéromodale d'informations sensorielles provenant de

¹ Malfait *et al.* 2017.

² Malfait *et al.* 2017 ; Castori *et al.* 2017.

³ Rombaut *et al.* 2010 ; Clayton *et al.* 2015.

⁴ Rombaut *et al.* 2012.

trois systèmes : visuel, vestibulaire et somesthésique. Ces informations sont partiellement redondantes et malgré leur grande spécificité certaines d'entre elles peuvent être utilisées de manière équivalente⁵. Leur intégration par le système nerveux central permet l'élaboration de trois référentiels spatiaux, égocentrique (corps), géocentrique (gravité) et allocentrique (objets externes), qui contribuent de façon déterminante au développement de modèles internes fortement impliqués dans le contrôle de l'équilibre et du mouvement⁶. Au sein des processus sensorimoteurs, le concept de modèles internes fait référence aux processus neuronaux responsables de la synthèse des informations provenant des différentes modalités sensorielles, ainsi que de la combinaison des informations efférentes et afférentes afin de résoudre les ambiguïtés dans la perception des informations sensorielles⁷. Également, le traitement sensoriel est un mécanisme flexible⁸. En effet, le système nerveux central module continuellement le poids attribué à chaque modalité sensorielle pour fournir une représentation interne dynamique⁹. Ce processus aussi appelé « dynamique rapide », correspond à la stratégie sensorielle adoptée par l'individu et lui permet de toujours générer une réponse musculaire appropriée, à même de maintenir et d'adapter l'équilibre et le mouvement à un environnement en constante évolution¹⁰. Cette dynamique d'adaptation rapide est partiellement variable d'un individu à l'autre, et dépend d'une « dynamique lente », fruit des apprentissages (e.g. pratique sportive) et de l'état physiologique de l'individu (e.g. pathologie, vieillissement), qui vont tous deux moduler les réseaux neuronaux sous-tendant l'intégration sensorielle.

La notion de « stratégie posturale » fait directement référence à cette dynamique rapide qui régit l'utilisation des entrées sensorielles adoptée par un individu pour maintenir son équilibre en toute situation. Ces stratégies évoluant en réponse à la pathologie, au vieillissement, ou à l'apprentissage, de nombreux travaux de recherche ont investigué la question dans le cadre de l'étude du contrôle postural¹¹. Ainsi, plusieurs auteurs se sont intéressés à la contribution de chacune des entrées sensorielles au contrôle postural. Divers types de perturbation ont donc été développés afin de permettre une évaluation spécifique de l'utilisation de chaque modalité sensorielle pour le contrôle postural (e.g. vibrations tendineuses, stimulation galvanique, vision stabilisée)¹². Ainsi, la réaction d'un individu à une perturbation sensorielle permet de quantifier indirectement l'importance de cette modalité sensorielle dans les stratégies de contrôle mises en place par le sujet pour s'équilibrer. Dans cette optique, Vaugoyeau *et al.* 2007¹³ ont développé un paradigme d'oscillations lentes du support (i.e. en dessous du seuil de détection des informations vestibulaires canalaire), atténuant la contribution de l'entrée vestibulaire au contrôle postural, et permettant ainsi, lorsqu'il est effectué les yeux fermés, de quantifier l'utilisation des informations somesthésiques¹⁴. Grâce à ce paradigme, les auteurs sont parvenus à démontrer un déficit

⁵ Lacour *et al.* 1997 ; Massion 1992.

⁶ Gurfinkel *et al.* 2016 ; Massion 1994 ; Mergner & Rosemeier 1998.

⁷ Merfeld *et al.* 1999.

⁸ Peterka 2002.

⁹ Van der Kooij *et al.* 2001 ; Zupan *et al.* 2002 ; Peterka & Loughlin 2003 ; Logan *et al.* 2014.

¹⁰ Nashner 1976 ; Assländer & Peterka 2014 ; Chiba *et al.* 2016.

¹¹ Freeman *et al.* 2016 ; Nashner *et al.* 1982 ; Nashner & Peters 1990, Shumway-Cook & Woollacott, 2000 ; Oie *et al.* 2002 ; Eikema *et al.* 2014.

¹² Nashner *et al.* 1982 ; Séverac Cauquil *et al.* 2000 ; Caudron *et al.* 2008 ; Vaugoyeau *et al.* 2007.

¹³ Vaugoyeau *et al.* 2007.

¹⁴ Henn *et al.* 1980.

dans l'intégration centrale des informations proprioceptives chez des patients parkinsoniens¹⁵. De la même manière, nous souhaitons appliquer ce paradigme chez des patients SEDh afin de quantifier leur capacité à utiliser les informations somesthésiques pour le maintien de leur équilibre.

Parallèlement, il a été démontré que les patients parkinsoniens compensaient leurs troubles proprioceptifs par une utilisation accrue des informations visuelles¹⁶. Plus globalement, de précédentes études conduites sur sujets âgés ou atteints de déficiences sensorielles ont également montré ce phénomène de compensation caractérisé par un fort recrutement des informations visuelles¹⁷. La méthode la plus communément employée pour quantifier l'utilisation des informations visuelles est de provoquer le retrait de cette dernière en demandant aux sujets de fermer les yeux¹⁸. Toutefois, il semble possible qu'au-delà d'une utilisation plus importante de l'entrée visuelle, les individus présentant une déficience somesthésique développent une dépendance au champ visuel. En effet, I.-V. Bonan et ses collègues¹⁹ ont démontré, chez les patients présentant une hémiplégie altérant l'intégration somesthésique et/ou vestibulaire, une utilisation excessive de l'entrée visuelle pour le contrôle postural. Pour expliquer ce phénomène, les auteurs ont émis l'hypothèse que cette dépendance au champ visuel résulterait directement de l'altération de l'intégration centrale d'une autre modalité sensorielle (i.e. somesthésique ou vestibulaire), ou d'une incapacité à sélectionner au niveau cortical l'information sensorielle pertinente. Il apparaît donc possible que les patients SEDh présentant une altération de l'entrée somesthésique adoptent une stratégie posturale principalement fondée sur une utilisation excessive de l'entrée visuelle. Afin de quantifier cette visuo-dépendance, nous avons choisi d'appliquer une méthode consistant à mettre le sujet face à une information visuelle incongruente avec les autres informations sensorielles reçues (i.e. somesthésique et vestibulaire), notamment à travers la projection de scènes mouvantes au sein de la salle immersive²⁰. Ainsi, les patients ayant développé une visuo-dépendance auront tendance à se reposer sur l'entrée visuelle bien qu'elle ne soit plus fiable, et présenteront, de fait, une altération de leur contrôle postural.

Lors de cette étude, nous avons donc poursuivi deux objectifs : i) définir l'impact du déficit somesthésique propre au SEDh sur les stratégies posturales, et ii) évaluer l'effet d'une cure de rééducation somesthésique sur ces stratégies. Nous avons donc émis les hypothèses suivantes : i) le déficit somesthésique associé au SEDh se traduira par une moindre contribution de la somesthésie au contrôle postural, induisant, de ce fait, une plus grande utilisation des informations d'origine vestibulaire et visuelle, allant jusqu'à la visuo-dépendance, et ii) la rééducation permettra au SNC d'utiliser à nouveau les informations somesthésiques pour le contrôle postural, et par conséquent, de diminuer la visuo-dépendance.

¹⁵ Vaugoyeau *et al.* 2008.

¹⁶ Azulay *et al.* 2002.

¹⁷ Lord & Webster 1990 ; Isableu *et al.* 1997.

¹⁸ Bronstein *et al.* 1990 ; Chong *et al.* 1999.

¹⁹ Bonan *et al.* 2004.

²⁰ Wade & Jones 1997 ; Balestrucci *et al.* 2017.

Matériel et Méthodes

1. Participants

Le SEDh affectant principalement des femmes (plus de 90%³⁹), seules des femmes ont été incluses dans cette étude. Six patientes atteintes du SEDh (6 femmes; moyenne d'âge \pm SD : 42.6 \pm 12.0 ans) et six sujets contrôles appareillés en sexe et en âge (43 \pm 15.37 ans) ont participé. La sélection des patientes a été effectuée dans le Département de Médecine Interne du Centre Hospitalier Universitaire de Caen. Les patientes ont été incluses sur la base des critères révisés de Villefranche, dont: i) une hypermobilité articulaire généralisée, ii) une hyperélasticité cutanée, iii) des douleurs musculo-squelettiques chroniques, et/ou iv) des antécédents familiaux positifs²¹. Les patientes ont été exclues si elles présentaient : i) une incapacité à maintenir l'équilibre en position debout pendant une minute, et ii) d'autres pathologies pouvant influencer directement sur le contrôle postural (e.g. la maladie de Ménière). Les sujets contrôles sains ont été recrutés via un appel à participation local. Ils ont été exclus s'ils présentaient : i) des troubles neurologiques, en particulier des pathologies du système vestibulaire (i.e. test de Fukuda²²) ou des troubles orthopédiques (i.e. analyse de la répartition des pressions plantaires à l'aide d'un podoscope) qui pourraient affecter leur contrôle postural, ii) une pathologie affectant les articulations, ou iii) un score de Beighton > 4/9. Toutes les participantes ont été invitées à prendre connaissance de la notice d'information et du formulaire de consentement libre et éclairé, puis à les dater et à les signer.

2. Procédure expérimentale

Les six patientes ont donc participé à une rééducation (cure de trois semaines) orientée spécifiquement sur le renforcement de la somesthésie. Cette rééducation comprenait : i) des exercices d'équilibration sur plate-forme de force, de la balnéothérapie, de la kinésithérapie, et des activités physiques adaptées. Les contenus de l'entraînement (i.e. durée, intensité, temps de récupération, répétitions, progressivité) ont été discutés et définis par l'équipe soignante et des rééducateurs, et adaptés à chaque patiente. Les tests d'exploration fonctionnelle se sont déroulés une semaine avant la cure pour les patientes et les sujets contrôles, puis une semaine après la cure pour les patientes uniquement.

2.1. Évaluation du contrôle postural

Instrumentation. Les déplacements du centre de pression (CP) dans les directions antéropostérieure et médiolatérale ont été enregistrés grâce à deux plate-formes de forces intégrées dans le tapis GRAIL (*Gait Real-time Analysis Interactive Lab*, Motek Forcelink). L'acquisition a été faite à une fréquence d'échantillonnage de 300 Hz via le logiciel D-Flow,

²¹ Beighton *et al.* 1998.

²² Fukuda 1959.

permettant de synchroniser l'environnement virtuel avec le tapis (i.e. son inclinaison en condition dynamique).

Protocole expérimental. Les participantes devaient se tenir debout, les bras le long du corps, les pieds formant un angle de 30°, avec le regard fixé vers l'horizon. L'évaluation du contrôle postural comprenait sept essais de 60 secondes avec 20 secondes de repos entre chaque essai. Les signaux de départ et de fin étaient donnés respectivement 3 secondes avant et après chaque essai. Cinq conditions ont été effectuées : i) contrôle, ii) atténuation vestibulaire, iii) privation visuelle, iv) privation visuelle plus atténuation vestibulaire, et v) perturbation visuelle (figure 1). Pour minimiser les effets de l'ordre de présentation des conditions pendant les tests (e.g. effet de fatigue), toutes les conditions ont été randomisées et un essai à blanc a été effectué avant chaque passation.

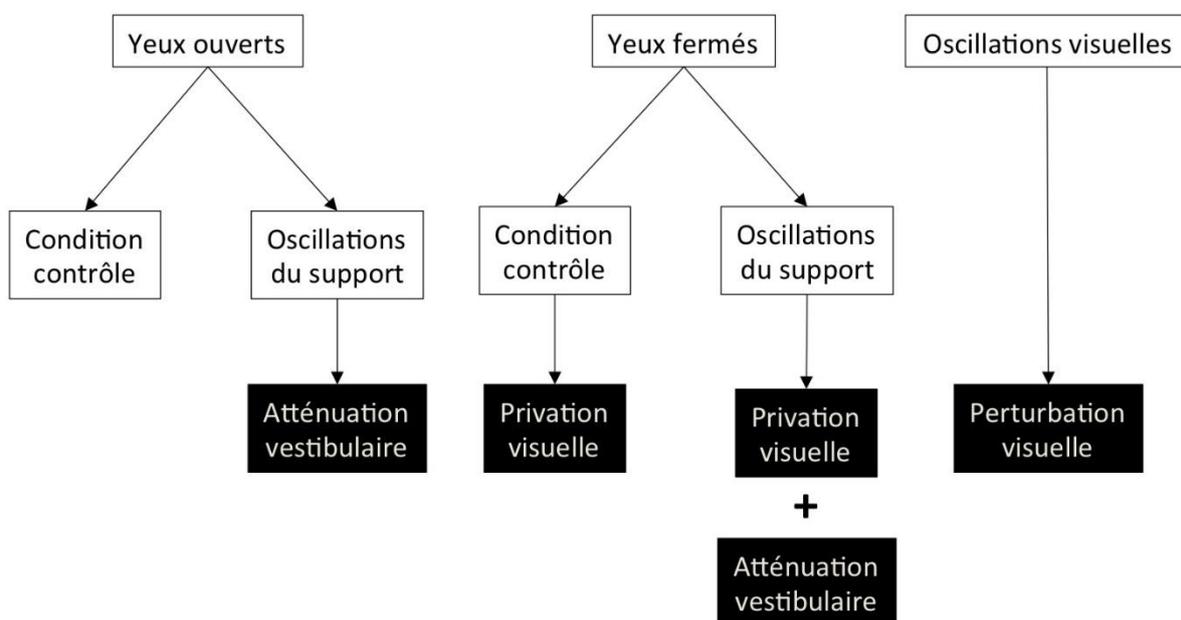


Fig. 1 : Protocole expérimental

2.2. Manipulation des entrées sensorielles

Atténuation vestibulaire. Les participantes devaient se tenir debout pendant 60 secondes sur un support (i.e. tapis GRAIL) en mouvement, yeux ouverts ou fermés. Le support effectuait alors des oscillations sinusoïdales antéropostérieures à une fréquence de 0.016 Hz, une amplitude totale de 10°, et une vitesse de 0,33°/s (>1°/s, seuil de détection vestibulaire²³). L'accélération angulaire maximum du support était en dessous du seuil de détection vestibulaire²⁴, à savoir 0.02 °/s². Ainsi, si certaines accélérations angulaires dues aux mouvements de la tête pouvaient être observées, ces accélérations ne permettaient pas à la participante d'être renseignée sur les mouvements du support, et n'étaient donc pas impliquées dans les adaptations posturales résultant de la perturbation induite.

²³ Fitzpatrick & McCloskey 1994.

²⁴ Henn *et al.* 1980.

Privation et perturbation visuelles. L'entrée visuelle a été manipulée à travers deux conditions : une condition de privation visuelle où les participantes devaient garder les yeux fermés (YF) et une condition de perturbation visuelle (YP). Cette dernière consistait en une inclinaison lente de l'environnement visuel (virtuel), projeté sur les trois écrans entourant la participante, dans la direction antéropostérieure. Les oscillations de l'environnement visuel ont été paramétrées à l'aide du logiciel D-Flow selon les mêmes paramètres que ceux appliqués lors des conditions d'oscillation du support (i.e. amplitude totale : 10° ; fréquence : 0.016 Hz).

3. Analyse des données

3.1. Paramètre d'intérêt

La vitesse moyenne de déplacement du CP dans la direction antéropostérieure (Vit-AP : cm/s) a été retenue comme variable dépendante. Ce paramètre a été choisi en raison de sa fiabilité pour les comparaisons inter-conditions, intra-sujet²⁵.

3.2. Analyses statistiques

La variable Vit-AP ne suivant pas une distribution normale d'après le test de Shapiro-Wilk, les analyses statistiques furent effectuées avec des tests non paramétriques.

Un test de Mann-Whitney a été utilisé pour comparer la Vit-AP entre les deux groupes (patientes vs. contrôles). Un test de Friedman a été utilisé pour déterminer s'il existait une différence dans la Vit-AP en fonction des conditions expérimentales avant la rééducation. Lorsque le test de Friedman se révélait significatif, un test de Wilcoxon pour échantillons appariés a été utilisé pour effectuer des comparaisons deux à deux. Parallèlement, un test de Wilcoxon a été utilisé afin de déterminer l'impact de la rééducation somesthésique. Enfin, des corrélations de Pearson (r) ont été réalisées entre les différentes conditions expérimentales. Le niveau alpha de significativité a été fixé à 0.5, et les analyses ont été réalisées avec le logiciel Statistica (version 10, Statsoft, Inc., Tulsa, OK, USA).

Résultats

1. Privation et perturbation de l'entrée visuelle

Pré-cure. La manipulation de l'entrée visuelle paraît influencer le contrôle postural des patientes SEDh (Test de Friedman : $p = 0.03$). Lorsque l'ensemble des informations sensorielles était disponibles et cohérentes (condition contrôle), les patientes ont montré un contrôle postural similaire à celui des sujets contrôles (Test de Mann-Whitney : $p = 1$, $U = 15$). A contrario, lors du retrait de la vision, leur contrôle postural tendait à se détériorer (i.e. Vit-AP augmentée) en comparaison à celui des sujets contrôles (Test de Mann-Whitney : $p = 0.082$,

²⁵ Rugelj et al. 2015.

U = 5). Les résultats du test de Wilcoxon ont confirmé ces observations en révélant une dégradation du contrôle postural des patientes lors du retrait de la vision ($p = 0.03$, $Z = 2.20$), et, dans une moindre mesure, lors de la perturbation visuelle ($p = 0.11$, $Z = 1.57$). Dans cette dernière condition, on observe toutefois une importante variabilité interindividuelle chez les patientes. Parallèlement, aucun effet de la modulation de l'entrée visuelle n'a été observé chez les sujets contrôles.

Post-cure (figure 2). Les patientes ont montré un contrôle postural similaire à celui des sujets contrôles indépendamment de la disponibilité et de la cohérence des informations visuelles (Test de Mann-Whitney : YO : $p = 0.429$, $U = 20$; YF : $p = 0.931$, $U = 14$; YP : $p = 0.247$, $U = 22$). Précisément, le contrôle postural s'est amélioré dans la condition de privation visuelle (Test de Wilcoxon : $p = 0.03$, $Z = 2.20$), et, dans une moindre mesure (i.e. tendance), dans la condition de perturbation visuelle (Test de Wilcoxon : $p = 0.11$, $Z = 1.57$). De surcroît, la dégradation du contrôle postural induite par le retrait ou la perturbation de l'entrée visuelle, observée avant la cure, ne s'observe plus après la cure (Test de Friedman : $p = 0.297$).

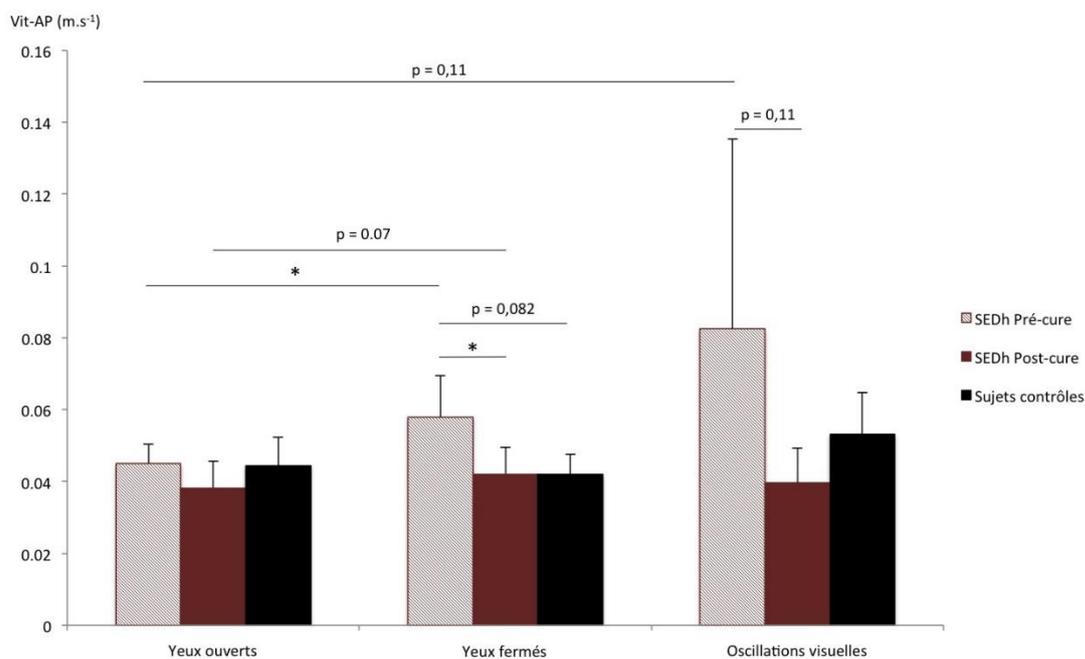


Fig. 2 : Post-cure 1

2. Atténuation de l'entrée vestibulaire

Pré-cure. Lorsque les entrées vestibulaires ont été atténuées dans la condition YO, les patientes ont montré un contrôle postural similaire à celui des sujets contrôles (Test de Mann-Whitney : $p = 0.428$, $U = 20$). A contrario, en l'absence de vision (YF), leur contrôle postural s'est trouvé altéré (Test de Wilcoxon : $p = 0.05$, $Z = 1.99$), avec une forte variabilité interindividuelle. Cet effet n'a pas été observé chez les sujets contrôles.

Post-cure (figure 3). Le contrôle postural des patientes s'est amélioré, et ce indépendamment de la présence ou de l'absence de la vision (Test de Wilcoxon : YO : $p = 0.03$, $Z = 2.20$; YF: $p = 0.03$, $Z = 2.20$). De plus, il est intéressant de noter que la variabilité interindividuelle observée chez les patientes a diminué dans la condition de privation visuelle (écart-type, pré-cure : $\pm 0.373 \text{ m.s}^{-1}$; post-cure : $\pm 0.057 \text{ m.s}^{-1}$).

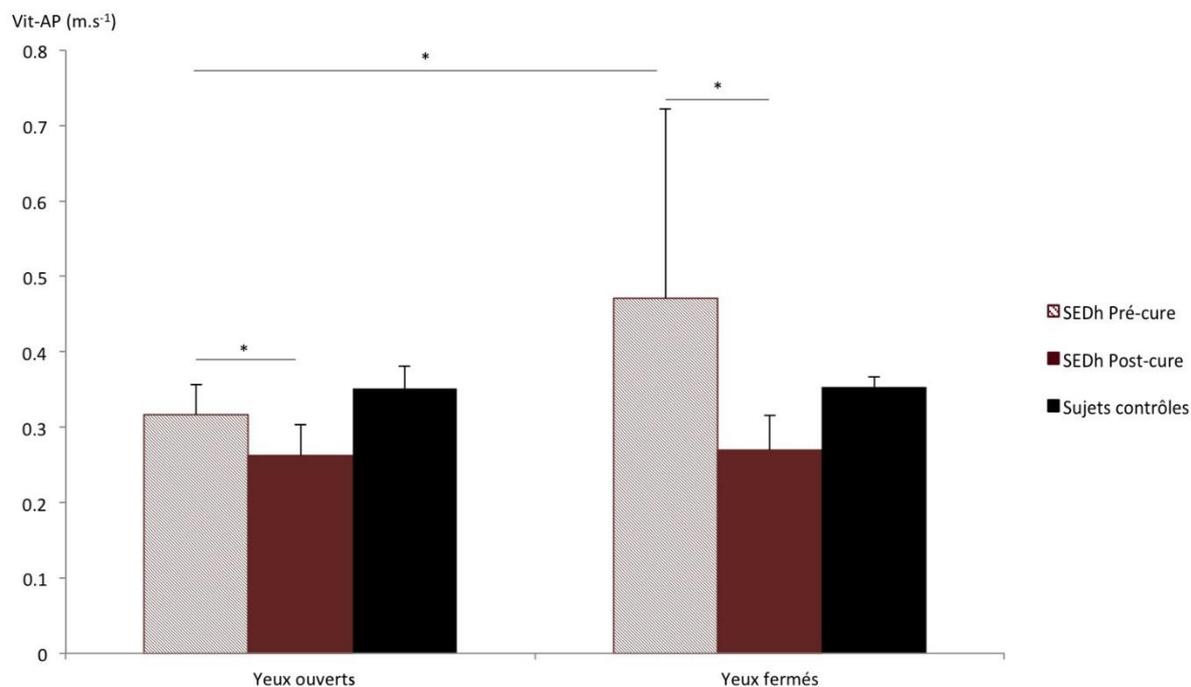


Fig. 3 : Post-cure 2

Corrélation (figure 4). Un lien entre Vit-AP dans la condition de perturbation visuelle et Vit-AP dans la condition de privation visuelle avec atténuation vestibulaire ($r = 0.082$) a été observé. Toutefois, une des patientes a montré, dans ces deux conditions, une augmentation de Vit-AP très nettement supérieure à celle des autres patientes.

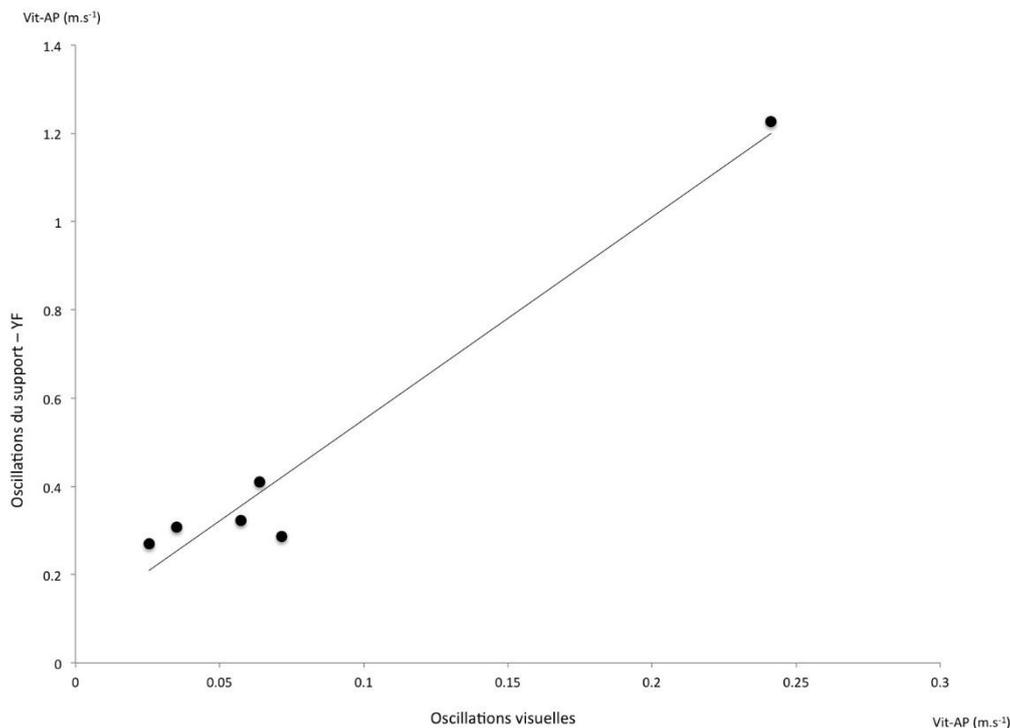


Fig. 4 : Corrélation

Discussion

1. Stratégies posturales pré-cure

Contrairement aux résultats observés lors de précédentes études, en condition contrôle, les patientes SEDh présentent un contrôle postural similaire à celui des sujets contrôles²⁶. Ce résultat suggère que les traitements thérapeutiques effectués par les patientes en amont de la cure auraient permis, au moins en partie, une réhabilitation de leur capacité à s'équilibrer. Toutefois, nos résultats montrent également que les patientes présentent des difficultés à recruter l'information somesthésique pour le contrôle postural. En effet, dans la condition associant atténuation vestibulaire et privation visuelle, le contrôle postural est altéré chez les patientes, car il repose surtout sur leur capacité à utiliser les informations somesthésiques²⁷. Toutefois, dans cette condition, une grande variabilité interindividuelle a été observée chez les patientes, probablement en raison du fait que : i) les traitements effectués en amont de la cure auraient induit une réhabilitation variable de l'utilisation de l'entrée somesthésique, et/ou ii) les patientes présenteraient différents degrés de sévérité de la pathologie. Cette dernière hypothèse semble cohérente car cette hétérogénéité est également relevée dans les observations cliniques. La variabilité interindividuelle s'exprime notamment sur le plan fonctionnel, allant d'un léger déséquilibre en position debout à une perte importante de la mobilité (i.e. utilisation du fauteuil roulant). C'est d'ailleurs la raison pour laquelle le SEDh a été récemment redéfini pour introduire, dans sa description, la notion de

²⁶ Galli *et al.* 2011 ; Rigoldi *et al.* 2013 ; Rombaut *et al.* 2011.

²⁷ Vaugoyeau *et al.* 2007.

« spectre d'expression pathogénique »²⁸. Dans ce contexte, il apparaît raisonnable de postuler que nos patientes SEDh présentaient certainement différents degrés de sévérité, sans pour autant exclure un potentiel impact différencié induit par les différentes prises en charge thérapeutiques effectuées en amont de la rééducation. Parallèlement, la dégradation du contrôle postural des patientes dans les deux conditions de privation et de perturbation visuelles, indique qu'elles présentent d'importantes difficultés pour maintenir leur équilibre lors de la manipulation de l'entrée visuelle. Ces résultats confirment ainsi une utilisation préférentielle des informations visuelles de la part des patientes. De façon intéressante, lorsque l'entrée visuelle est perturbée, les performances des patientes sont également très hétérogènes. En effet, dans cette condition les informations visuelles n'étaient pas absentes, mais incongruentes par rapport à celles fournies par les systèmes vestibulaires et somesthésiques. Dès lors, le contrôle postural des participantes dépendait de leur capacité à inhiber cette information erronée et à repondérer leur utilisation des informations sensorielles en faveur des informations vestibulaire et somesthésique. On peut donc raisonnablement émettre l'hypothèse que les patientes présentent une capacité variable à inhiber les informations visuelles, bien qu'elles ne soient plus pertinentes, et donc différents degrés de visuodépendance. De plus, leur visuodépendance semble être corrélée à leur capacité à utiliser les informations somesthésiques. Autrement dit, plus les patientes sont en capacité de recruter les informations somesthésiques pour le contrôle postural, plus elles sont en mesure d'inhiber une entrée visuelle non pertinente. Enfin, les patientes présentent des performances similaires à celle des sujets contrôles lors de la condition d'atténuation des informations vestibulaires les yeux ouverts, excluant donc a priori un phénomène de compensation du déficit somesthésique par une augmentation de l'utilisation des entrées vestibulaires. Toutefois, dans le cadre de cette étude, nous n'avons mesuré le contrôle postural des patientes qu'au moyen du calcul de la vitesse de déplacement du centre de pression dans la direction antéropostérieure. Bien que ce paramètre ait déjà démontré sa fiabilité, l'utilisation d'autres paramètres d'évaluation du contrôle postural apparaît possible, notamment l'utilisation de paramètres non linéaires issus de la théorie des systèmes dynamiques²⁹. Ces paramètres sont à même de décrire la structure temporelle des fluctuations posturales (ou structure dynamique des oscillations posturales), renseignant sur le degré de complexité de celles-ci. Ces dernières permettraient donc d'apporter une description qualitative du contrôle postural des patientes. Il est donc possible d'émettre l'hypothèse qu'une analyse utilisant ces paramètres aurait permis de révéler des modifications atypiques du contrôle postural chez les patientes complémentaires à celles observées durant cette étude.

2. Stratégies posturales post-cure

Globalement, les patientes présentent une meilleure adaptation de leur équilibre dans l'ensemble des conditions de challenge sensoriel, suggérant ainsi que la rééducation aurait permis la modification de leurs stratégies posturales. Plus spécifiquement, l'amélioration du contrôle postural des patientes lors de la condition associant atténuation vestibulaire et

²⁸ Castori *et al.* 2017.

²⁹ Stergiou & Decker 2011 ; Ramdani *et al.* 2011.

privation visuelle, indique une meilleure capacité à utiliser les informations somesthésiques pour le contrôle postural. Parallèlement, la manipulation des entrées visuelles apparaît induire un impact moins important sur le contrôle postural des patientes. Le renforcement de l'intégration somesthésique induit par la rééducation aurait permis aux patientes de mettre en place de nouvelles stratégies posturales moins dépendantes à l'égard des informations visuelles. De façon similaire, Bonan *et al.* 2004 ont montré, chez des patients hémiplegiques, une diminution du phénomène de visuodépendance suite à leur participation à un programme de rééducation orienté sur l'équilibre. Toutefois, cette même étude a aussi montré un effet potentialisé des exercices sur la visuodépendance lorsqu'ils étaient pratiqués en l'absence de vision. Face à ce constat, les auteurs ont donc émis l'hypothèse que la privation visuelle induite par ces exercices amène les patients à adopter des stratégies posturales de compensation fondées sur une plus grande utilisation des entrées somesthésique et vestibulaire. Le programme de rééducation, mis en œuvre dans le cadre de la présente étude, visait un renforcement du schéma corporel à travers la « stimulation » de l'intégration centrale des informations somesthésiques par des exercices orientés sur la « conscience du corps ». L'objectif de ce programme était donc la création de nouveaux substrats neuronaux sous-tendant de nouvelles stratégies sensorimotrices plus équilibrées incluant l'utilisation des informations somesthésiques. L'ensemble des résultats obtenus par les patientes après la rééducation confirme la présence d'un renforcement somesthésique. La meilleure adaptation de leur équilibre aux contraintes expérimentales suggère que ce renforcement a permis aux patientes de développer une utilisation plus équilibrée des entrées sensorielles (i.e. plus grande flexibilité des mécanismes de repondération sensorielle). Au regard des résultats obtenus par Bonan *et al.* 2004, il pourrait également être intéressant d'envisager de coupler des exercices de renforcement somesthésique à des exercices de privation visuelle afin de potentialiser les effets de la rééducation.

Conclusion

Les explorations fonctionnelles conduites durant cette étude nous ont donc permis de mettre en lumière un manque d'adaptabilité dans le contrôle postural des patientes atteintes du SEDh. Ce manque d'adaptabilité apparaît résulter d'un déséquilibre dans la contribution des différents systèmes sensoriels aux stratégies posturales adoptées par les patientes, ces stratégies reposant sur une utilisation excessive de l'entrée visuelle. Suite à la rééducation, nos observations confirment la présence d'une amélioration de l'intégration des informations somesthésiques. Cette contribution accrue de l'entrée somesthésique semble libérer les patientes de leur visuodépendance. Leurs performances reflètent alors la mise en place de nouvelles stratégies posturales fondées sur une utilisation plus équilibrée des entrées sensorielles. Ce phénomène se traduit par une meilleure adaptabilité de leur équilibre, et par conséquent, serait à l'origine d'une plus grande flexibilité dans les mécanismes de repondération sensorielle. Cette étude ouvre donc de nouvelles perspectives pour la prise en charge thérapeutique du SEDh. A travers ses résultats, elle nous a permis de mieux comprendre les mécanismes sensorimoteurs sous-tendant les déficits fonctionnels propres au SEDh, ainsi que les processus en jeu dans leur remédiation. Toutefois cette étude mériterait d'être reproduite sur un échantillon plus large, afin de prendre en compte la forte hétérogénéité

inhérente au SEDh et de comprendre son impact sur les mécanismes sensorimoteurs à travers l'étude du contrôle postural.

Remerciements

Cette recherche a été financée par l'École doctorale Normande de Biologie Intégrative, Santé et Environnement (financement de la doctorante, Mme Emma Dupuy), les Fonds Européen de Développement Régional Basse-Normandie (financement du tapis GRAIL, Motekforce Link), et la Société Francophone Posture Équilibre Locomotion (SOFPEL ; Bourse sur projet Jeune Chercheur). Nous remercions sincèrement l'Association des Patients Normands Ehlers-Danlos (APNED, Présidente : Dr Claire El Moudden), les participantes de notre étude, ainsi que toute l'équipe du Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle (CIREVE) de l'Université de Caen Normandie.

Bibliographie

- Assländer L., Peterka R.-J. (2014), « Sensory reweighting dynamics in human postural control », *J. Neurophysiol.*, 111, 9, p. 1852-1864.
- Azulay J.-P., Mesure S., Amblard B., Pouget J. (2002), « Increased visual dependence in Parkinson's disease », *Percept. Mot. Skills*, 95, 3, p. 1106-1114.
- Balestrucci P., Daprati E., Lacquaniti F., Maffei V. (2017), « Effects of visual motion consistent or inconsistent with gravity on postural sway », *Exp. brain Res.* Doi: 10.1007/s00221-017-4942-3.
- Beighton P., De Paepe A., Steinmann B., Tsipouras P., Wenstrup R.-J. (1998), « Ehlers-Danlos syndromes : revised nosology, Villefranche », *Ehlers-Danlos National Foundation (USA) and Ehlers-Danlos Support Group (UK), Am. J. Med. Genet.*, 77, 1, p. 31-37.
- Bonan I.-V., Colle F.-M., Guichard J.-P., Vicaut E., Eisenfisz M., Tran Ba Huy P. *et al.* (2004), « Reliance on visual information after stroke. Part I : Balance on dynamic posturography », *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 85, 2, p. 268-273.
- Bonan I.-V., Yelnik A.-P., Colle F.-M., Michaud C., Normand E., Panigot B. *et al.* (2004), « Reliance on visual information after stroke. Part II : effectiveness of a balance rehabilitation program with visual cue deprivation after stroke: a randomized controlled trial », *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 85, 2, p. 274-278.
- Bronstein A.-M., Hood J.-D., Gresty M.-A., Panagi C. (1990), « Visual control of balance in cerebellar and parkinsonian syndromes », *Brain*, 113, p. 767-777.
- Castori M., Tinkle B., Levy H., Grahame R., Malfait F., Hakim A. (2017), « A framework for the classification of joint hypermobility and related conditions », *Am. J. Med. Genet. Part C Semin. Med. Genet.*, 175, 1, p. 148-157.
- Caudron S., Boy F., Forestier N., Guerraz M. (2008), « Influence of expectation on

- postural disturbance evoked by proprioceptive stimulation », *Exp. Brain Res.*, 184, 1, p. 53-59.
- Chiba R., Takakusaki K., Ota J., Yozu A., Haga N. (2016), « Human upright posture control models based on multisensory inputs ; in fast and slow dynamics », *Neurosci. Res.*, 104, p. 96-104.
- Chong R.-K., Horak F.-B., Woollacott M.-H. (1999), « Time-dependent influence of sensorimotor set on automatic responses in perturbed stance », *Exp. Brain Res.*, 124, 4, p. 513-519.
- Clayton H.-A., Jones S.-A.-H., Henriques D.-Y.-P. (2015), « Proprioceptive precision is impaired in Ehlers–Danlos syndrome », *Springerplus*, 4, 1, p. 323.
- Eikema D.-J.-A., Hatzitaki V., Tzovaras D., Papaxanthis C. (2014), « Application of intermittent galvanic vestibular stimulation reveals age-related constraints in the multisensory reweighting of posture », *Neurosci. Lett.*, 561, p. 112-117.
- Fitzpatrick R., McCloskey D.-I. (1994), « Proprioceptive, visual and vestibular thresholds for the perception of sway during standing in humans », *J. Physiol.*, 1, p. 173-186.
- Freeman L., Gera G., Horak F.-B., Blackinton M.-T., Besch M., King L. (2016), « Instrumented Test of Sensory Integration for Balance », *J. Geriatr. Phys. Ther.*, p. 1.
- Fukuda T. (1959), « The stepping test : two phases of the labyrinthine reflex », *Acta Otolaryngol.*, 50, 2, p. 95-108.
- Galli M., Rigoldi C., Celletti C., Mainardi L., Tenore N., Albertini G. *et al.* (2011), « Postural analysis in time and frequency domains in patients with Ehlers-Danlos syndrome », *Res. Dev. Disabil.*, 32, 1, p. 322-325.
- Gurfinkel V.-S., Lipshits M.-I., Mori S., Popov K.-E. (2016), « Stabilization of body position as the main task of postural regulation », *Hum. Physiol.*, 7, 3, p. 155-165.
- Henn V., Cohen B., Young L.-R. (1980), « Visual-vestibular interaction in motion perception and the generation of nystagmus », *Neurosci. Res. Program Bull.*, 18, 4, p. 457-651.
- Isableu B., Ohlmann T., Cremieux J., Amblard B. (1997), « Selection of spatial frame of reference and postural control variability », *Exp. Brain Res.*, 114, 3, p. 584-589.
- Lacour M., Barthelemy J., Borel L., Magnan J., Xerri C., Chays A. *et al.* (1997), « Sensory strategies in human postural control before and after unilateral vestibular neurotomy », *Exp. Brain Res.*, 115, 2, p. 300-310.
- Logan D., Kiemel T., Jeka J.-J. (2014), « Asymmetric Sensory Reweighting in Human Upright Stance », *PLoS One*, 9, 6, e100418.
- Lord S.-R., Webster I.-W. (1990), « Visual field dependence in elderly fallers and non-fallers », *Int. J. Aging Hum. Dev.*, 31, 4, p. 267-277.
- Malfait F., Francomano C., Byers P., Belmont J., Berglund B., Black J. *et al.*

- (2017), « The 2017 international classification of the Ehlers-Danlos syndromes », *Am. J. Med. Genet. Part C Semin. Med. Genet.*, 175, 1, p. 8-26.
- Massion J. (1992), « Movement, posture and equilibrium : Interaction and coordination », *Prog. Neurobiol.*, 38, 1, p. 35-56.
- Massion J. (1994), « Postural control system », *Curr. Opin. Neurobiol.*, 4, 6, p. 877-887.
- Merfeld D.-M., Zupan L., Peterka R.-J., « Humans use internal models to estimate gravity and linear acceleration », *Nature*, 398, 6728, 1999, p. 615-618.
- Mergner T., Rosemeier T. (1998), « Interaction of vestibular, somatosensory and visual signals for postural control and motion perception under terrestrial and microgravity conditions - a conceptual model », *Brain Res. Rev.*, 28, 1-2, p. 118-135.
- Nashner L.-M. (1976), « Adapting reflexes controlling the human posture », *Exp. Brain Res.*, 26, 1, p. 59-72.
- Nashner L.-M., Black F.-O., Wall C. (1982), « Adaptation to altered support and visual conditions during stance : patients with vestibular deficits », *J. Neurosci.*, 2, 5, p. 536-544.
- Nashner L.-M., Peters J.-F. (1990), « Dynamic posturography in the diagnosis and management of dizziness and balance disorders », *Neurol. Clin.*, 8, 2, p. 331-349.
- Oie K.-S., Kiemel T., Jeka J.-J. (2002), « Multisensory fusion : simultaneous re-weighting of vision and touch for the control of human posture », *Brain Res. Cogn. Brain Res.*, 14, 1, p. 164-176.
- Peterka R.-J. (2002), « Sensorimotor integration in human postural control », *J. Neurophysiol.*, 88, 3, p. 1097-1118.
- Peterka R.-J., Loughlin P.-J. (2003), « Dynamic Regulation of Sensorimotor Integration in Human Postural Control », *J. Neurophysiol.*, 91, 1, p. 410-423.
- Ramdani S., Seigle B., Varoqui D., Bouchara F., Blain H., Bernard P.-L. (2011), « Characterizing the dynamics of postural sway in humans using smoothness and regularity measures », *Ann Biomed. Eng.*, 39, 1, p.161-171.
- Rigoldi C., Cimolin V., Camerota F., Celletti C., Albertini G., Mainardi L. *et al.* (2013), « Measuring regularity of human postural sway using approximate entropy and sample entropy in patients with Ehlers–Danlos syndrome hypermobility type », *Res. Dev. Disabil.*, 34, 2, p. 840-846.
- Rombaut L., De Paepe A., Malfait F., Cools A., Calders P. (2010), « Joint position sense and vibratory perception sense in patients with Ehlers–Danlos syndrome type III (hypermobility type) », *Clin. Rheumatol.*, 29, 3, p. 289-295.
- Rombaut L., Malfait F., De Wandele I., Thijs Y., Palmans T., De Paepe A. *et al.* (2011), « Balance, gait, falls, and fear of falling in women with the hypermobility type of Ehlers-Danlos syndrome », *Arthritis Care Res. (Hoboken)*, 63, 10, p. 1432-1439.

- Rombaut L., Malfait F., De Wandele I., Taes Y., Thijs Y., De Paepe A. *et al.* (2012), « Muscle mass, muscle strength, functional performance, and physical impairment in women with the hypermobility type of Ehlers-Danlos syndrome », *Arthritis Care Res. (Hoboken)*, 64, 10, p. 1584-1592.
- Rugelj D., Hrastnik A., Sevšek F., Vauhnik R. (2015), « Reliability of modified sensory interaction test as measured with force platform », *Med Biol Eng Comput.*, 53, 6, p. 525-534.
- Séverac Cauquil A., Martinez P., Ouaknine M., Tardy-Gervet M.-F. (2000), « Orientation of the body response to galvanic stimulation as a function of the inter-vestibular imbalance », *Exp. brain Res.*, 133, 4, p. 501-505.
- Shumway-Cook A., Woollacott M. (2000), « Attentional demands and postural control : the effect of sensory context », *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.*, 55, 1, p. 10-16.
- Stergiou N., Decker L.-M. (2011), « Human movement variability, nonlinear dynamics, and Pathology : is there a connection ? », *Hum Mov. Sci.*, 5, p. 869-888.
- Van der Kooij H., Jacobs R., Koopman B., Van der Helm F. (2001), « An adaptive model of sensory integration in a dynamic environment applied to human stance control », *Biol. Cybern.*, 84, 2, p. 103-115.
- Vaugoyeau M., Viel S., Assaiante C., Amblard B., Azulay J.-P. (2007), « Impaired vertical postural control and proprioceptive integration deficits in Parkinson's disease », *Neuroscience*, 146, 2, p. 852-863.
- Vaugoyeau M., Viel S., Amblard B., Azulay J.-P., Assaiante C. (2008), « Proprioceptive contribution of postural control as assessed from very slow oscillations of the support in healthy humans », *Gait Posture*, 27, 2, p. 294-302.
- Wade M.-G., Jones G. (1997), « The role of vision and spatial orientation in the maintenance of posture », *Phys. Ther.*, 77, 6, p. 619-628.
- Zupan L.-H., Merfeld D.-M., Darlot C. (2002), « Using sensory weighting to model the influence of canal, otolith and visual cues on spatial orientation and eye movements », *Biol. Cybern.*, 86, 3, p. 209-230.

Réalité virtuelle et humain augmenté : subjectivation, désobjectivation ?

Catherine Weismann-Arcache

Université de Rouen

**Co-Directrice équipe Traumatismes Individuels et Familiaux, Laboratoire Psy-Nca
(EA 4700)**

Co-Responsable D.U. Travail avec les Familles, Université de Rouen

Dans la perspective annoncée par le titre, je vais situer ma place discursive, la place de laquelle je parle, ce qui me permet aussi d'exposer mon cheminement, de la clinique du vivant à la réflexion et à la recherche. Je m'inscris dans un paradigme de recherche qualitative et non quantitative. Si je suis Maître de conférences HDR en Psychologie Clinique et en psychopathologie, je suis également une psychologue clinicienne – et une ancienne psychologue scolaire - et je reçois aujourd'hui en libéral beaucoup d'enfants et leurs familles, pour des évaluations psychologiques et des psychothérapies. En tant qu'enseignant-chercheur, après une thèse que j'avais intitulée *Quand j'étais grand. Le développement et la temporalité psychique à l'épreuve de la précocité intellectuelle* (et le virtuel est en rapport avec la temporalité, avec une inversion enfant-adulte dans le cas du titre de cette thèse), j'ai élargi depuis mon champ de recherches à *L'anachronisme et la dysharmonie comme organisateurs contemporains des processus de développement, de pensée et de parentalité* ». Une partie des recherches présentées ici concerne des univers virtuels anachroniques à travers des reconstitutions espace-temps déjà explorées au siècle dernier par Freud et sa métaphore archéologique¹ ! La réalité virtuelle pourrait faire partie de ces organisateurs contemporains, ces nouveaux métacadres sociaux. Pour le sujet qui nous occupe aujourd'hui, ce sont les cliniques contemporaines qui m'y ont conduite, avec deux entrées, que je développerai ensuite, qui ont ouvert une voie de questionnement et de réflexions, éveillant la méfiance de la praticienne, mais aussi la curiosité du chercheur en sciences de l'homme et de la société que je suis :

- d'une part j'ai constaté une extension du concept de handicap à des troubles où difficultés d'apprentissages qui n'en sont pas toujours, du point de vue de psychopathologues et pédopsychiatres, ce qui a donné lieu à une augmentation des dispositifs que j'appellerai prothétiques, et qui ont posé de tout temps la question de la fiction, de l'illusion, du simulacre, et de l'idéalisation qui peut les sous-tendre. Si ces dispositifs -et ce séminaire le montre- permettent à des sujets handicapés de vivre le mieux possible parmi les hommes, on constate un glissement du sujet handicapé au sujet augmenté, les non handicapés revendiquant également cette augmentation de

¹ Freud 1939, 10-15.

leurs performances, notamment à travers l'hybridation homme-machine. Au risque de passer de soigner à réparer, puis augmenter.

- D'autre part mes petits patients, enfants et adolescents, me parlaient beaucoup de leurs jeux vidéo. Travaillant avec les objets culturels et de symbolisation appartenant à l'univers enfantin, jeux symboliques, contes, histoires ou scénarii produits par l'enfant à partir de figurines (Play-Mobil) j'ai interrogé des enfants tout venants, sur le thème : « *dis-moi, raconte-moi, à quoi tu joues, comment tu joues* » et je comprendrai qui tu es. Je m'appuie également sur les travaux de S. Bellevergue, dont la thèse en cours porte sur *Le jeu vidéo comme traitement de la dépressivité chez l'adolescent* en comparant l'utilisation du jeu vidéo chez des adolescents tout venant, et l'utilisation thérapeutique du jeu vidéo. Car le jeu vidéo peut aussi être utilisé comme une médiation thérapeutique, un objet malléable et partageable, qui peut être le support et le vecteur de changement relationnels, internes, au même titre que d'autres médiateurs tels que le jeu symbolique.

Pour les psychologues cliniciens qui se sont approchés et emparés de la réalité virtuelle, la problématique peut se décliner ainsi : qu'en est-il du rapport entre la réalité virtuelle et ce qu'on appelle aujourd'hui le processus de subjectivation ? Autrement dit, la révolution numérique - au sens d'une rupture anthropologique² - aura-t-elle des effets de désobjectivation, déshumanisation, avec l'hybridation homme-machine, ou offre-t-elle de nouveaux espaces humanistes et empathiques, notamment pour le développement du petit humain. Je vais mettre en perspective ces deux termes virtuel et processus de subjectivation/désobjectivation, puis j'essaierai de circonscrire les enjeux, les limites, les apports et les risques de la réalité virtuelle, éclairée par ceux qu'on appelle aujourd'hui les psychistes, les psys.

Deviens ce que tu es ... quand tu l'auras appris

Le mot virtuel a, en effet, un sens qui va au-delà du sens technologique : nous parlons d'un virtuel psychique, le virtuel est ce qui peut advenir - dans certaines conditions -, il est un potentiel, un possible. Pour Serge Tisseron³, nous sommes habités par le virtuel psychique dès la naissance. C'est une représentation de nous-mêmes qui s'inscrit dans une anticipation et une tentative de faire coïncider cette anticipation avec la réalité perceptive, mais aussi plus largement ce qu'on appelle la réalité externe. R. Roussillon⁴ a conceptualisé cet emboîtement réalité psychique, réalité biologique, réalité matérielle. Il arrive que le virtuel ne puisse pas s'actualiser dans la réalité externe, matérielle, faute de rencontres avec un environnement susceptible d'en favoriser l'expression, la réalisation. Les anciens, médecins, psychanalystes, comme Winnicott, ou Bion, parlaient déjà, à propos des bébés, de potentiels pour l'un et de pré-conceptions pour l'autre qui a davantage travaillé sur la naissance de la pensée. Pour des chercheurs contemporains, comme Trevarthen⁵, c'est la mère qui occupe cette place de « l'autre virtuel » dans les préconceptions du bébé : il n'en a pas une représentation définie, claire, mais elle est investie, anticipée avant d'exister pour l'enfant⁶.

² Benasayag 2016.

³ Tisseron, 2012.

⁴ Roussillon *et al.* 2007.

⁵ Trevarthen & Aitken 2003.

⁶ Lebovici 1983.

Bien plus ancien, on connaît cet aphorisme de Nietzsche « deviens ce que tu es », inspiré de Pindare, poète grec du V^e siècle avant Jésus-Christ, mais cette citation a une suite « quand tu l'auras appris ». L'aphorisme initial que l'on doit à Pindare souligne la nécessité d'une transmission comme condition fondamentale de la subjectivation : la deuxième partie de la formule vient contrebalancer le fantasme d'auto-engendrement qui pouvait transparaître dans la première partie, devenir ce que l'on est, certes, mais après l'avoir appris ou reçu.

Ce qui peut signifier qu'il faut du temps, et en effet « le virtuel n'est pas l'opposé du réel, mais de l'actuel »⁷. Il faut du temps et de la relation à mon sens. Neurosciences, génétique et psychanalyse s'accordent aujourd'hui sur bien des points et en particulier sur celui d'épigenèse interactionnelle⁸ : les biologistes soulignent que si rien ne peut se développer sans un codage génétique préalable, inversement les gènes ne peuvent s'exprimer sans qu'il existe un environnement qui favorise leur expression, en fournissant les éléments nécessaires. Ce qui vaut pour la biologie vaut aussi pour l'être humain : certains gènes ou combinaisons génétiques ne vont pouvoir actualiser leur potentiel que dans un environnement relationnel qui le permette. Le terme récent « plasticité neuronale ou cérébrale » signifie que le cerveau se construit aussi en fonction de l'expérience, et pas seulement en fonction de données génétiques premières. Cette épigenèse interactionnelle articule facteurs génétiques et environnementaux au sein d'une combinaison, d'une conception plastique du fonctionnement biologique.

Pour certains auteurs et philosophes (Aristote), le virtuel ne se différencie pas du potentiel, alors que pour d'autres le potentiel « est un devenir sans traduction dans le présent »⁹. Or le virtuel a la particularité de se manifester au présent. Aujourd'hui cependant la dimension temporelle du virtuel peut être effacée par une extension de la réalité virtuelle, la réalité augmentée, et son corollaire l'homme augmenté.

Subjectivité et réalité augmentée

En ce qui concerne le deuxième terme, la subjectivation, c'est un processus qui permet de se construire dans la relation à l'autre, et nous avons des concepts émergents comme le terme intersubjectivité, qui l'accompagne, soutenue par un tiers : il s'agit d'un travail, d'un processus de différenciation de soi, toujours médiatisé par autrui, qui opère dès la conception de l'enfant, pierre angulaire de la vie psychique, de la transmission, et du traitement psychothérapeutique : il s'agit de se créer des représentations, images, mouvements, mots, qui soient validés par l'expérience et par les rencontres, sans s'y aliéner. Le terme subjectivation peut prêter à confusion car dans d'autres disciplines il ne recouvre pas uniquement la relation avec un être humain, ce peut-être un film, un objet, un livre¹⁰.

Cette relation entre deux êtres humains, peut donc être destinée dans un second temps, à s'élargir aux objets, voire des objets médiateurs, le but étant de développer les capacités de symbolisation, en appui sur deux piliers que sont l'identification et l'empathie. De ce point de

⁷ Tisseron 2012.

⁸ Cosnier & Charavel 1998, 79-87.

⁹ Tisseron 2012, 5.

¹⁰ Searles 1960.

vue, la réalité virtuelle, et plus précisément la réalité augmentée et les mondes immersifs que constituent les jeux vidéo, peuvent être appréhendés comme des *pharmaka*, terme grec qui signifie aussi bien remède que poison. Pour ce qui est du poison, sans être alarmiste ou technophobe, l'intention thérapeutique louable d'aider les sujets handicapés, vieillissants ou présentant des maladies neuro-dégénératives, en utilisant des prothèses, ou en implantant des puces électroniques, peut connaître des desseins paradoxaux : permettre à des personnes handicapées de vivre avec les autres le mieux possible, en améliorant leur condition humaine est tout à fait remarquable. Mais, très vite, on a tenté de faire d'un homme sans jambes un sportif de haut niveau, à l'aide de prothèses, ce qui fait passer de l'amélioration à l'augmentation (le terme « enhancement » pouvant avoir les deux traductions). Et le commun des mortels de briguer cette augmentation des performances inscrite dans une perspective défectologique qui nous focalise encore et toujours sur ce qui nous manque, en termes de panne, la panne suprême étant la mort. La prothèse conduit aussi au mythe du post-humain, ou du transhumain, le transhumanisme étant un mouvement qui vise à reculer toujours plus les limites de la condition humaine, à la faveur de la révolution numérique, en imaginant même une cybervie après la mort du corps, qui, *in fine*, serait simplement déconnecté. Cela passe par l'hybridation humain/technologie, mais aussi par l'interaction avec l'ordinateur et les objets dits « intelligents » ou connectés.

« Être augmenté, c'est, par exemple, ne plus avoir besoin de dormir, bénéficier de performances maximales grâce au dopage, utiliser la chirurgie plastique et modifier son corps pour le rendre plus esthétique, ou l'ouvrir à de nouvelles sensations, de nouvelles interactions grâce à l'introduction de la technologie à l'intérieur ou la périphérie de son corps. C'est expérimenter l'authentique par amélioration de l'humeur (mood-enhancement), garder des traits jeunes, travailler 25 heures par jour parce qu'une prothèse n'est jamais fatiguée. C'est enfiler un exosquelette et marcher alors que je suis para- ou tétraplégique, ou porter des charges très lourdes comme dans le cadre militaire, jusqu'à devenir une sorte de surhomme »¹¹.

La modélisation des mécanismes du cerveau sur le modèle des intelligences artificielles, « l'homme neuronal », a identifié le cerveau humain à un ordinateur et a nourri l'idée d'un cerveau augmenté. On se trouve alors face à un glissement métonymique réducteur qui fait de la pensée, de l'intelligence et du cerveau, des entités équivalentes, ce qui, sur le terrain, influence nos représentations de l'enfant qui pense, et de l'enfant qui est pensé. Les troubles des apprentissages des enfants sont renvoyés au handicap et suscitent une hyperactivité réparatrice du côté des professionnels. Je vois ainsi des enfants qui ne peuvent ou ne veulent écrire, soumis à un découpage harassant de leur temps d'enfant : 2 séances d'ergothérapie par semaine, plus 2 séances d'orthoptie, à l'école, plus une séance d'orthophonie à l'école. La psychothérapie est destinée à faire accepter ces dispositifs prothétiques : apprentissage du clavier d'ordinateur, auxiliaire de vie scolaire, table inclinée. Un jour une fillette de 6 ans, dans ce cas, me dit « si c'est comme cela je préfère encore écrire ! », ce que j'ai trouvé plutôt sain, et elle s'est mise à écrire. Car à 6 ans, elle n'était pas seulement une enfant diagnostiquée handicapée, dyspraxique, elle était aussi une sœur jumelle, et la fille de parents venant de se séparer : la perspective défectologique ne suffit pas au virtuel psychique. Écrire à la main ou

¹¹ Thiel 2015,141-161.

avec un clavier, ce n'est pas la même chose : Benasayag¹² fait état de recherches récentes qui prennent en compte la modifiabilité cérébrale. Il explique combien « les informations corporelles modèlent le cerveau » en permanence, d'où « le rôle central des dimensions sensori-motrices dans la production de la pensée », et à un autre niveau, des représentations spatio-temporelles issues des mouvements du corps et de ses déplacements dans l'espace. Le cerveau peut ainsi mettre en place des suppléances. La machine ne compense pas une partie abîmée du logiciel ou du matériel, elle ne se modifie pas, elle répète en permanence à l'identique¹³, elle n'a pas de plasticité, et de sensibilité aux modifications, même infimes de l'environnement, contrairement au cerveau. Et de citer les étudiants qui savent bien que pour comprendre, s'approprier un cours, rien de plus efficace que de le recopier ou de le synthétiser à la main. Le cerveau va se sculpter à travers des apprentissages qui mobilisent le corps, ce qui va même créer de nouvelles connexions et des réseaux neuronaux. Si l'information est conservée dans un ordinateur, le cerveau se sculpte moins. Le rôle de l'hippocampe a été évoqué ce matin, dans ce sens.

Subjectivité et jeux vidéo

Plus positivement, et comme pour toute innovation humaine, c'est bien l'usage qui en est fait qui doit être problématisé, pensé : je vais aborder l'aspect structurant, symbolisant du jeu vidéo. Les jeux vidéo s'intègrent dans des « univers immersifs ¹⁴», cette immersion passant par l'interactivité. Ils participent aussi d'une logique du jeu, souvent issue des collections : collectionner des cartes, des monstres (Pokemon), additionner des pouvoirs, dans un registre obsessionnel caractéristique de la période de latence dans le meilleur des cas, et dans une quête d'objets échouant à colmater les angoisses de perte, dans les cas plus pathologiques¹⁵. Pour l'instant, je me suis intéressée surtout aux jeux dits « bac à sable », car comme le sable ils ont une certaine malléabilité et une certaine transformabilité. La plupart de ces jeux invitent l'enfant à construire un environnement qu'on pourrait qualifier de « secure » et l'avatar est peu modifiable. Le jeu Minecraft en est un exemple, et on peut y jouer en mode survie, selon qu'on va mettre en scène des relations clivées, destructrices, de type attaque/défense, ou en mode créatif qui offre beaucoup plus de variantes : une fillette de 6 ans me dit « en mode créatif tu meurs jamais et t'as pas besoin de tuer ». La matière première étant des cubes qui vont servir à toutes sortes de transformations : fabriquer le personnage, le paysage, les matières premières, la maison, puis les outils et les armes. Un autre jeu plus sophistiqué, les SIMS, permet de créer des avatars plus différenciés, sexués, des familles, et de les faire évoluer dans un univers, maison, ville, en en prenant soin : la notion américaine de « care », soin, est convoquée. Ces jeux reproduisent bien les conditions subjectives du développement du petit être humain : il s'agit de se construire dans un « environnement suffisamment bon », comme le disait Winnicott. Selon les jeux, une importance plus grande est accordée à l'environnement, ou à l'avatar : on y retrouve le processus de symbolisation, et au-delà de création, car l'enfant qui joue, qui rêve aussi, recrée le monde à son idée, tout comme le font les écrivains et les

¹² Benasayag 2016.

¹³ *Ibid*, 58-59.

¹⁴ Brougère 2008, 5-21.

¹⁵ Weismann-Arcache 2003, 186-190.

artistes. Du côté de l'avatar, l'enfant (mais aussi l'adolescent et l'adulte) y projette des versions de lui-même idéalisées, ou y exprime des mouvements agressifs à l'abri de ce personnage virtuel, ou encore des désirs inexprimables. Alors bien sûr il y a une idéologie des jeux vidéo, tout s'achète quand on joue en réseau, et ils s'inscrivent bien aussi dans cette visée expansive des capacités humaines et de la performance, qu'on appelle « le Self Quantified » : comptabiliser nos pas, le nombre de phases de sommeil paradoxal que nous traversons en une nuit, ou encore le nombre de cafés que nous buvons par jour. Certains jeux vidéo sont fondés uniquement sur le gain, jusqu'à additionner les morts dans les jeux de guerre. Ces jeux dits « doom-like » ne favorisent pas ces aller-retour entre le « game » (jeu de règles assez peu modifiables) et on parle de gameurs, et le « playing » (jeu symbolique) selon la distinction établie par Winnicott, qui ouvre au processus de subjectivation le plus souvent dans un jeu partagé. Concernant les fantasmes, les jeux vidéo sont très imprégnés de l'inflation narcissique de notre époque, qui nous incite à vouloir et être tout, sans les limites de notre condition humaine qui sont celles de l'avant vie et de l'après vie, et aussi les limites à notre toute-puissance que représentent les différences : ainsi dans les SIMS, les hommes peuvent être enceints. Les enfants m'ont également raconté de belles cosmogonies, des créations du monde et on peut y déchiffrer les questions existentielles de tous les petits enfants sur l'origine et la fin. Ainsi, Sidonie, 10 ans, me raconte que, dans *Pokemon Origine*, « un monsieur voulait rendre le monde meilleur et utiliser un pokemon ancestral pour rendre le monde meilleur, pour repartir du début... mais si on éveille ce Pokemon ancestral, cela va déclencher des catastrophes, le chaos ». Belle illustration du besoin de savoir chez l'enfant, de la culpabilité qui peut s'y associer, et illustration théorique de l'impact des traumatismes transgénérationnels.

La réalité virtuelle, qui doit, à mon sens, conserver sa qualité virtuelle car trop de réalité tue le virtuel, exprime les possibles de la pensée et de la recherche. Elle ne peut soutenir uniquement l'inflation narcissique qui ne tolère ni le hasard et l'aléatoire, ni la différence qui est perçue comme un manque, tout comme les limites de la temporalité humaine et ses bornes « naissance » ou « conception », et « mort ». Notre époque n'a pu éradiquer la complexité, malgré les promesses du paradigme de la modernité qui proposait de plus en plus de maîtrise de la réalité biologique, matérielle, et psychique, « qui nous promettait un savoir total, capable d'émanciper l'homme de toute servitude¹⁶ ». Benasayag définit la complexité comme un concept qui prend en compte l'existence structurelle et non pas accidentelle, de « dimensions de non-savoir où l'aléatoire est irréductible »¹⁷. L'aléatoire est intrinsèque au vivant, il ramène à la temporalité, à l'histoire, et à l'inconscient.

Conclusion : Dédale, le père d'Icare

Ces fantasmes d'hybridation et d'augmentation ne sont pas nouveaux, et plusieurs mythes l'évoquent, dont le mythe d'Icare, qu'on peut lire comme une tentative échouée d'hybridation, mais aussi comme un raté de la transmission : le père d'Icare, celui qui a fabriqué les ailes de cire qui vont fondre au soleil, c'est Dédale. Dédale est un ingénieur grec, son habileté et son

¹⁶ Benasayag 2016, 27.

¹⁷ *Ibid.*

ingéniosité en ont fait une référence pour les réalisations humaines. C'est aussi un apprenti sorcier qui fabrique une machine, simulacre de génisse, dans laquelle se dissimule Pasiphaé, femme de Minos, afin de s'accoupler au taureau blanc qui appartient à Minos son mari. De cette union hybride machine/animal/humain, hors nature et hors mariage, naîtra le Minotaure. Le roi Minos demandera à Dédale de construire le labyrinthe où sera enfermée la créature monstrueuse (il y enfermera aussi Dédale, plus tard, pour le punir de ses tromperies). Le génie technique de Dédale est utilisé comme un leurre, un artifice, puis comme un antidote, un remède, pour finir par se retourner contre lui¹⁸. Il s'agit d'un auto-engendrement permanent à travers des créations qui visent à maîtriser l'origine et la fin, le vivant et la mort. Dans ces conditions, point de transmission : ainsi Dédale invente la statue à l'aspect très vivant, des outils comme la hachette, le fil à plomb, la vrille et la colle. Menaçant d'être surpassé par un de ses apprentis qui avait imaginé le compas et la scie métallique, en s'inspirant d'une mâchoire de serpent, Dédale jaloux va précipiter ce jeune apprenti, qui serait aussi son neveu, du haut de l'Acropole. Il y a donc un précédent (qui donne lieu à répétition) car on peut s'interroger sur ce père très doué qui fabrique pour son fils des ailes de plumes et de cire, tout en lui enjoignant de ne pas trop s'approcher du soleil... À son tour, le fils chutera car enivré par son vol, il ne regardera pas son père et ne l'imitera pas. La prothèse et l'imitation empêchent le processus identificatoire, la technique à valeur ajoutée reniant le processus de transmission qui transcende le virtuel.

Bibliographie

- Benasayag M. (2016), *Cerveau augmenté, homme diminué*, Paris, La Découverte.
- Brogère B. (2008), *La ronde des jeux et des jouets*, Paris, Autrement, p. 5-21.
- Cosnier, J., Charavel, M. (1998), « Développement théorico-clinique du concept d'épigénèse interactionnelle », *Psychiatrie Française*, 29, 3, p. 79-87.
- Freud S. (1939), *Le malaise dans la culture*, Paris, Quadrige/Presses Universitaires de France.
- Lebovici S. (1983), *Le nourrisson, la mère et le psychanalyste*, Paris, Le Centurion.
- Martin, R. (1998), *Dictionnaire culturel de la mythologie gréco-romaine*, Paris, Nathan.
- Roussillon R. et al. (2007), *Manuel de psychologie et de psychopathologie clinique générale*, Paris, Masson.
- Searles H. (1960), *L'environnement non humain*, Paris, Gallimard.
- Thiel M.-J. (2015), « L'homme augmenté aux limites de la condition humaine », *Revue d'éthique et de théologie morale*, 286, p. 141-161. DOI 10.3917/retm.286.0141
- Tisseron S. (2012), *Rêver, fantasmer, virtualiser. Du virtuel psychique au virtuel numérique*, Paris, Dunod.
- Trevarthen C., Aitken, K.-J. (2003), « Intersubjectivité chez le nourrisson : recherche, théorie et application clinique », *Devenir*, 15, 4, p. 309-428.

¹⁸ Martin 1998.

Weismann-Arcache C. (2003), « Des dinosaures à Internet, les nouvelles expressions symptomatiques infantiles », *Neuropsychiatrie de l'enfant et de l'adolescent*, 51, p. 186-190.

Réalité psychique en visioconsultation

L. Haddouk

**Université de Rouen Mont-Saint-Aignan
Laboratoire PSY-NCA**

A l'ère de la cyberculture, des pratiques nouvelles apparaissent dans le champ du soin, telles que la télémédecine et la télépsychologie. La télépsychologie offre de nouvelles façons d'être en relation avec ses patients, en tant que psychologue. Ce domaine ouvre un nouveau champ de recherche en psychologie et des applications en psychothérapie. Publié par l'APA¹ et l'OPQ² (2013), le guide de pratique en télépsychologie définit la télépsychologie comme la « prestation de services psychologiques à l'aide des télécommunications ». Il décrit l'usage de communications pouvant être synchrones entre plusieurs participants communiquant en temps réel, ou asynchrone. Les technologies peuvent ainsi servir à compléter les services à la personne, ou être utilisées seules (notamment pour la psychothérapie en vidéoconférence). Différentes technologies peuvent être utilisées, dans différentes combinaisons et pour différents objectifs au cours de la prestation de services en télépsychologie. Ainsi, on peut avoir recours à :

- des échanges écrits (tchat, emails, SMS)
- des échanges verbaux (téléphone, VOIP, avatars)
- la vidéoconférence

L'usage de ces différents médias révèle des variations quant à l'implication des corps des participants dans les interactions. On peut ainsi supposer que dans les relations à distance, la présence du corps ou de l'image corporelle des participants évolue de façon croissante entre l'échange écrit, l'échange verbal et la vidéoconférence. Ainsi, la relation serait plus « incarnée » avec l'usage de la vidéoconférence, comparé à celui de l'échange écrit ou verbal. C'est pourquoi nous avons choisi la vidéoconférence afin de créer un outil spécifique pour l'entretien clinique à distance, considérant l'entretien comme l'un des principaux outils du psychologue. Le facteur sensoriel lié à l'image du corps rend possible l'échange de regards, le dialogue verbal et infra-verbal simultané. Cela ajoute une dimension essentielle pour favoriser le développement d'une relation similaire à celle établie dans un entretien clinique classique : une relation intersubjective.

Au cours du travail d'élaboration du dispositif, nous avons réfléchi aux variables pouvant déterminer la nature des relations médiatisées par les écrans et aux critères pouvant favoriser l'établissement d'une relation intersubjective à distance. Ce type de relation pourrait-elle permettre d'éviter les risques de déshumanisation dans les relations digitales³ ? Serait-il

¹ <http://www.apa.org/practice/guidelines/telepsychology.aspx>

² https://www.ordrepsy.qc.ca/sn_uploads/2013_Guide_de_pratique_concernant_lexercice_de_la_telepsychologie.pdf

³ Haddouk 2016c et colloque : « Les relations digitales. Intersubjectivité et cyberculture », Rouen, 27 février 2017.

possible de favoriser l'établissement d'une relation d'objet en ligne? Pouvons-nous qualifier les relations médiatisées par des outils numériques comme étant virtuelles ? Ces questions nous ont renvoyé à des concepts plus classiques en psychologie clinique psychodynamique, autour de l'importance du regard, particulièrement sollicité dans les usages des écrans. L'aspect spéculaire du miroir est défini par J. Lacan⁴ dans sa description du stade du miroir comme une étape du développement psycho-affectif du jeune enfant, profondément relié à la constitution de son narcissisme. D'autres auteurs comme D. Winnicott⁵ évoquent plutôt l'aspect transitionnel du miroir, qui apparaît dès les premières relations d'objet établies par le jeune enfant. Les écrans seraient d'une certaine façon des miroirs présentant une potentialité objectale, qui émerge à travers les usages que nous faisons des technologies de l'information et de la communication. Le caractère virtuel des relations à distance médiatisées par des outils technologiques laisse entendre qu'elles ne seraient pas réelles. Mais, au-delà des informations échangées sur la toile, certains vécus émotionnels semblent avoir une vraie réalité dans la vie psychique des utilisateurs, ce qui s'illustre parfois de façon assez dramatique⁶. C'est pourquoi certaines questions terminologiques se posent aujourd'hui dans le champ de la cyberpsychologie et de la télépsychologie, notamment celle de la définition du concept de virtuel.

Le terme « virtuel » est souvent utilisé pour qualifier tout ce qui se passe sur internet. P. Lévy⁷ rappelle que ce mot vient du latin médiéval *virtualis*, dérivant lui-même de *virtus* qui signifie « force, puissance ». Mais selon J. Wood⁸, l'étymologie de l'adjectif « virtuel » fait surgir plus d'ambivalences qu'elle n'apporte d'éclaircissements, et cela explique en partie la grande variabilité de son sens et la confusion qu'elle entraîne. Proulx s'interroge : « Que veut dire exactement ce terme, parfois brandi comme une incantation plutôt que défini avec précision ? »⁹. Si l'on considère que le virtuel est : « ce qui n'est tel qu'en puissance »¹⁰, il est donc par rapport à une actualisation qui peut survenir ou non. En ce sens, le virtuel est réel, mais « non actuel »¹¹. M.-A. Doel et D.-B. Clarke¹² évoquent trois approches du virtuel, qui se distinguent par le type de rapport qu'elles posent entre le réel et le virtuel. Dans la première approche, le virtuel est subordonné au réel et renvoie à la simulation et donc à la « fausse approximation » de la réalité. Cette dernière est perçue comme une copie du réel, mais forcément dégradée, un « simulacre » ou un « double » du réel. Totalement opposée à ce discours de dénigrement, la deuxième approche envisage la virtualité comme la résolution d'un monde plein d'imperfections, du fait même de son actualité. Ici, le virtuel serait au réel ce que le parfait est à l'imparfait. Dans un monde plein d'imperfections, du fait même de son actualité, le réel résulte d'un processus de réduction des possibles et donc d'appauvrissement inéluctable. P. Lévy¹³ considère que l'entité virtuelle remonte à l'essence, à la matrice des actualisations possibles. Dans la même idée, le réseau internet libère les utilisateurs de certaines contraintes liées à la matière, à l'espace et au temps et ouvre d'autres possibilités.

⁴ Lacan 1949.

⁵ Winnicott 1975.

⁶ Comme dans les problématiques liées au cyber-harcèlement par exemple.

⁷ Lévy 1995.

⁸ Wood 1998.

⁹ Breton & Proulx 2002, 296.

¹⁰ *Dictionnaire Le Robert*.

¹¹ Deleuze 1996.

¹² Doel & Clarke 1999.

¹³ Lévy 1995.

En ce sens, les technologies du virtuel sont perçues comme « libératrices » par rapport au réel. On note donc dans ces deux mouvements une distinction claire entre le virtuel et le réel. De plus, les deux approches rappellent le débat opposant les technophobes aux technophiles¹⁴ et elles sont toutes deux marquées par un certain déterminisme technologique, le virtuel n'apparaissant qu'avec le progrès technologique. Or, on trouve des références à ce concept dans la littérature bien avant l'apparition des technologies actuelles. La troisième approche est d'inspiration deleuzienne et renvoie à l'hybridation du réel et du virtuel et à une conception du réel dans lequel l'actuel et le virtuel sont en interrelation circulaire et productive. De leur interaction jaillit un réel en constante : « création et expérimentation »¹⁵.

Nous avons trouvé une note fort intéressante dans une définition du virtuel¹⁶, qui précise que « dans la langue scolastique, (virtuel) s'oppose à formel : il marque ce qu'est une chose en essence ou en puissance, bien qu'elle ne soit pas telle *formaliter* ou *in actu*¹⁷. D'où les théologiens ont tiré la distinction entre une présence « virtuelle » et une présence « réelle » du Christ dans l'Eucharistie ». Cette note est intéressante car elle fait référence à l'absence du corps, ici du corps christique, qui se trouve représenté dans l'ostie et le vin, en tant que corps virtuels. Cela évoque donc une compréhension du terme « virtuel » qui ne s'oppose pas au réel, mais au charnel et qui renvoie plutôt à l'absence du corps, qui peut toutefois être représenté symboliquement. Dans les relations digitales, le corps est également absent dans sa réalité matérielle, mais le registre symbolique de la réalité psychique est bien souvent mobilisé.

Dans cette mesure, l'opposition virtuel-réel n'existe pas. Retenons donc l'idée de la distance comme caractérisant davantage le cadre de la visioconsultation que sa virtualité. Ainsi, le cheminement vers la symbolisation peut être rendu possible avec un outil, non pas « virtuel », mais « numérique », constituant un lieu de médiation, une aire de transitionnalité, un espace potentiel dans l'environnement, visant à soutenir la réalité psychique. Malgré l'opposition entre le virtuel et le réel dans la littérature, on rencontre paradoxalement et depuis 1989, l'appellation : « réalité virtuelle »¹⁸. Elle est définie comme : « l'application qui permet à l'utilisateur de naviguer et d'interagir en temps réel avec un environnement en trois dimensions généré par un ordinateur¹⁹ ». Ce terme est souvent utilisé dans les recherches en cyberpsychologie pour qualifier des environnements numériques immersifs. Rappelons que la cyberpsychologie considère le cyberspace comme un espace psychologique, c'est-à-dire comme un espace transitionnel ou comme une simple extension du monde psychique individuel²⁰. La « réalité virtuelle » n'expose donc pas le patient à des situations « réelles », paradigme qui a déjà été utilisé avec succès en cyberthérapie pour le traitement des troubles anxieux²¹. Le patient est immergé dans un univers numérique en trois dimensions, à l'aide de l'écran mais aussi d'un équipement technique particulier : gants de données, visiocasques, capteurs de localisation, etc. Il interagit avec son environnement, le but étant de réduire sa

¹⁴ Breton 2000.

¹⁵ Deleuze 1996, 185.

¹⁶ Lalande 1926, 1211.

¹⁷ Traduction du latin : « formellement ou dans les faits ».

¹⁸ Appellation créée par Lanier et Fisher in Woolley 1992.

¹⁹ Pratt *et al.* 1995.

²⁰ *Grand Dictionnaire terminologique de la langue française* 2000.

²¹ Bouchard *et al.* 2003.

peur par un procédé d'habituation aux objets ou aux situations anxiogènes. L'exposition à ces situations est progressive et se déroule dans le cabinet du psychothérapeute.

Le succès de l'usage des technologies immersives dans le traitement des troubles anxieux pourrait être expliqué par le phénomène de présence, dont la définition demeure néanmoins assez floue. Selon Mestre²², on peut définir l'immersion comme les capacités du système à isoler l'utilisateur du monde réel, à délivrer une information riche, multi-sensorielle et cohérente. L'immersion est fondamentalement liée à la notion d'interaction en temps réel avec un « environnement virtuel ». L'« immersivité » du monde virtuel relèverait plutôt du chercheur, en fonction de ses conceptions théoriques et des contraintes techniques. Par contre, le sentiment de présence serait un concept subjectif, « bi-stable », cherchant à décrire le sentiment du sujet d'être dans le monde réel et/ou dans le monde virtuel. Alors que l'immersion semble relever des caractéristiques techniques de l'environnement numérique, le sentiment de présence correspond plutôt à un phénomène psychologique, encore assez mal défini et mal compris dans ses variabilités interindividuelles. De nombreuses recherches en cyberpsychologie ont étudié le sentiment de présence dans des dispositifs immersifs²³. D'autres travaux portent sur le sentiment subjectif de présence en vidéoconférence et démontrent un lien entre ses variations et les émotions ressenties par les utilisateurs²⁴. Ainsi, plus l'investissement émotionnel des sujets serait fort, plus le sentiment de présence serait important. On peut alors supposer que le sentiment de présence serait facilité par la qualité des échanges dans les entretiens cliniques, où les sujets parlent de leur histoire personnelle et de leur vie psychique et affective. L'espace « virtuel » d'internet permettrait donc d'accéder en visioconsultation à des interactions bien « réelles » sur le plan de la dynamique psychique des sujets en « présence ».

Par ailleurs, le caractère plus ou moins objectal des relations digitales semble déterminé par leur nature plus ou moins intersubjective. Ce concept a de nombreuses définitions dans la littérature, mais nous retiendrons celle-ci : « L'intersubjectivité se réfère à la capacité de créer une interaction avec un autre et de le reconnaître en tant que sujet. Par conséquent, la personne est capable de ressentir ce que l'autre ressent, en particulier sa souffrance »²⁵. Pour évaluer la dimension intersubjective des échanges en visioconsultation, nous avons utilisé l'analyse des différents niveaux d'interaction : comportementales, sensorielles et fantasmatiques²⁶. Nous nous sommes intéressée aux spécificités de ce type de relation digitale, que nous avons explorées à travers l'usage de la plate-forme iPSY²⁷.

Notre étude préliminaire en visioconsultation²⁸ avait comme principaux objectifs :

- 1- l'adaptation en ligne du cadre de l'entretien clinique en face à face²⁹ avec la conceptualisation d'un premier site prototype.
- 2- la comparaison de la relation d'ordre transféro-contre-transférentielle entre le patient et le psychologue clinicien au cours d'entretiens réalisés en face à face dans un cadre classique et en visioconsultation.

²² Colloque Psychologie et Réalité Virtuelle organisé par le laboratoire PSY-NCA, Rouen, mai 2014.

²³ Slater & Wilburg 1997, Slater 1999.

²⁴ Bouchard *et al.* 2011.

²⁵ Mugnier 2011.

²⁶ Lebovici 1994.

²⁷ ipsy.fr

²⁸ Haddouk 2011.

²⁹ Chiland 1983.

Nous avons travaillé sur la possibilité d'envisager une relation similaire entre patient et psychologue, notamment grâce au phénomène psychique de présence, bien que les corps des participants soient à distance. De nos jours, il n'est pas rare de constater que de nombreux professionnels de la psychologie utilisent des logiciels de vidéoconférence comme Skype, comme si il s'agissait d'un outil de travail adapté à leur pratique. Cependant, la technologie de la vidéoconférence ne suffit pas à définir le cadre d'un entretien clinique. La « psychothérapie sauvage » sur internet présente des risques pour les utilisateurs et soulève des questions éthiques, en ce qui concerne notamment la confidentialité des données échangées sur la toile. C'est pourquoi nous avons développé un dispositif autonome, permettant d'expérimenter les visioconsultations dans un cadre sécurisé de recherche. La méthode utilisée pour notre première recherche fut basée sur la comparaison de 2 groupes de sujets: l'un suivi auparavant dans un cadre habituel d'entretien en face à face et l'autre rencontré via le dispositif en ligne. Notre échantillon était composé de 8 sujets : 5 femmes et 3 hommes, âgés de 18 à 40 ans lors du recueil de données. Nous avons inclus une population adulte tout-venant, en vérifiant lors d'entretiens préliminaires que tous les sujets avaient un rapport non altéré avec la réalité. Nous avons utilisé une méthode qualitative pour l'analyse des données recueillies en visioconsultation³⁰, avec une grille d'analyse thématique comportant 12 items. Parmi ces items, nous avons notamment intégré les données anamnestiques, l'analyse de la demande, des interactions non verbales, l'usage de la webcam, la gestion de la distance. L'analyse qualitative était donc fondée sur le discours mais aussi sur les observations des interactions non verbales au cours des entretiens de suivi des patients. Nous avons croisé cette méthode avec un recueil de données quantitatives, en faisant passer le SADS³¹ aux sujets des deux groupes. Nous avons également aménagé le site internet en référence au cadre classique d'entretien, concernant notamment les questions relatives au temps (prise de rendez-vous, salle d'attente, fréquence et durée des séances). D'autre part, nous avons intégré à la plate-forme et à l'analyse des données des spécificités propres à la visioconsultation (utilisation du retour caméra comme « option-miroir », module de tchat en cas de problème technique).

Les résultats obtenus ont démontré :

- la confirmation de la similitude des interactions observées en visioconsultation, comparées avec l'entretien classique.
- la mise en évidence de la fonction de tiers occupée par le dispositif dans la rencontre duelle entre le patient et le clinicien.

Dans notre recherche, les résultats pour les deux groupes ont validé l'hypothèse que l'entretien clinique est possible en vidéoconférence et comparable à la pratique classique, sans être totalement identique. Ces résultats sont proches de ceux d'autres recherches, obtenus grâce à la comparaison de l'efficacité de suivis en face à face classique avec des suivis en vidéoconférence de patients agoraphobes ou souffrant d'un syndrome de stress post-traumatique, dans une approche cognitivo-comportementale³². D'autres travaux ont démontré, avec des mesures quantitatives, l'équivalence de l'alliance thérapeutique en vidéoconférence

³⁰ 139 enregistrements.

³¹ Social Anxiety Distress Scale, Watson & Friends 1969.

³² Bouchard *et al.* 2004.

et en face à face classique³³. Ainsi, ces différents résultats suggèrent fortement la nécessité d'un travail méthodologique d'adaptation du cadre de l'entretien clinique en ligne aujourd'hui³⁴. Nos résultats peuvent être renforcés par la dimension émotionnelle de la relation dans un entretien clinique, comme le suggèrent d'autres recherches en télépsychothérapie, sur le sentiment subjectif de présence³⁵. Ils confirment l'idée que le sentiment de présence est facilité par la qualité des échanges durant les entretiens cliniques, où la dimension émotionnelle, ainsi que l'établissement d'une relation d'objet intersubjective est essentielle, parce que les sujets parlent de leur histoire personnelle et de leur vie psychique, qui inclut une part fantasmatique. Ainsi, malgré la distance séparant les corps, les émotions ressenties ne semblent pas « virtuelles », mais bien réelles.

Dans le contexte d'un entretien clinique d'inspiration psychodynamique en vidéoconférence, le sentiment de présence ressenti correspond à celui qui est observé usuellement dans un cadre classique, en termes d'interactions et de relation. Le transfert et le contre-transfert sont ainsi des mécanismes pouvant apparaître en visioconsultation, de façon similaire à ceux d'un entretien classique. Les phénomènes transféro-contre-transférentiels s'inscrivent dans les mêmes mouvements fantasmatiques quel que soit le cadre de l'entretien, avec toutefois des spécificités dans leurs expressions en ligne³⁶. Parmi ces spécificités, on retrouve la place du regard, qui est particulièrement investi et médiatisé par l'écran et la caméra en visioconsultation. L'utilisation du cadrage grâce à la caméra et l'usage de l'option-miroir³⁷, sont également spécifiques à la visioconsultation. Nous avons fait le choix d'intégrer ces données nouvelles dans l'analyse des mécanismes transféro-contre-transférentiels, les considérant comme des expressions actuelles des mêmes processus psychiques à l'œuvre au cours des entretiens. Le terme de « virtuel » ne semble donc pas approprié pour qualifier les relations digitales intersubjectives en visioconsultation. On peut par conséquent envisager que la distance physique ne s'oppose pas au sentiment de présence sur le plan psychique. La visioconsultation constitue ainsi un espace de réalité psychique. En revanche, ce qui change en visioconsultation, c'est la distance des corps qu'implique le dispositif en lui-même. Mais cette distance est relativisée par l'image des corps en interaction que permet la vidéoconférence, alors que le corps disparaît dans les échanges écrits tels que le tchat, les emails, les twitts, etc. L'utilisation d'avatars dans les interactions peut permettre une forme de projection de l'image du corps en ligne, mais elle est différente de l'image des corps « réels » en vidéoconférence. Ainsi, la place du corps demeure essentielle au cours de l'entretien clinique et tout particulièrement dans les échanges de regards, possibles en visioconsultation malgré certaines spécificités. Ce cadre permet donc d'envisager une rencontre, avec des interactions sensorielles impliquant le corps de l'analyste et du patient, ce qui favorise la possibilité d'accéder aux registres conscient et inconscient du discours. D'autre part, l'adaptation du cadre de l'entretien clinique en ligne pourrait aider à trouver une « distance psychique suffisamment bonne » dans les interactions médiatisées par l'écran. Cela permettrait à la relation intersubjective d'émerger et d'avoir une vraie réalité psychique pour les sujets impliqués.

³³ Bouchard *et al.* 2010.

³⁴ Haddouk 2014, 2016a.

³⁵ Bouchard 2011.

³⁶ Haddouk, 2014, 2016a, b, c.

³⁷ Qui permet au participant de choisir de se voir ou pas lors de l'entretien.

L'une des questions soulevée par les usages des TIC dans nos sociétés post-modernes concerne les caractéristiques de la relation intersubjective, lorsqu'elle se joue dans la distance des corps et qu'elle est médiatisée par un outil numérique. L'expérience en visioconsultation peut apporter des éléments quant à cette réflexion sur les relations digitales.

D'autres usages des TIC semblent aussi tendre à « ré-humaniser » la relation, et c'est une voie qui paraît importante à explorer aujourd'hui, particulièrement pour les psychologues. Ces remarques ouvrent donc des pistes de recherche actuelles en cyberpsychologie et en télépsychothérapie, afin d'observer et de mieux connaître la relation digitale en visioconsultation.

La plate-forme iPSY constitue aujourd'hui un nouvel outil de recherche en psychologie, permettant le recueil de données relatives au travail des psychologues, dans un cadre validé, sécurisé et développé pour l'usage particulier de la psychothérapie. Ce cadre propose une pratique méthodologique pour cet usage particulier des TIC³⁸, et les recherches doivent se poursuivre afin d'améliorer les connaissances fondamentales et le dispositif en ligne. Parmi les limites de notre première étude, on note que l'échantillon était composé de peu de sujets et un plus grand nombre de participants devraient être inclus dans les recherches à venir afin d'obtenir des résultats plus fiables, notamment sur les critères d'inclusion et d'exclusion des patients en visioconsultation. Il reste de nombreuses problématiques psychopathologiques à explorer pour évaluer l'efficacité thérapeutique de la visioconsultation en fonction des troubles mentaux. De plus, d'autres cadres théoriques sous-tendant la pratique clinique du psychologue devraient être mis à l'épreuve avec le même dispositif technique, pour en considérer les effets.

Cela fait partie des projets de recherche en cours, et cela semble nécessaire dans le cadre plus général d'une veille méthodologique concernant les nouveaux dispositifs psychothérapeutiques, tel que la télépsychologie. Par ailleurs, il est important de rappeler que ces innovations du cadre psychothérapeutique ne visent pas à remplacer les prises en charge plus traditionnelles. Elles offrent plutôt des possibilités étendues, augmentent l'accessibilité à la psychothérapie et renouvellent cette méthode. Elles viennent donc compléter l'offre de soin actuelle en santé mentale.

Conclusion

Le « culte de l'Internet »³⁹ prend ses racines dans le culte de l'information, créé par la cybernétique. La nouvelle vision du monde défendue par Wiener⁴⁰ se présente, sans qu'il ne le formule directement, comme une approche « antimétaphysique » en ce qu'elle postule qu'il n'y a en quelque sorte, rien derrière le réel qui se trouve ramené à l'échange permanent et visible des informations qui le constituent. Ainsi : « le nouveau paradigme est une pensée de la relation, qui enferme le réel dans le relationnel, et le relationnel dans l'informationnel »⁴¹. Cependant dans le cadre d'un entretien clinique, on peut mesurer toute la complexité des facteurs définissant la relation entre deux êtres humains. En visioconsultation, la relation

³⁸ Technologies de l'Information et de la Communication.

³⁹ Breton 2000.

⁴⁰ Wiener 1954.

⁴¹ Breton 2000, 37.

médiatisée par ordinateur ne semble donc pas se réduire à un échange informationnel, les facteurs affectifs, émotionnels et intersubjectifs y étant essentiels. Il faut alors pouvoir considérer aussi ces facteurs intervenant dans les relations en ligne, au-delà du simple échange d'informations. Le sentiment de présence apporte une réalité psychique aux entretiens réalisés en visioconsultation. Il est favorisé par le caractère intersubjectif de l'échange établi lors de l'entretien clinique, même lorsque les corps sont à distance. Il est aussi renforcé par l'usage fait du dispositif développé dans cet objectif, à travers les références constantes aux règles méthodologiques et éthiques de l'entretien réalisé par le psychologue. Il faut poursuivre ces recherches afin de recueillir plus de données, mais aussi pour l'établissement d'un cadre méthodologique généralisé dans ces nouvelles pratiques professionnelles en ligne, afin de garantir la sécurité et de prévenir les risques de dérives, tant pour les professionnels que pour patients.

En travaillant sur la dimension plus émotionnelle de l'échange, il apparaît que la réalité psychique est une interface où le virtuel et le réel ne s'opposent pas, car elle est mobilisée de façon similaire en visioconsultation et lors d'un entretien clinique classique. C'est bien de la même réalité psychique dont il s'agit, médiatisée par la relation intersubjective établie à distance en visioconsultation. Si l'on considère que le vécu intersubjectif renforce le sentiment de présence, cela explique l'influence de la réalité psychique sur le vécu subjectif de l'individu. Ces éléments mènent finalement à une réflexion sur la notion de relation à l'ère de la cyberculture et sur ses nouvelles modalités, qui restent encore à définir. On peut ainsi s'interroger sur les facteurs intersubjectifs à l'œuvre dans les autres types de relations digitales et sur la place qu'elles occupent dans la réalité psychique des utilisateurs. Il serait intéressant de pouvoir envisager les modalités des relations digitales entre humains via des machines, entre humains et machines, entre humains et robots humanoïdes, ...

Bibliographie

- Bouchard S., St-Jacques J., Robillard G., Côté S., Renaud, P. (2003), « Efficacité de l'exposition en réalité virtuelle pour l'acrophobie : Une étude préliminaire », *Journal de Thérapie Comportementale et Cognitive*, 13, 3, p. 7-112.
- Bouchard S., Paquin B., Payeur R., Allard M., Rivard V., Fournier T., Renaud P., Lapierre J. (2004), « Delivering Cognitive-Behavior Therapy for Panic Disorder with Agoraphobia in Videoconference », *Telemedicine Journal and e-Health*, 10, 1, p. 13-25.
- Bouchard S., Germain V., Marchand A., Guay S., Drouin M.-S. (2010), « Assessment of the Therapeutic Alliance in Face-to-Face or Videoconference Treatment for Posttraumatic Stress Disorder », *CyberPsychology and Behavior*, 13, 1, p. 29-35.
- Bouchard S., Dumoulin S., Michaud M., Gougeon V. (2011), « Telepresence experienced in videoconference varies according to emotions involved in videoconference sessions », *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine (ARCTT)*, IOS Press.
- Breton P. (2000), *Le culte de l'Internet, une menace pour le lien social ?*, Paris, La Découverte.

- Breton P. et Proulx S. (2002), *L'explosion de la communication à l'aube du XXI^e siècle*, Paris, La Découverte.
- Chiland C. (1983), *L'entretien clinique*. Paris, Presses Universitaires de France.
- Deleuze G. (1996), « L'actuel et le virtuel », In *Dialogues*, G. Deleuze (dir.), Paris, Flammarion, p. 177-185.
- Doel M.-A. et Clarke D.-B. (1999), « Virtual Worlds. Simulation, Suppletion, S(ed)uction and Simulacra », In *Virtual Geographies. Bodies, Space and Relations*, Crang M., Crang Ph., May J. (dir.) Londres, Routledge, p. 261-283.
- Galimberti C., Brivio E., Cantamesse M., Cilento Ibarra F. (2010), « Intersubjectivity as a Possible Way to Inhabit Future Cyberplaces », *Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine*, p. 9-13.
- Haddouk L., Govindama Y., Marty F. (2013a), « A Video Interview Experience », *Cyberpsychology, Behavior and Social Networking*, 16, 5, p. 402-405.
- Haddouk L. (2013b), « La place du corps dans les rites numériques. Illustration : la visioconsultation », *Les Cahiers du numérique*, 9, 3-4, p. 83-110.
- Haddouk L. (2013c), « Intersubjectivité et visioconsultation », *Cliniques méditerranéennes*, 90, p. 185-200.
- Haddouk L. (2014), « Intersubjectivity in Video Interview », *Annual review of Cybertherapy and Telemedicine*, 199, p. 158-162.
- Haddouk L. (2015), « Presence at a distance », Communication présentée au *20th annual CyberPsychology, CyberTherapy and Social Networking Conference*, San Diego.
- Haddouk L. (2016a), « Presence in Telepsychotherapy Towards a Video-Interview Framework », *International Journal of Emergency Mental Health and Human Resilience*, 17, 4, p. 712-713.
- Haddouk L. (2016b), « Intersubjectivity in Video Interview » in *The Psychology of Social Networking: Communication, Presence, Identity and Relationships in online communities*, G. Riva, B.-K. Wiederhold, P. Cipresso (Eds.), London, Versita.
- Haddouk L. (2016c), *L'entretien clinique à distance. Manuel de visioconsultation*, Toulouse, Érès.
- Lacan J. (1949), « Le stade du miroir comme formateur de la fonction du Je », in *Les écrits*, Paris, Éditions du Seuil.
- Lalande A. (1926), *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*, Paris, Presses Universitaires de France.
- Lebovici S. (1994), « Les interactions fantasmatiques », *Revue de Médecine Psychosomatique*, 37, 38, p. 39-50.
- Lévy P. (1995), *Qu'est-ce que le virtuel ?*, Paris, La Découverte.
- Mugnier J.-P. (2011), « Du diabolique au symbolique, dans quel monde vivons-nous ? », *Cahiers critiques de thérapie familiale et de pratiques de réseaux*, 46, p. 33-45.

- Pratt D.-R., Zyda M., Kelleher K. (1995), « Virtual reality: In the mind of the beholder », *IEEE Computer*, 28, 7, p. 17-19.
- Slater M., Wilbur S. (1997), « A framework for immersive virtual environments (FIVE) : Speculations on the role of presence in virtual environments », *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 6, p. 603-616.
- Slater M. (1999), « Measuring presence: A response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire », *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8, 5, p. 560-565.
- Watson D., Friend R. (1969), « Measurement of Social-Evaluative Anxiety », *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 33, 4, p. 448-457.
- Wiener N. (1954), *Cybernétique et société*, Paris, Seuil, p. 10-18.
- Wilbur S.-P. (1997), « An archaeology of cyberspaces, virtuality, community, identity », in *Internet culture*, Porter D. (éd), Londres, Routledge, p. 5-22.
- Winnicott D.-W. (1975), « Le rôle de miroir de la mère et de la famille dans le développement de l'enfant », in *Jeu et réalité*, Paris, Gallimard.
- Wood J. (1998), *The Virtual Embodied. Presence/Practice/Technology*, Londres, Routledge.
- Woolley B. (1992), *Virtual Worlds. A Journey in Hype and Hyperreality*, Oxford, Blackwell.

Résumés

J. Grieu, F. Lecroq, Th. Galinho, H. Boukachour, *Environnements industriels virtualisés et processus d'apprentissage*

Cette contribution vise à décrire le travail mené au sein de la cellule « Immersion » du Pôle Ingénieur et Logistique (PIL) de la Normandie Le Havre Université. Notre équipe, pluridisciplinaire, est la réunion de deux groupes s'intéressant à des problématiques complémentaires. Le premier groupe s'est d'abord intéressé à la prévention des risques industriels par l'utilisation des Systèmes d'Aide à la Décision (SIAD), puis à la prévention des risques d'abandon des apprenants dans le cadre de la formation à distance (e-Learning) par la conception d'un Système de Tutorat Intelligent (ITS). Parallèlement, la seconde partie de l'équipe a développé un campus virtuel (GE3D) avec des salles dédiées à l'enseignement des Automates Programmables Industriels (API). L'objectif commun est d'étudier, de modéliser et concevoir des environnements industriels virtuels, supports pour la simulation et la formation.

This paper describes the works driven by the searchers of the "PIL - Immersion" of Normandy Le Havre University. Our multidisciplinary team is the merging of two groups interested in complementary areas. The first group, was initially involved in Decision Support Systems (DSS) applied to industrial risk prevention. Then, an Intelligent Tutoring System (ITS) was designed to prevent learners' dropout in distance learning (e-Learning). Meanwhile, the second group has developed a virtual campus (GE3D) with rooms dedicated to teach Programmable Logic Controllers (PLC's). Thus, the common goal is to study, model and design industrial virtual environments for simulation and training.

Ph. Brunet, J. Dehut, *Images 3D et humanités numériques : modélisation et restitution du geste théâtral*

Cette communication présente les premiers résultats d'une tentative de modélisation en 3D du geste théâtral antique, mais aussi les premiers questionnements qui accompagnent cette démarche.

This paper introduces the very first results of an attempt at modelling motion and gesture in ancient drama and the calling into question of our method.

G. Lecouvey, J. Gonnaud, N. Legrand, G. Rauchs, F. Eustache, B. Desgranges, *Réalité virtuelle et mémoire*

L'évaluation de la mémoire est aujourd'hui fondamentale pour mieux comprendre le fonctionnement cognitif humain et pour appréhender les modifications susceptibles de perturber l'autonomie des individus au quotidien. Elle permet de détecter les signes d'une pathologie naissante ou encore d'évaluer les répercussions fonctionnelles d'un trouble cognitif acquis afin d'apporter des solutions de remédiation individualisées. Les épreuves utilisées en pratique clinique sont traditionnellement proposées sous un format papier/crayon et restent donc éloignées des situations rencontrées au quotidien. Afin d'appréhender le fonctionnement mnésique en situation réelle tout en conservant un contrôle important sur les processus en jeu au cours de la tâche, les chercheurs ont commencé à développer des épreuves d'un nouveau genre en réalité virtuelle. Le but de cet article est de présenter les expérimentations qui se sont intéressées à l'évaluation de la mémoire humaine en réalité virtuelle et de souligner la valeur ajoutée de cette technologie ainsi que ses limites actuelles.

Memory assessment is fundamental to better understand human cognitive functioning and to highlight modifications that are likely to disrupt individuals' autonomy in everyday life. It allows to detect the first signs of a forthcoming pathology and to evaluate the functional repercussions of cognitive disorders in order to provide individualized remediation solutions. The tests used in clinical practice are generally proposed in a paper / pencil format and therefore remain quite far from everyday life situations. In order to understand memory functioning in real situations while maintaining a high level of control over the cognitive processes involved in the task, researchers have developed new virtual reality based assessments. The aim of this paper is to review studies that have investigated human memory using virtual reality and to emphasize the added value of this technology as well as its current limitations.

N. Benguigui, C. Mandil, M. Mallek, L. Lejeune, R. Thouvarecq, *Étude des liens entre perception et action dans des environnements virtuels*

Cet article a pour but de montrer l'intérêt de la réalité virtuelle dans le domaine des sciences du mouvement et de l'étude des interactions avec l'environnement. Différents exemples sont donnés dans des tâches d'interception et de navigation pour montrer comment la réalité virtuelle, en permettant de créer des environnements expérimentaux parfaitement contrôlés, est susceptible d'apporter des réponses à des questions portant sur le contrôle prédictif ou prospectif de la motricité ainsi que sur l'intérêt des informations augmentées (tactiles) dans la navigation.

The goal of this article is to show the interest of virtual reality in movement sciences for studying the interactions with the environment. Various examples are given with interceptive and navigation tasks to show how virtual reality by allowing to build controlled experimental environments can provide answers to questions concerning the predictive or prospective control of movement as well as the interest of the (tactile) augmented information in navigation.

E.-G. Dupuy, A. Maneuvrier, E. Vlamynck, S. Besnard, B. Bienvenu, L.-M. Decker, *Le syndrome d'Ehlers-Danlos type hypermobile : évolution des stratégies posturales en réponse à un programme de rééducation à visée somesthésique*

Le syndrome d'Ehlers-Danlos type hypermobile (SEDh) est une atteinte du tissu conjonctif se manifestant par des troubles somesthésiques, eux-mêmes à l'origine d'une altération du contrôle postural. L'objectif de cette étude était double : i) déterminer l'impact des troubles somesthésiques associés au SEDh sur les stratégies posturales, et ii) évaluer les effets d'une rééducation somesthésique sur ces stratégies. A cette fin, les stratégies posturales de six patientes SEDh et six sujets contrôles ont été testées afin de quantifier leur utilisation des différentes entrées sensorielles. Les résultats révèlent qu'avant la rééducation les patientes présentent des stratégies posturales rigides, fondées sur l'entrée visuelle, limitant de fait leur capacité d'adaptation aux défis sensoriels. La rééducation semble avoir amélioré l'utilisation des informations somesthésiques, réduisant ainsi les effets déstabilisants du conflit sensoriel sur le contrôle postural.

Ehlers-Danlos syndrome hypermobility type (EDS-HT) is the clinical manifestation of connective tissue disorders, leading to somesthetic disorders and thus alterations in postural control. The objective of this study was twofold: i) to investigate how somesthetic disorders influence postural strategies in EDS-HT patients, and ii) to assess the effects of somesthetic rehabilitation on these strategies. To this end, postural strategies of six EDS-HT patients and six control subjects were tested in order to quantify their use of the different sensory inputs.

Before rehabilitation, EDS-HT patients showed inflexible postural strategies, principally based on visual input, therefore limiting their postural adaptation to sensory challenges. The rehabilitation seems to have fostered the use of somesthetic input, hence reducing the destabilizing effects of sensory conflict on postural control.

C. Weismann-Arcache, *Réalité virtuelle et humain augmenté : subjectivation, désobjectivation ?*

À partir de ma pratique de psychologue clinicienne et de ma position de chercheur, je vais interroger les effets paradoxaux de la réalité virtuelle sur le processus de subjectivation de l'enfant. J'utiliserai deux exemples : les applications cliniques de type « prothèse » à l'école, et l'exemple des jeux vidéo comme objet culturel et ludique contemporain. Les concepts d'humain augmenté et de transhumanisme seront questionnés. J'évoquerai l'impact de la révolution numérique sur notre conception du temps et des limites de la condition humaine. Je conclurai avec le mythe de Dédale, le père d'Icare.

From my practice as a clinical psychologist and from my position as a researcher, I will question the paradoxical effects of virtual reality on the process of subjectivation of the child. I will use two examples: clinical applications of "prosthesis" type at school, and the example of video games as a cultural object and contemporary play. The concepts of increased humanity and transhumanism will be questioned. I will discuss the impact of the digital revolution on our conception of the time and limits of the human condition. I will conclude with the myth of Daedalus, the father of Icarus.

L. Haddouk, *Réalité psychique en visioconsultation*

Dans le champ de la télépsychologie, les psychothérapies médiatisées par des outils numériques se développent, dans toutes les sous-disciplines de la psychologie. La visioconsultation est un dispositif conçu avec pour objectif d'adapter le cadre de l'entretien clinique classique en ligne, ce qui inclut des questions méthodologiques et éthiques, tant sur le plan psychologique que technologique. Ce dispositif a été expérimenté et validé dans le cadre de recherches qui se rapprochent de travaux actuels dans d'autres champs théoriques en psychologie. Ces recherches s'inscrivent dans le champ de la cyberthérapie et apportent de nouvelles connaissances fondamentales et cliniques. Elles ouvrent de nombreuses perspectives pour les réflexions à venir, notamment sur des concepts tels que le virtuel, la présence, l'intersubjectivité et les relations digitales.

In the field of telepsychology, psychotherapies established through technologies are developing in all sub-disciplines of psychology. Video-interview is a device built in order to adapt the classical clinical interview framework online, which includes methodological matters on psychological and technological levels. This device has been experimented and validated in researches which come closer to present studies in other theoretical fields in psychology. These researches in cybertherapy bring a new basic and clinical knowledge. They create many new opportunities for future scientific thought, particularly on concepts such as virtual, presence, intersubjectivity and digital relationships.

Biographies

Jean Grieu a débuté sa carrière de chercheur en 1984 sur le management des systèmes d'information et le management stratégique. Par la suite, il a intégré le laboratoire d'informatique de l'université du Havre pour travailler dans le e-learning. Son domaine d'expertise actuel est de savoir comment améliorer les processus d'enseignement et d'apprentissage en utilisant des ordinateurs pour la simulation. Parallèlement à cela, il est enseignant à l'IUT du Havre en gestion, et il organise de nombreuses sessions de jeux de simulation de gestion.

Florence Lecroq a commencé sa carrière de chercheur par une thèse en acoustique sous-marine en 1990. Sa recherche qui portait sur la diffusion acoustique se déroulait dans un laboratoire CNRS de l'université du Havre. Maintenant, elle travaille dans le laboratoire d'informatique de l'université du Havre (LITIS) et s'intéresse à l'utilisation des technologies pour la réalité virtuelle et augmentée appliquées à l'enseignement. Parallèlement à son métier de chercheur, elle mène sa carrière d'enseignante à l'IUT du Havre. Ses enseignements portent sur l'informatique industrielle sur les Automates Programmables Industriels appliquée à l'industrie 4.0.

Thierry Galinho a soutenu son doctorat de l'université de Rouen spécialité informatique en 1994. Actuellement membre du LITIS EA 4108 (Laboratoire d'Informatique, du Traitement de l'Information et des Systèmes) après avoir été membre du LIR (Laboratoire d'Informatique de Rouen) puis du LIH (Laboratoire d'Informatique du Havre). Ses travaux ont concerné l'ordonnancement de type job-shop, puis la mise en place d'un prototype générique d'IA utilisant les systèmes multiagents pour la prévention du risque (notamment le risque d'abandon des apprenants à distance). Il est actuellement Maître de Conférences (premier nommé en 1996) à l'ISEL (Institut Supérieur d'Études Logistiques).

Hadhoum Boukachour a soutenu sa thèse de doctorat à l'Université du Havre en 2002. Depuis 2003, elle est Maître de Conférences à l'Université du Havre et membre du LITIS (Laboratoire d'informatique, du Traitement de l'information et des Systèmes). Ses principaux thèmes de recherche sont les systèmes d'aide à la décision, le raisonnement à partir de cas dynamiques et les systèmes multiagents.

Philippe Brunet est professeur de littérature grecque à l'université de Rouen, co-directeur du master Humanités numériques, et directeur de la compagnie de théâtre antique Démodocos, avec laquelle il restitue le rythme, les chants, les danses, la gestuelle, le jeu de masques, notamment au festival des Dionysies à Paris. Il a publié une traduction métrique de L'Iliade (Seuil 2010, Point Seuil 2012), dirigé les colloques "Humanités et Monde Contemporain : humanisme, antihumanisme, transhumanisme" et "Voix, geste, rythme dans la poésie ancienne et sa tradition" (Université de Rouen, 2015) et travaille actuellement à la mise en images des Bacchantes et d'Oedipe roi.

Julien Dehut est diplômé en Histoire et Lettres Classiques, il étudie dans le cadre de son doctorat, sous la direction de Philippe Brunet, les liens qu'entretiennent rhétorique et numérique. Il enseigne l'informatique et la culture numérique à l'Université de Rouen.

Grégory Lecouvey est psychologue et docteur en neuropsychologie. Il a réalisé une thèse au sein de l'unité Inserm u1077 pour laquelle il s'est intéressé à la neuropsychologie de la mémoire prospective dans le vieillissement normal et la maladie d'Alzheimer ainsi qu'aux apports de la

réalité virtuelle et de l'étude du sommeil dans la compréhension du fonctionnement de ce sous-type de la mémoire humaine. Il réalise actuellement un post-doctorat au sein de l'équipe Phoenix de l'Institut National pour la Recherche en Informatique et en Automatique de Bordeaux.

Julie Gonneaud a réalisé, au sein de l'unité Inserm u1077, une thèse consacrée à la mémoire prospective, en utilisant une double approche, de psychologie expérimentale et d'imagerie cérébrale. Elle a également contribué aux travaux intégrant la réalité virtuelle dans l'étude de cette forme de mémoire.

Nicolas Legrand est doctorant au sein de l'unité Inserm U1077. Après des études de philosophie et de mathématiques, il a obtenu deux Masters, en Sciences cognitives et en Neurosciences. Sa thèse porte notamment sur les mécanismes de consolidation de la mémoire pendant le sommeil, dont certains résultats sont présentés dans la dernière partie de cet article.

Géraldine Rauchs est chercheur dans l'unité Inserm U1077. Ses principaux thèmes de recherche sont les liens entre sommeil et mémoire, et l'impact de la qualité du sommeil sur la structure et le fonctionnement du cerveau au cours du vieillissement, des stades précoces de la maladie d'Alzheimer, mais aussi chez les patients présentant un trouble de l'usage de l'alcool.

Francis Eustache est neuropsychologue de formation. Il est directeur d'études à l'École pratique des hautes études (EPHE) et directeur de l'Unité de recherche 1077 (Inserm, EPHE, Université de Caen-Normandie). Il est spécialisé dans l'étude de la mémoire humaine et de ses maladies en utilisant des techniques de neuropsychologie et de neuroimagerie.

Béatrice Desgranges est neuropsychologue et directrice de recherche à l'Inserm, co-responsable d'une équipe dans l'unité 1077. Ses principaux thèmes de recherche concernent la mémoire prospective et la cognition sociale et leurs modifications dans le vieillissement et dans différentes pathologies cérébrales.

Nicolas Benguigui est Professeur en STAPS à l'Université de Caen-Normandie et membre du laboratoire CESAMS. Son travail porte sur l'étude des liens entre perception et action dans les interactions avec l'environnement.

Cynthia Mandil est Doctorante en STAPS à l'Université de Caen-Normandie et membre du laboratoire CESAMS. Son travail de doctorat porte l'intermodalité sensorielle et informations tactiles pour l'aide à la navigation et la gestion des contacts avec l'environnement.

Maroua Mallek est Doctorante en STAPS à l'Université de Caen-Normandie et membre du laboratoire CESAMS. Son travail de doctorat porte sur l'identification des déterminants perceptivo-moteurs et cognitifs de l'expertise en sports de balle.

Laure Lejeune est Maître de Conférences en STAPS à l'Université de Caen-Normandie et membre du laboratoire CESAMS. Ses activités de recherche s'inscrivent dans le domaine de la perception et de l'action chez l'être humain.

Régis Thouwarecq est Professeur en STAPS à l'Université de Caen-Normandie et membre du laboratoire CETAPS, à l'université de Rouen Normandie. Ses travaux de recherche portent sur l'étude des liens entre perception et action.

Emma G. Dupuy : Étudiante en doctorat au sein du laboratoire U1075 COMETE. Mlle Dupuy effectue sa thèse sur l'étude des mécanismes relatifs à l'intégration sensorielle dans le contrôle moteur chez les patients atteints du Syndrome d'Ehlers-Danlos de type hypermobile (SEDh), sous la direction du Dr. Stéphane BESNARD et du Pr. Boris BIENVENU et avec l'encadrement de Leslie M. DECKER.

Arthur Maneuvrier : Étudiant en doctorat au sein du Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle et du laboratoire U1075 COMETE. Mr Maneuvrier commence une thèse dont l'objet porte sur la notion de présence en réalité virtuelle, sous la direction du Pr. Philippe FLEURY et avec l'encadrement de Leslie M. DECKER.

Elodie Vlamynk : Orthopédiste – Orthésiste et chercheur associé au laboratoire U1075 COMETE. En sa qualité de soignante, Mme Vlamynk travaille au plus près des patients atteints du SEDh, expérience qu'elle met au service de la recherche en participant activement au projet portant sur l'étude des pathologies du système nerveux à expression motrice mené au sein du laboratoire COMETE.

Dr. Stéphane Besnard : Maître de Conférences à l'Université de Caen Normandie et Praticien Hospitalier. Le Dr. Besnard est spécialiste de l'intégration sensorielle, et plus spécifiquement du système vestibulaire, thématique sur laquelle il dirige un projet de recherche au sein du laboratoire COMETE.

Pr. Boris Bienvenu : Professeur des Universités et Praticien Hospitalier en Médecine Interne à l'Hôpital Saint Joseph. Le Pr. Bienvenu est médecin-chercheur associé au laboratoire U1075 COMETE, laboratoire au sein duquel il partage sa grande expertise sur la prise en charge et le diagnostic du SEDh.

Leslie M. Decker : Maître de Conférences à l'Université de Caen Normandie et chercheuse au sein du laboratoire U1075 COMETE. Spécialiste du contrôle moteur, Mme Decker dirige le projet portant sur l'étude des pathologies du système nerveux à expression motrice mené par le laboratoire COMETE. Dans ce contexte, elle coordonne l'ensemble des travaux menés sur le SEDh en étroite collaboration avec Pr. Bienvenu et Dr. Besnard.

Catherine Weismann-Arcache est psychologue clinicienne, Maître de Conférences Habilitée à diriger les recherches en Psychologie Clinique et Psychopathologie. Ses travaux portent sur le développement de l'enfant, les processus de pensée, et la parentalité, avec un intérêt particulier pour les fonctionnements dysharmoniques et les anachronismes de la société hypermoderne. À partir d'une clinique de la famille contemporaine et du statut de l'enfant, elle interroge « l'enfant augmenté » (enfant à haut potentiel intellectuel par exemple) et les représentations actuelles concernant le développement et la subjectivation.

Lise Haddouk est psychologue clinicienne et Maître de conférences en psychologie à l'université de Rouen. Créatrice du dispositif de visioconsultation « ipsis.fr », elle a entrepris et poursuit des travaux de recherche ainsi qu'une pratique clinique à distance, s'inscrivant dans le champ de la cyberpsychologie et de la télépsychothérapie. Elle s'intéresse aux concepts de

présence et d'intersubjectivité dans les relations digitales. Elle dirige la collection « Cybercultures », aux éditions Erès.