



Université  
de Toulouse

# Mémoire

## d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR)

**Délivrée par :**

Université Toulouse III Paul Sabatier (UT3)

**Discipline ou spécialité :**

Informatique - Interaction Humain-Machine

---

**Présentée et soutenue par :**

Marc MACÉ, le 10 décembre 2021

**Titre :**

Conception et évaluation de nouvelles technologies  
pour les personnes déficientes visuelles

---

**École doctorale :**

Mathématiques Informatique Télécommunications (MITT)

**Unité de recherche :**

IRIT - UMR 5505

**Jury :**

Nadine Couture, rapporteuse, Prof., ESTIA, Bidart  
Dominique Archambault, rapporteur, Prof., CHArt-Univ. Paris 8, Paris  
Christophe Kolski, rapporteur, Prof., LAMIH-UPHF, Valenciennes  
Anatole Lécuyer, examinateur, DR INRIA, IRISA-INRIA, Rennes  
Emmanuel Dubois, examinateur, Prof., IRIT-UPS-IUT, Toulouse  
Christophe Jouffrais, examinateur, DR CNRS, IPAL-CNRS, Singapour



# Remerciements

L'écriture de son HDR, donne une occasion rare de se retourner sur le chemin parcouru et d'y voir avant tout une succession de rencontres, souvent heureuses et passionnantes.

C'était bien sûr le cas avec Michèle Fabre-Thorpe et Simon Thorpe, qui m'ont accordé leur confiance et ont su discerner que j'étais capable de « faire carrière » en sciences. Je leur suis très reconnaissant pour leur soutien indéfectible au cours des six (!) années passées au CerCo ; c'est indubitablement grâce à eux que j'en suis là aujourd'hui. Et aussi grâce à mon compère de thèse Guillaume Rousselet, aussi brillant qu'exubérant.

Une autre rencontre humaine et scientifique qui a marqué mon parcours s'est également produite au CerCo. Christophe Jouffrais y effectuait un postdoc avant son recrutement au CNRS. Son projet de recherche m'avait emballé et nous avons projeté de travailler ensemble à mon retour de postdoctorat en Belgique. Ce que nous avons fait, et depuis plus de dix ans maintenant ! Ça aura été un plaisir de travailler avec Christophe.

À mon arrivée à l'IRIT le contraste culturel et sémantique entre biologie et informatique a été assez sévère, mais j'ai pu compter sur l'accueil chaleureux des actuels membres de l'équipe ELIPSE pour m'adapter. Un grand merci à Manu Dubois et un presque aussi grand merci à Marcos Serrano qui ont accepté la tâche nécessaire de responsable d'équipe. Pas toujours facile de composer avec les sensibilités de chacun ; ils auront bien navigué ces dix dernières années. Sans les citer nommément (à part Bernard Oriola, bien sûr), je remercie tous les membres de l'équipe ; nous aurons passé de belles années ensemble.

Nous savons que la recherche n'avance pas sans ses forces vives : les étudiants ! L'occasion pour moi de remercier tous ceux que j'ai pu encadrer pendant mes années à l'IRIT ; ils ont chacun et chacune contribué à « faire avancer la recherche ». Dans cet édifice, les doctorants occupent une place particulière. Merci à Grégoire Denis (pas que pour la thèse), Victor Vergnieux et Julie Ducasse d'avoir servi la science ensemble. Et même s'ils ne liront jamais ces lignes, je profite de ce paragraphe pour remercier tout le personnel de l'IRIT, les professionnels de l'IJA et les sujets d'expériences, voyants et non-voyants, sans qui rien de tout cela ne serait possible.

Merci aux membres de ce jury d'HDR, qui malgré leurs emplois du temps bien remplis, ont accepté de se pencher sur ce travail.

Enfin, j'adresse des remerciements tous particuliers à Mathieu Raynal, le copain de course à pied chez ELIPSE devenu bien plus et qui a été d'une aide inestimable par ses encouragements et ses relances pour que cette HDR soit enfin derrière, peu de temps après la sienne (bravo au passage!).

*Et merci bien sûr à ceux qui, malgré tous les gens que j'ai cités, comptent bien plus encore dans ma vie...*



# Mémoire d'habilitation à diriger des recherches

## *Conception et évaluation de nouvelles technologies pour les personnes déficientes visuelles*

Marc Macé

### Résumé :

Dans ce mémoire d'HDR, je présente une synthèse des travaux que j'ai effectués à l'IRIT au cours des 10 dernières années, notamment lors de l'encadrement de 3 doctorats soutenus. Une courte introduction permet de retracer mon parcours et s'attache à replacer quelques éléments de contexte sur la déficience visuelle et montrer l'importance sociétale de ce thème de recherche. Après une thèse en neurosciences sur la catégorisation visuelle et un postdoctorat sur la boucle perception-action, j'ai effectué une transition vers l'informatique pour contribuer aux recherches sur les technologies d'assistance et de suppléance pour les personnes déficientes visuelles. De par ma formation et la nature fortement interdisciplinaire de l'IHM, les travaux que je présente sont souvent à l'interface entre IHM et sciences cognitives.

Dans le 1<sup>er</sup> chapitre, je détaille les travaux menés dans le cadre d'un projet ANR et de la thèse de Julie Ducasse sur la conception et l'évaluation de dispositifs tactiles et tangibles interactifs pour l'aide à la préparation d'itinéraires et la compréhension de graphiques et de cartes pour des personnes non-voyantes.

Le 2<sup>ème</sup> chapitre aborde des travaux sur la simulation de neuroprothèses visuelles menés dans le cadre de 2 thèses. La première, de Grégoire Denis, sur l'apport de la vision par machine (reconnaissance d'objets) pour améliorer l'utilisabilité des implants actuels. La seconde, de Victor Vergnieux, sur la génération de rendus visuels simplifiés dans une tâche de navigation en environnement virtuel. Les résultats obtenus permettent d'envisager une amélioration de l'utilisabilité des implants en adaptant l'information visuelle qu'ils restituent pour qu'elle soit plus facilement interprétable par la personne implantée.

Le dernier chapitre présente un projet de recherche pour les 5+ années à venir. Le projet que je propose de mener n'est pas directement aligné avec les travaux présentés dans ce mémoire. J'effectue une transition thématique vers un autre domaine de l'informatique, connexe à l'IHM : la réalité virtuelle et la réalité augmentée. Ceci m'amène à également changer de laboratoire : c'est à l'IRISA à Rennes, dans l'équipe Hybrid que je mènerai ce projet. Il s'agira d'améliorer l'utilisabilité des systèmes de réalité virtuelle et de réalité augmentée en s'appuyant sur une approche mêlant interface cerveau-machine, design d'interactions 3D et interfaces haptiques innovantes.

**Mots-clés** : Déficience visuelle, simulation de neuroprothèse visuelle, cognition spatiale, technologies de suppléance, interactions non-visuelles, interaction tangible, réalité virtuelle, réalité augmentée, interface cerveau-ordinateur.



# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>Résumé</b>	<b>v</b>
<b>Table des matières</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>x</b>
<b>0 Introduction</b>	<b>1</b>
0.1 Contenu du mémoire . . . . .	2
0.2 Parcours professionnel . . . . .	2
0.3 Déficience visuelle . . . . .	5
0.3.1 Contexte historique (résumé) . . . . .	5
0.3.2 Prévalence . . . . .	6
0.3.3 Définitions . . . . .	6
0.3.4 Causes . . . . .	7
0.4 Impact de la déficience visuelle . . . . .	8
0.4.1 Impact socio-culturel . . . . .	10
0.4.2 Impact économique . . . . .	11
0.4.3 Impact éducatif . . . . .	13
0.5 Intérêt des nouvelles technologies . . . . .	14
<b>1 Interactions tactiles et tangibles</b>	<b>17</b>
1.1 Cognition spatiale . . . . .	18
1.1.1 Représentations mentales . . . . .	18
1.1.2 Cadre de référence . . . . .	19
1.1.3 Développement de la cognition spatiale . . . . .	19
1.1.4 Représentations spatiales d'itinéraires . . . . .	20
1.1.5 Représentations spatiales chez les personnes non-voyantes . . . . .	20
1.2 Graphiques tactiles pour personnes déficientes visuelles . . . . .	22
1.2.1 Perception tactile . . . . .	22
1.2.2 Exploration tactile de graphiques . . . . .	23
1.2.3 Supports statiques . . . . .	23
1.2.4 Supports dynamiques . . . . .	24
1.2.5 Limitations et solutions . . . . .	25
1.3 Documents en relief interactifs . . . . .	26
1.3.1 Dispositifs tactiles interactifs . . . . .	26

## TABLE DES MATIÈRES

1.3.2	DERi . . . . .	27
1.4	Interactions tangibles . . . . .	31
1.4.1	Tangible Box . . . . .	33
1.4.2	Puzzle interactif . . . . .	36
1.4.3	Tangible Reels . . . . .	38
1.4.4	BotMap . . . . .	40
1.5	Discussion . . . . .	42
<b>2</b>	<b>Simulation de neuroprothèses visuelles</b>	<b>51</b>
2.1	Contexte des neuroprothèses . . . . .	52
2.2	Neuroprothèses visuelles . . . . .	54
2.2.1	Neuroprothèses corticales . . . . .	54
2.2.2	Neuroprothèses rétiniennes . . . . .	55
2.3	Limitations et solutions . . . . .	57
2.4	Simulation de neuroprothèses visuelles . . . . .	59
2.4.1	Conception du simulateur . . . . .	60
2.4.2	Reconnaissance d'objets . . . . .	62
2.4.3	Détection de visages . . . . .	64
2.4.4	Détection de texte . . . . .	67
2.4.5	Navigation dans un environnement virtuel . . . . .	69
2.5	Discussion . . . . .	71
<b>3</b>	<b>Projet de recherche</b>	<b>75</b>
3.1	Contexte . . . . .	76
3.1.1	Pourquoi la réalité virtuelle? . . . . .	76
3.1.2	Pourquoi l'équipe Hybrid à l'IRISA . . . . .	76
3.2	Projet scientifique . . . . .	77
3.2.1	Études des paramètres électrophysiologiques en RV/RA . . . . .	78
3.2.2	Améliorer l'utilisabilité de la RV/RA via des ICM . . . . .	80
3.2.3	Étude du couplage d'ICM et d'interfaces haptiques . . . . .	81
3.3	Impact scientifique et sociétal . . . . .	82
3.4	Conclusion . . . . .	83
	<b>Bibliographie</b>	<b>86</b>
	<b>Curriculum Vitæ</b>	<b>102</b>
1	Parcours universitaire . . . . .	102
2	Parcours professionnel . . . . .	102
3	Activités d'enseignement et encadrement . . . . .	103
4	Activités de recherche . . . . .	104
5	Chronologie . . . . .	108
6	Liste complète des publications . . . . .	109
	<b>Liste des acronymes</b>	<b>116</b>



# Liste des tableaux

<b>Introduction</b>	
1	Définitions relatives à la non-voyance en France . . . . . 7
<b>Interactions tactiles et tangibles</b>	
2	Taux de succès pour 4 tâches dans BotMap . . . . . 41
3	Contributions chapitre 1 : interactions tactiles et tangibles . . . . . 49
<b>Simulation de neuroprothèses visuelles</b>	
4	Contributions chapitre 2 : simulation de neuroprothèses . . . . . 73
<b>Curriculum Vitæ</b>	
5	CV1 Encadrement de stages de Master 2 . . . . . 104
6	CV2 Encadrement de stages de Master 1 . . . . . 104
7	CV3 Encadrement de stages en IUT . . . . . 104

# Liste des figures

## Introduction

1	Catégorisation visuelle d'images naturelles à contraste réduit . . . . .	3
2	Activation cérébrale spécifique d'un mouvement bimanuel . . . . .	3
3	Répartition des causes de cécité dans le monde . . . . .	8
4	Évolution sémantique du terme « handicap » en France . . . . .	10
5	Employabilité perçue des personnes déficientes visuelles . . . . .	12

## Interactions tactiles et tangibles

6	Modèle 'Landmark, Route, Survey' des connaissances spatiales . . . . .	20
7	DER statiques : thermogonflage et thermoformage . . . . .	24
8	DER dynamiques : tableau magnétique, éléments en Velcro et HyperBraille	24
9	Carte thermogonflée accompagnée de sa légende en braille . . . . .	25
10	Système audio-tactile : 'Tactile Talking Computer' . . . . .	26
11	Dispositif audio-tactile DERi . . . . .	28
12	Efficience de DERi pour l'apprentissage d'une carte . . . . .	29
13	Version DERi sur tablette . . . . .	30
14	Tangible non-visuel : 'Tangible Graph Builder' . . . . .	32
15	Schémas des pions magnétiques de la Tangible Box . . . . .	33
16	Photographie de la Tangible Box . . . . .	34
17	Adaptation sur la Tangible Box d'un jeu collaboratif . . . . .	35
18	Exemple d'un plan tangible interactif sur la Tangible Box . . . . .	35
19	Puzzle interactif tangible . . . . .	37
20	Score de performance sur le Puzzle interactif . . . . .	37
21	Représentation schématique des Tangible Reels . . . . .	39
22	Facilité d'utilisation perçue pour les Tangible Reels . . . . .	39
23	Cartographie dynamique utilisant des robots . . . . .	40
24	Carte de France dans BotMap . . . . .	41
25	Illustration de multiples projets . . . . .	45

## Simulation de neuroprothèses visuelles

26	Dispositifs de substitution sensorielle . . . . .	53
27	Matrice de stimulation corticale avec des électrodes de surface . . . . .	54
28	Schéma de fonctionnement d'une neuroprothèse épirétinienne . . . . .	56
29	Prévision en 2009 du nombre d'électrodes dans les futurs implants . . . . .	58
30	Exemples de rendus prothétique simulant une neuroprothèse . . . . .	63
31	Expérience de reconnaissance d'objets en vision prothétique simulée . . . . .	63
32	Précision dans la tâche de reconnaissance d'objets . . . . .	64

33	Expérience de localisation de visages en vision prothétique simulée . . .	65
34	Architecture du simulateur pour la tâche de localisation de visages . . .	66
35	Performance dans la tâche de localisation de visages . . . . .	66
36	Expérience de localisation de blocs de texte en vision prothétique simulée	68
37	Résultats dans la tâche de localisation de blocs de texte . . . . .	68
38	Expérience de navigation en vision prothétique simulée . . . . .	70
39	Résultats dans la tâche de navigation en environnement virtuel . . . . .	70
<b>Projet de recherche</b>		
40	Expérience d'un doigt surnuméraire en réalité virtuelle . . . . .	79
41	Plate-forme de réalité virtuelle Immersia à l'IRISA . . . . .	80
42	Illustration du projet Lobby-Bot . . . . .	82
<b>Curriculum Vitæ</b>		
43	Frise chronologique . . . . .	108





# Introduction

## Sommaire

---

<b>0.1</b>	<b>Contenu du mémoire</b>	<b>2</b>
<b>0.2</b>	<b>Parcours professionnel</b>	<b>2</b>
<b>0.3</b>	<b>Déficience visuelle</b>	<b>5</b>
0.3.1	Contexte historique (résumé)	5
0.3.2	Prévalence	6
0.3.3	Définitions	6
0.3.4	Causes	7
<b>0.4</b>	<b>Impact de la déficience visuelle</b>	<b>8</b>
0.4.1	Impact socio-culturel	10
0.4.2	Impact économique	11
0.4.3	Impact éducatif	13
<b>0.5</b>	<b>Intérêt des nouvelles technologies</b>	<b>14</b>

---

## 0.1 Contenu du mémoire

Ce mémoire est organisé en 4 parties :

(1) une introduction présentant le contexte personnel dans lequel s'inscrivent mes travaux et leur cadre de recherche dans le domaine de la déficience visuelle. Sont abordés brièvement un historique de la déficience visuelle, ses principales causes, sa prévalence et son impact sur l'individu et la société.

(2) un chapitre portant sur mes recherches visant à améliorer la perception des graphiques et des cartes par les personnes déficientes visuelles via la conception et le prototypage d'outils numériques : cartes en relief interactives, dispositifs tangibles interactifs, petits robots autonomes.

(3) un chapitre portant sur mes travaux de simulation de neuroprothèses visuelles dans lequel je montre les limites de l'approche traditionnellement utilisée dans le domaine et la solution proposée, mettant en œuvre des algorithmes de reconnaissance d'objets pour simplifier la représentation visuelle et améliorer son intelligibilité pour les personnes implantées.

(4) un projet de recherche pour les 5+ prochaines années. Le projet que je propose de mener n'est pas directement aligné avec les travaux présentés dans ce document ; il traduit un changement de perspectives et je le mènerai dans un autre laboratoire. J'ai en effet décidé au cours de ces deux dernières années d'effectuer une transition vers un autre domaine de l'informatique, connexe à l'IHM : la *Réalité Virtuelle / Réalité Augmentée (RV/RA)*. Le projet que je souhaite réaliser s'appuiera sur une approche mêlant interface cerveau-machine, design d'interactions et interfaces haptiques pour améliorer l'utilisabilité des systèmes de RV/RA.

Un *CV* détaillé incluant la liste complète de mes publications se trouve en fin de document.

## 0.2 Parcours professionnel

Ce mémoire reflétant ma carrière scientifique, je souhaite l'introduire avec quelques mots sur mon parcours personnel et professionnel ; ils éclaireront certains des choix que j'ai pu faire et l'attrait pour l'interdisciplinarité qui a toujours guidé ma démarche.

### Formation initiale et doctorat

Je suis biologiste de formation. C'est à l'Université Paul Sabatier (UPS) à Toulouse que j'ai effectué mes études supérieures. Une grande partie des travaux que j'ai menés entre mon *DEA* et mon premier postdoctorat se sont concentrés sur la modalité visuelle. J'ai débuté mes recherches en 2000 en stage de maîtrise dans un laboratoire toulousain de neurosciences, le CerCo.

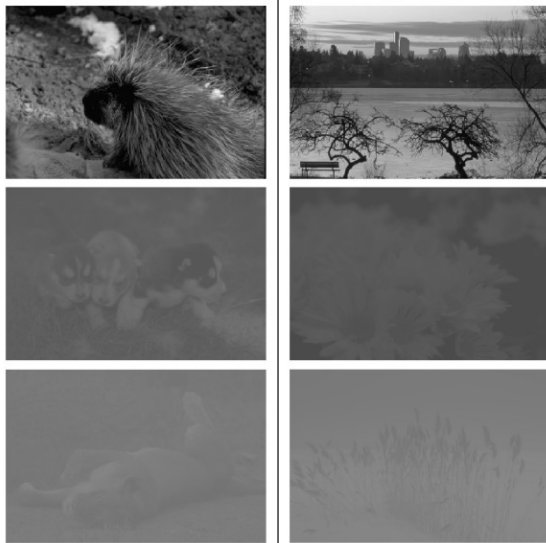


FIGURE 1 – Exemple de réduction du contraste dans des images utilisées pour une tâche de catégorisation visuelle animal/non-animal

J’y ai effectué un stage de DEA et poursuivi avec une thèse en neurosciences sous la direction de Michèle Fabre-Thorpe sur la problématique de la reconnaissance d’objets en analysant la vitesse et la robustesse des processus de catégorisation visuelle, à travers l’application de divers types de dégradations sur des images naturelles (MACÉ, THORPE et al., 2005; MACÉ, RICHARD et al., 2005; MACÉ et al., 2010), (Figure 1). La plupart de ces expériences ont été menées en comportement chez l’homme et le singe ainsi qu’en électrophysiologie chez l’homme (EEG). Ces travaux ont notamment permis de montrer que les informations magnocellulaires, les premières disponibles dans la chaîne de traitements visuels mais également les moins détaillées, sont suffisantes

pour appuyer une catégorisation à gros grain des images (par exemple animal / non animal), mais que les informations parvocellulaires, plus précises mais disponibles plus tardivement sont probablement nécessaires pour accéder à des catégories plus fines (par exemple distinguer les images de chiens de celles pouvant contenir d’autres animaux).

### Postdoctorat en Belgique

Intéressé par la boucle sensori-motrice, j’ai souhaité mener en postdoctorat (2006-2008) des études sur le système moteur. Au sein du laboratoire de Stephan Swinnen (Motor Control Lab - Leuven, Belgique), j’ai mesuré la réactivité corticale par Stimulation Magnétique Transcranienne de la boucle sensori-motrice à divers types de stimulation par mouvements passifs ou actifs, dans une optique de rééducation fonctionnelle (MACÉ et al., 2008). Dans la deuxième partie de ce postdoctorat, j’ai collaboré avec Guy Orban (à l’époque, directeur du Neurophysiology Lab - Leuven, Belgique) sur la perception de mouvements. Nous avons en particulier montré en IRMf que des zones du cortex pariétal sont spécifiquement plus activées lorsqu’un mouvement bi-manuel est perçu, comparativement à un mouvement uni-manuel (HEITGER et al., 2012) (Figure 2).

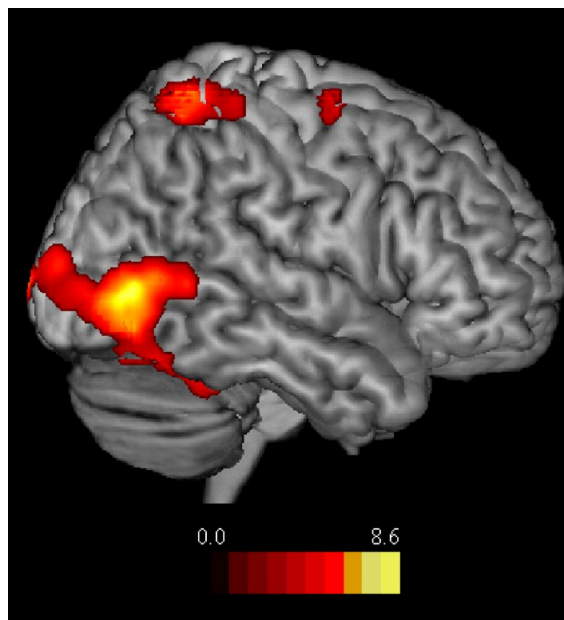


FIGURE 2 – Zone préférentiellement activée dans le cortex pariétal lors de la perception d’un mouvement bimanuel vs unimanuel



## Postdoctorat à l'IRIT

Après deux ans en Belgique, j'ai opéré un virage thématique vers l'informatique en rentrant en France pour effectuer un postdoctorat à l'IRIT<sup>1</sup> dans l'équipe nommée ELIPSE avec Christophe Jouffrais, dont j'avais suivi les travaux à distance. L'IRIT est l'un des plus grands laboratoires en informatique du CNRS et l'équipe ELIPSE est spécialisée en IHM, domaine fondamentalement interdisciplinaire dans lequel des informaticiens, psychologues et cognitivistes collaborent pour prendre en compte les multiples aspects des interactions entre humains et machines. Une partie de l'équipe contribue à l'IHM en développant des techniques d'interactions avancées s'appuyant sur des smartphones et tablettes (BERGÉ et al., 2014; PERELMAN et al., 2019; GULATI et al., 2020), des interactions gestuelles (SAIDI et al., 2019), des systèmes multi-surfaces (PECCHIOLI et al., 2019), des dispositifs de réalité augmentée (CABRIC et al., 2019), des interfaces tangibles (SAIDI et al., 2017) ou des écrans non-rectangulaires (SIMON et al., 2019). L'autre partie de l'équipe (dont je fais partie) se focalise sur l'assistance et la suppléance pour contribuer à l'IHM, avec des applications dans le cadre d'un handicap moteur (BERTRAND et al., 2016; SAUZIN et al., 2017) ou sensoriel, majoritairement visuel (KAMMOUN, JOUFFRAIS et al., 2012; GIRAUD et al., 2017). C'est d'ailleurs sur la simulation de neuroprothèses visuelles, une thématique essentiellement à l'interface entre les neurosciences et l'informatique qu'a porté mon premier postdoctorat à l'IRIT. Il s'agissait de développer un moteur de rendu permettant de simuler le plus précisément possible la perception visuelle restaurée chez des personnes non-voyantes recevant un implant.

## Recrutement au CNRS

En 2010, j'ai candidaté au CNRS sur un poste de CR2. Mon projet de recherche portait sur la simulation de neuroprothèses et s'inscrivait naturellement en section interdisciplinaire CID 44 (cognition, traitement de l'information, systèmes naturels et artificiels). Après mon recrutement dans cette section, j'ai donc poursuivi mes recherches à l'IRIT sur la simulation de neuroprothèses visuelles à la fois pour des tâches de saisie d'objets avec la thèse de Grégoire Denis (co-encadrement à 50 %, 2011-2014) et de navigation dans des environnements virtuels avec la thèse de Victor Vergnien (co-encadrement à 50 %, 2012-2015). Ces travaux sont présentés dans le [chapitre 2](#).

Parallèlement à mes travaux sur les neuroprothèses, qui ont un impact à relativement long terme pour les personnes déficientes visuelles, je souhaitais mener des recherches ayant des implications à plus court terme. C'est pourquoi, je me suis intéressé aux problématiques spécifiques aux non-voyants qu'il était possible d'aborder sans délai en ayant recours à des « nouvelles » technologies existantes. La question de la navigation est assez centrale dans les limitations d'autonomie pour les personnes déficientes visuelles. C'est cette thématique qui m'a amené à m'intéresser à la manière dont les personnes non-voyantes forment des représentations spatiales. Leur acquisition, notamment pour la préparation d'itinéraire, se fait le plus souvent au moyen de cartes en relief. Une part importante de mes activités de recherche a alors consisté à faciliter l'exploration et la compréhension de cartes et graphiques en concevant et évaluant des dispositifs pour les augmenter d'informations numériques (thèse de Julie Ducasse (co-encadrement à 50 %, 2014-2017)). Ce thème de recherche est abordé dans le [chapitre 1](#).

---

1. <https://www.irit.fr>

### Laboratoire commun « Cherchons pour voir »

Les dispositifs interactifs que nous avons développés au sein du laboratoire au cours de plusieurs projets successifs ont été testés par des personnes non-voyantes. Lors de ces tests, les utilisateurs étaient enthousiastes et exprimaient de fortes attentes pour les dispositifs qu'ils avaient eu l'occasion d'évaluer. Beaucoup de nos utilisateurs et des professionnels de la déficience avec qui nous collaborions faisaient partie de l'Institut des Jeunes Aveugles de Toulouse (IJA), spécialisé dans l'accompagnement éducatif et pédagogique des enfants malvoyants et aveugles. Cette collaboration a pris une dimension plus structurée avec la création d'un laboratoire commun entre l'IRIT et l'IJA. Le laboratoire « Cherchons Pour Voir »<sup>2</sup> (CPV) constitue ainsi un lien privilégié pour co-développer, expérimenter et diffuser les dispositifs auprès des professionnels de l'accompagnement, des personnes déficientes visuelles et de leur entourage.

## 0.3 Déficience visuelle

Cette section présente une brève introduction à la déficience visuelle et ne vise pas à être exhaustive. Des ouvrages et rapports spécialisés peuvent être consultés pour apporter plus de précisions sur cette problématique (WEYGAND, 2003 ; GALIANO, 2013 ; ROBERT, 2017 ; OMS, 2020). Néanmoins, il me semble important d'aborder les enjeux individuels et sociétaux associés à cette forme de handicap, pour positionner le cadre des travaux que j'ai réalisés ces dix dernières années.

### 0.3.1 Contexte historique (résumé)

La vision pourvoit plus de la moitié des informations qui nous parviennent du monde extérieur. Un million de fibres nerveuses partent de chaque œil, à comparer avec les quelques milliers de fibres qui constituent le nerf auditif. La vision est très prégnante chez l'humain et sa dégradation ou sa perte complète a bien sûr des conséquences fonctionnelles majeures et un impact important sur la qualité de vie des personnes affectées. L'aveuglement était d'ailleurs régulièrement utilisé au Moyen-Âge comme un châtiment pénal ou un moyen de diminuer les capacités de son adversaire. À l'échelle de la planète et en particulier pour les pays en développement, le coût humain, social et économique de la malvoyance est considérable.

Dans l'histoire, les premiers exemples d'actions concertées pour améliorer le sort des personnes déficientes visuelles, jusque-là le plus souvent livrées à elles-mêmes et réduites à la mendicité, apparaissent dans la société du Moyen-Âge. En France, l'hospice des Quinze-Vingt, accueillant comme son nom l'indique 300 personnes non-voyantes est par exemple fondé par Saint-Louis vers 1260. Le soin aux personnes aveugles est alors prodigué en échange de prières pour le salut de l'âme des donateurs. Même si certaines institutions recueillent les personnes déficientes visuelles tout au long du Moyen-Âge, les efforts pour tenter d'intégrer ces personnes dans la société civile ne commencent vraiment qu'au 18<sup>ème</sup> siècle. La perception de la société évolue notamment grâce à la publication par Rousseau de sa « Lettre sur les aveugles à l'usage de ceux qui voient » en 1749 et qui lui vaudra trois mois d'emprisonnement pour ses positions religieuses. L'éducation que commencent à recevoir ponctuellement des aveugles nés dans des familles opulentes permet à certains d'entre eux d'acquérir une notoriété qui

---

2. <https://cherchonspourvoir.org/>

participe aussi à l'évolution des mentalités. C'est le cas notamment de personnages devenus célèbres comme François Malaval, théologien français, (1627-1719), Nicholas Saunderson, mathématicien anglais (1682-1739), ou encore Maria-Theresia von Paradis, musicienne autrichienne (1754-1824).

Mais ce n'est véritablement qu'à la fin du 18<sup>ème</sup> que les efforts pour donner une éducation aux jeunes aveugles se concrétisent avec la création en 1785 par Valentin Haüy de la première école au monde pour éduquer spécifiquement les non-voyants : « l'institution des enfants-aveugles ». L'État reprendra six ans plus tard cette tâche à sa charge et l'établissement devient l'Institut National des Jeunes Aveugles (INJA), qui perdure aujourd'hui sous le même nom.

La situation des personnes déficientes visuelles a bien sûr considérablement évolué et même si de nombreux efforts restent à faire, de nos jours la nécessité de fournir une éducation adéquate à toutes les personnes ayant des besoins particuliers est devenue une évidence, même si, dans les faits, l'accès à une éducation adaptée reste un défi.

### 0.3.2 Prévalence

Selon un rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) datant de 2020 (OMS, 2020), environ 2,2 milliards de personnes dans le monde ont des difficultés de perception visuelle ; 1 milliard d'entre elles ayant des affections qui pourraient être facilement corrigées (presbytie, aberrations optique et cataracte). Parmi ces 2,2 milliards de personnes, 285 millions sont très malvoyantes, 40 millions d'entre elles étant aveugles. Le niveau économique des pays a un impact important sur la prise en charge de la déficience visuelle et la prévalence de la malvoyance est par exemple huit fois plus élevée en Afrique sub-saharienne qu'en Europe.

En France, environ 1,7 million de personnes ont une déficience visuelle, soit 2,9 % de la population ; 200 000 étant reconnues légalement aveugles. Les statistiques de la cécité concernant les enfants ne sont pas officiellement compilées en France, car il n'existe pas de recueil épidémiologique national validé, mais la Fédération des Aveugles de France (FAF) estime qu'il y a environ 10 000 enfants non-voyants en âge scolaire, soit entre 0,7 ‰ et 0,8 ‰.

### 0.3.3 Définitions

Dans un souci de clarté, il est nécessaire de définir certains termes que nous utiliserons tout au long de ce mémoire.

Pour englober toutes les personnes ayant une vision dégradée, on parle de personnes déficientes visuelles. Ce terme regroupe toutes les personnes dites non-voyantes et les personnes dites malvoyantes.

Le terme de non-voyant regroupe à la fois les personnes aveugles et les personnes ayant une déficience visuelle sévère. En effet, si la définition de cécité au sens du dictionnaire est l'absence totale de vision, nous l'entendrons ici dans sa version légale (cécité légale), qui correspond à une catégorie de handicap visuel, dans laquelle les personnes atteintes ont un déficit fonctionnel équivalent à l'état de cécité. Le seuil légal de cécité dépend du pays et conditionne souvent l'accès à des aides sociales. L'acuité visuelle ordinaire correspond à un pouvoir de séparation entre deux points d'une minute d'arc. Elle est exprimée en dixièmes ; ainsi une capacité à discriminer deux points séparés d'une

minute d'arc correspond à une acuité de  $\frac{10}{10}$ ème alors qu'une capacité à séparer deux points séparés de cinq minutes d'arc correspond à une acuité de  $10 \times \frac{1}{5}$ , soit  $\frac{2}{10}$ ème. Au niveau international, le seuil de cécité défini par l'OMS est de  $\frac{1}{20}$ ème, soit une capacité à discriminer deux points séparés d'un tiers de degré. En France, la définition est moins restrictive et sont considérées comme légalement aveugles les personnes dont la vision est inférieure à  $\frac{1}{20}$ ème (identique au seuil de l'OMS) ou dont le champ visuel est inférieur à 10 degrés dans le cas d'une vision tubulaire (vision tunnel ; le champ visuel normal s'étalant sur 170°). Fonctionnellement, les personnes concernées par la cécité légale ont un déficit allant de l'absence totale de perception lumineuse à des capacités résiduelles permettant de distinguer des silhouettes ou de grands objets fortement contrastés.

Le terme de malvoyant, se rapporte à une déficience visuelle sévère à moyenne pour laquelle l'acuité visuelle après correction est comprise entre  $\frac{1}{20}$ ème et  $\frac{4}{10}$ ème ou dont le champ visuel est compris entre 10 et 20°. Sans dispositif adapté, la lecture est difficile voire impossible. La conduite est par ailleurs interdite avec une vision binoculaire corrigée inférieure à  $\frac{5}{10}$ ème.

Le [tableau 1](#) récapitule ces définitions :

TABLEAU 1 – Définitions relatives à la non-voyance en France

Qualificatif	Déficients visuels		
	Non-voyants		Malvoyants
	Cécité légale		Déficience vis. modérée à sévère
Acuité et champ visuel	Absence de vision	Inférieure à $\frac{1}{20}$ ème ou champ visuel inférieur à 10°	Inférieure à $\frac{4}{10}$ ème ou champ visuel inférieur à 20°
Capacité(s) résiduelle(s)	Nulle	Présence/absence de lumière, gros objet contrastés, silhouettes	Reconnaiss. objets/visages de près. Lecture avec grossissement

### 0.3.4 Causes

Une répartition des principales causes de la cécité à l'échelle mondiale est présentée dans la [figure 3](#). Cette répartition est bien différente selon le niveau de vie des pays considérés. Dans les pays en développement, les causes principales sont les défauts de réfraction non corrigés, la cataracte, le glaucome et le trachome. La plupart de ces causes sont évitables et c'est l'accès limité aux soins qui explique leur prévalence élevée.

Dans les pays à revenus élevés, les affections qui causent le plus de cécité sont la Dégénérescence Maculaire Liée à l'Âge (DMLA), le glaucome, les rétinopathies diabétiques et les rétinites pigmentaires. Environ 5 % des personnes aveugles ont moins de 20 ans et plus de 50 % sont âgées de plus de 60 ans.

Chez les enfants, toujours dans les pays à haut revenus, les principales causes sont périnatales et héréditaires (rétinopathies du prématuré, dégénérescences rétiniennes, albinisme, anomalies développementales, cataracte congénitale, rétinoblastome) avant les causes infectieuses et accidentelles. Plus de la moitié des cas de déficience visuelle ou cécité chez l'enfant sont associés à d'autres déficiences (motrices, intellectuelles, sensorielles). Ces situations de polyhandicap compliquent la prise en charge et limitent l'autonomie de l'enfant au cours de son développement.

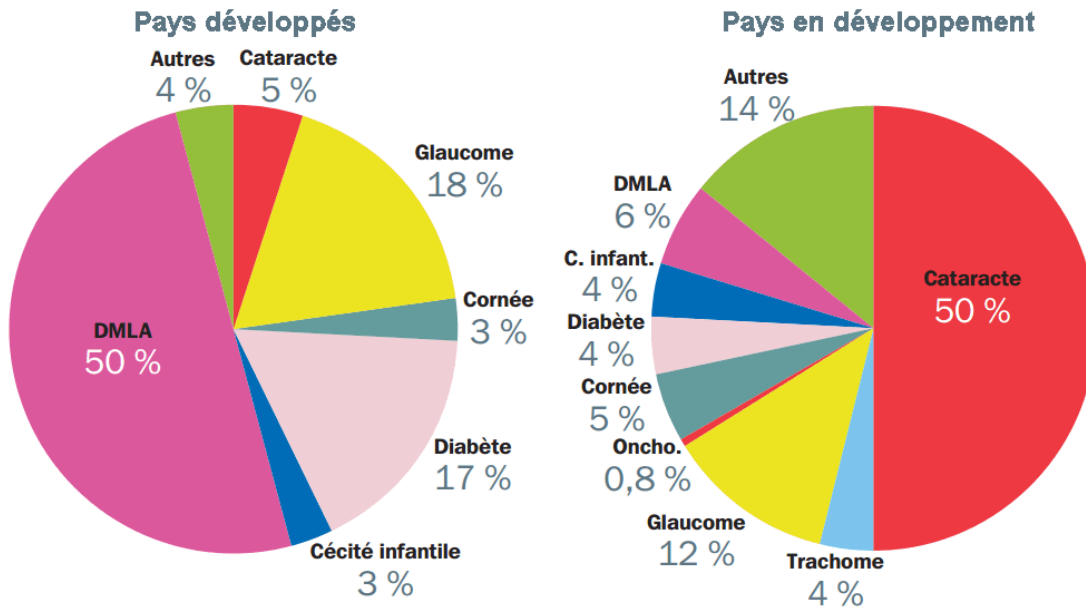


FIGURE 3 – Le graphique présente la répartition des causes de cécité dans les pays à revenus élevés et les pays en développement (OMS 2005)

## 0.4 Impact de la déficience visuelle

L'OMS<sup>3</sup> rappelle que le handicap n'est pas simplement un problème de santé :  
*« Il s'agit d'un phénomène complexe qui découle de l'interaction entre les caractéristiques corporelles d'une personne et les caractéristiques de la société où elle vit. Pour surmonter les difficultés auxquelles les personnes handicapées sont confrontées, des interventions destinées à lever les obstacles environnementaux et sociaux sont nécessaires ».*

La première classification internationale du handicap<sup>4</sup> dans les années 80 reposait sur une conception purement médicale en établissant une relation directe de cause à effet entre l'altération du corps ou de l'esprit (la déficience), la réduction des capacités fonctionnelles (incapacités) et leurs conséquences sur les activités (les désavantages). Un important glissement de paradigme s'est opéré en quelques décennies pour intégrer le fait que le contexte physique et social a aussi une grande importance dans les difficultés rencontrées au quotidien et que la déficience n'est pas seule source du handicap :

*« à déficience identique, les incapacités, les restrictions d'activités et de participation sont très variables selon les individus et le contexte dans lequel ils évoluent » (CAMBERLEIN, 2011).*

3. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health>

4. La Classification Internationale des Handicaps : déficiences, incapacités, désavantages (CIH), publiée en 1988, avait pour objectif de fournir un langage uniformisé et normalisé pour caractériser le handicap.

Une nouvelle classification<sup>5</sup> de l’OMS en a découlée au début des années 2000, largement inspirée de la réflexion sur le processus de production du handicap<sup>6</sup> proposé par Fougeyrollas et collègues en 1998 (FOUGEYROLLAS et al., 1998). La nouvelle classification, toujours en vigueur, prend en compte les facteurs personnels et environnementaux comme facteurs impliqués dans l’augmentation ou la diminution de la situation de handicap (LESPINET-NAJIB et BELIO, 2013).

Cette évolution de la représentation du handicap a participé à la constitution d’un cadre juridique plus solide en France, notamment avec la loi du 11 février 2005<sup>7</sup> pour « l’égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées ». Elle introduit non seulement la notion de projet de vie autour du droit de la personne à décider de son avenir et de sa vie, mais elle place aussi l’accessibilité au cœur de ses principes pour soutenir la participation des personnes handicapées à la vie sociale :

*« La question de l’accessibilité, jusqu’ici restreinte au cadre bâti, est désormais élargie à l’ensemble des domaines de la vie sociale : scolarité, emploi, culture, loisirs, vacances, etc. » SANCHEZ, 2005.*

Cette évolution conceptuelle, en passant d’un modèle individuel à un modèle social du handicap (Figure 4), insiste sur les potentialités et la capacité d’autonomie de la personne plutôt que sur ses incapacités. C’est bien au point de rencontre entre les limitations individuelles et l’environnement de la personne que s’inscrivent les difficultés rencontrées par les personnes déficientes visuelles au quotidien. Pour réduire les situations de handicap, il est donc possible d’agir à la fois en contournant les limitations individuelles et en portant des actions d’adaptation sur le contexte environnemental. Les travaux que je présente dans ce document prennent en compte cette double approche en mobilisant des technologies d’assistance (chapitre 1) pour agir sur le contexte environnemental et des technologies de suppléance (chapitre 2) pour réduire les limitations individuelles.

Comme je le présente ci-dessous, ces atteintes individuelles concernent au final toute la société à cause du coût important qu’elles engendrent, qu’il s’agisse de la perte d’opportunité ou de l’investissement dans des dispositifs de prise en charge pour réduire l’impact économique, socio-culturel et éducatif de ce handicap.

---

5. La Classification Internationale du Fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF), publiée en 2001 (OMS, 2001), introduit aussi l’idée que le handicap peut être perçu comme :

- une déficience lorsque la difficulté concerne la dimension physique, une fonction organique
- une limitation d’activité lorsque la difficulté concerne une tâche / une action de la vie quotidienne
- une restriction de participation lorsque la personne rencontre une difficulté pour s’intégrer

6. Le Processus de Production du Handicap (PPH) aborde le handicap dans une perspective systémique (les habitudes de vie interagissent avec les facteurs personnels et environnementaux) et dynamique (le développement et l’adaptation de l’individu se poursuivent toute sa vie). Proposé en 1998, il a été depuis complété par un modèle dit « bonifié » en 2010 (PPH bonifié).

7. La loi de 2005 est un texte qui aborde tous les aspects auxquels une personne handicapée est confrontée dans la vie : compensation des ressources, accessibilité, transport, évaluation des besoins, citoyenneté, etc.

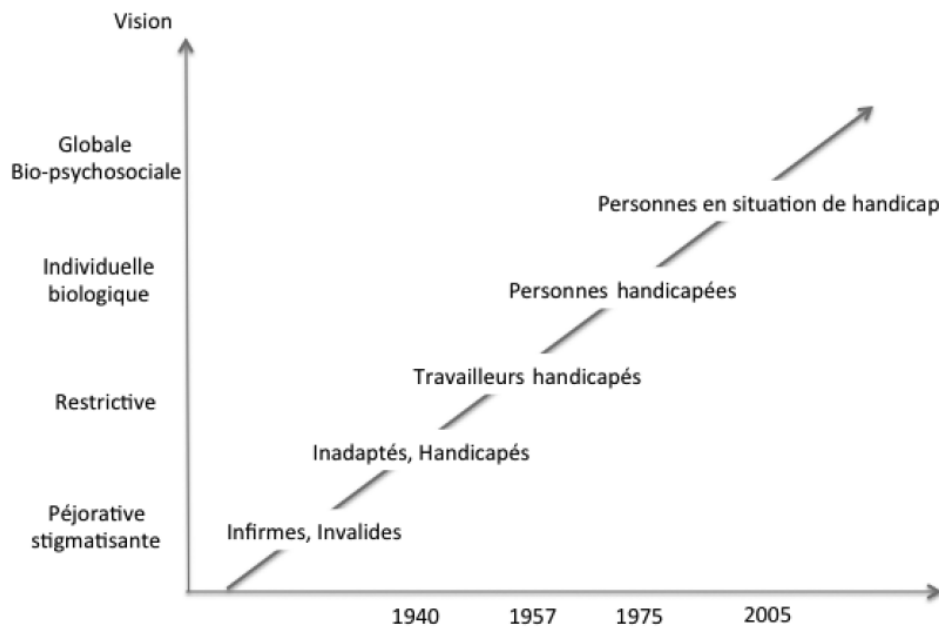


FIGURE 4 – Évolution sémantique du terme « handicap » au cours des dernières décennies en France (tiré de [LESPINET-NAJIB et BELIO, 2013](#))

## 0.4.1 Impact socio-culturel

### 0.4.1.1 Limitations fonctionnelles

Selon le type de déficience visuelle et la partie du champ visuel atteinte, les difficultés rencontrées sont très variables. De manière générale, la déficience visuelle peut avoir un impact sur :

- La perception visuelle générale : identifier une personne, un objet, un environnement, reconnaître les émotions,...
- La communication : écriture, lecture, indices non-verbaux d'une conversation, intelligibilité de la parole dans des ambiances bruitées,...
- L'orientation et le repérage : reconnaissance d'un lieu, d'une entrée, détection d'un obstacle ou d'un danger proche, navigation et déplacements,...

Les répercussions fonctionnelles sont donc multiples et rendent plus difficile la participation aux mêmes activités socio-culturelles et de loisirs que les voyants. Le handicap visuel constitue une barrière importante à l'inclusion sociale, impactant fortement la qualité de vie.

### 0.4.1.2 Culture

Malgré les progrès législatifs, qui se sont traduits par des efforts d'accessibilité dans différents secteurs de la culture, la réalité reste marquée par de réelles difficultés d'accès pour les personnes déficientes visuelles, souvent vécues comme une forme de discrimination :

*« l'expérience cumulative de barrières évitables engendre la frustration, la colère, la résignation et peut finir dans une exclusion culturelle de fait »*  
[WEISEN, 2015](#)

En effet, pour un accès complet aux activités socio-culturelles et de loisir, ce ne sont pas seulement les lieux qu'il faut rendre accessibles mais également les œuvres ou les informations présentées comme les activités proposées. Mettre en conformité les lieux est déjà un vaste chantier toujours en cours quinze ans après la promulgation de la loi, mais la mise en conformité de toute la chaîne d'accessibilité prendra encore plus de temps. Pour prendre l'exemple de l'écrit et de l'audiovisuel, seuls 6 % des livres sont adaptés dès leur sortie, et seuls 20 % des films et 4 % du contenu télévisuels sont audio-décrits. Même constat pour les musées, où malgré des efforts d'accessibilité réels, le contenu et les œuvres ne restent que partiellement adaptés (LEBAT, 2018). La même chose peut être dite pour les concerts, festivals, spectacles, pièces de théâtre, etc.

### 0.4.1.3 Déplacements

L'une des plus grandes difficultés rencontrées par les personnes déficientes visuelles concerne la mobilité et les déplacements qui sont des éléments essentiels au maintien du lien social. D'après une enquête de l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE), 56 % des personnes déficientes visuelles déclarent une incapacité sévère pour leur mobilité et leurs déplacements à l'extérieur (29 % ne se déplacent pas seuls), 50 % ont des difficultés pour accéder aux transports publics et 46 % reçoivent une aide humaine pour faire leurs courses (SANDER et al., 2005).

À côté de la mise en conformité des lieux pour respecter les lois sur l'accessibilité, une autre manière de répondre au problème des déplacements est de s'appuyer sur le développement des technologies d'assistance comme nous le verrons dans le [chapitre 1](#) où j'aborderai la conception de documents interactifs comme support de compréhension de cartes pour faciliter les déplacements.

## 0.4.2 Impact économique

En France (mais cette situation est représentative de la plupart des pays à revenus élevés), environ la moitié de la population déficiente visuelle en âge de travailler est au chômage contre 19 % pour toutes les personnes en situation de handicap et 10 % pour l'ensemble de la population<sup>8</sup>. Malgré les dispositifs d'accompagnement et les nombreux métiers que peuvent exercer les personnes déficientes visuelles lorsque leur poste de travail est aménagé, ce taux d'emploi peine à augmenter. La [figure 5](#) montre que l'emploi d'une personne non voyante est identifié par les entreprises comme étant difficile, bien plus encore que pour la plupart des autres situations de handicap. Cette perception s'explique en partie par un manque de formation, de moyens et d'accompagnement pour l'emploi des personnes déficientes visuelles.

Celles-ci doivent faire reconnaître leur handicap pour bénéficier d'aides financières et de prestations diverses. C'est une étape légale qui définit le niveau d'autonomie de la personne et le montant de la prise en charge. Différentes aides sont ensuite accessibles. L'Allocation Adulte Handicapé (AAH) sert à compenser la perte ou l'absence de revenus (actuellement dans la limite de 800 €). La Prestation de Compensation du Handicap (PCH) est versée par le département et vise à financer des aides mensuelles ou ponctuelles pour compenser la perte d'autonomie liée au handicap.

Pour l'accès à différentes aides, les MDPH (Maisons Départementales des Personnes Handicapées) servent de guichet unique. Les personnes en situation de handicap peuvent

---

8. <https://www.aveugles-pôle-travail.fr/actualites/seeph-2020>



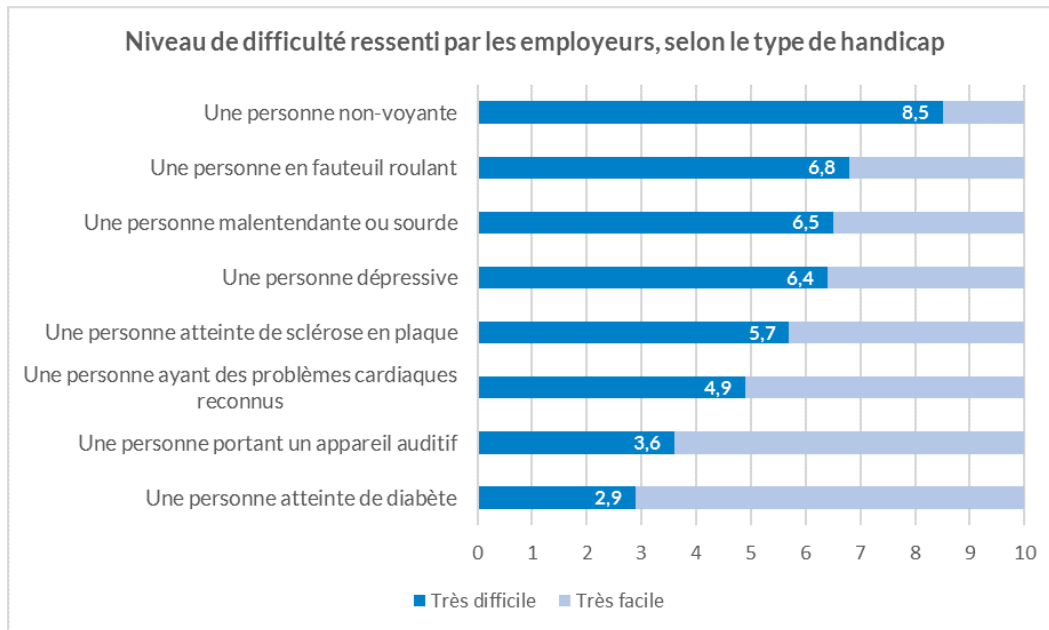


FIGURE 5 – Niveau de difficulté perçu par les employeurs pour embaucher une personne en situation de handicap en fonction du handicap  
(source : AGEFIPH)

notamment y solliciter les SAMSAH (Service d'Accompagnement Médico-Social pour Adultes Handicapés) qui ont pour vocation de fournir un accompagnement médico-social personnalisé comportant des prestations de soin pour contribuer à réaliser le projet de vie de la personne en favorisant le maintien ou la restauration des liens familiaux, sociaux, scolaires, universitaires ou professionnels et l'accès à l'ensemble des services offerts par la collectivité. Par exemple, les aides les plus importantes pour les enfants en âge scolaire sont l'Allocation d'Éducation de l'Enfant Handicapé (AEEH) et l'Allocation Journalière de Présence Parentale (AJPP, versée aux parents ne travaillant pas pour s'occuper de leur enfant).

Aux Etats-Unis, le coût de la prise en charge de la population non-voyante a été estimé en 2013 à 27 Mds de \$ par an (WITTENBORN et al., 2013). Ce chiffre comprend les coûts directs (dépenses de santé et prise en charge par les institutions) ainsi que les coûts indirects résultant des pertes de productivité et de la marginalisation sociale. En France, ces coûts n'ont pas été chiffrés spécifiquement pour les personnes non voyantes mais ils sont proportionnellement au moins aussi élevés. À travers ces compensations financières, c'est la reconnaissance d'une nécessaire solidarité humaine qui s'exprime, quelle que soit la condition de la personne. Dans les pays dans lesquels la prise en charge est moindre, la perte d'autonomie est encore plus marquée, notamment en matière de scolarité et de formation professionnelle avec des conséquences dramatiques sur l'employabilité. Une grande partie des personnes non-voyantes dans les pays les moins avancés économiquement sont encore réduites à la misère et à la mendicité.

### 0.4.3 Impact éducatif

Quand elle survient à un âge précoce, la déficience visuelle peut entraîner un retard moteur, cognitif, social et dans le développement du langage. Une prise en charge précoce adaptée est nécessaire pour limiter ces retards. Historiquement, en France, depuis que les enfants déficients visuels reçoivent une éducation (soit 150 à 200 ans) et jusqu'au début des années 1980, leur prise en charge se faisait exclusivement dans des établissements spécialisés (MAZEREAU, 2006). La loi d'orientation de 1975 en faveur des personnes handicapées a pour conséquence la mise en place d'une politique d'intégration scolaire. Il faut cependant attendre la création des CLasses d'Intégration Scolaire (CLIS) à l'école élémentaire en 1991 et des Unités Pédagogiques d'Intégration (UPI) en 1995 pour que cette intégration ait lieu pour des enfants ayant un handicap incompatible avec une scolarisation dans une classe ordinaire. Une circulaire de novembre 1999 affirme pour la première fois : « *La scolarisation est un droit... Tous les jeunes, quels que soient les besoins éducatifs qu'ils présentent, doivent trouver dans le milieu scolaire ordinaire la possibilité d'apprendre et de grandir avec les autres pour préparer leur avenir d'hommes et de femmes libres et de citoyens* ». Ce nouvel élan va aboutir à l'inscription dans un des articles de la loi de 2005 du droit à la scolarisation pour tous.

Pour aller plus loin et améliorer les conditions d'accès à l'enseignement des élèves en situation de handicap, la loi d'orientation et de programmation pour la refondation de l'école de la République, du 8 juillet 2013, consacre pour la première fois le principe d'inclusion scolaire. Elle comporte des dispositions concernant la formation des enseignants, la coopération entre l'éducation nationale et les établissements et services médico-sociaux et la formation aux outils numériques des élèves accueillis au sein des établissements et services médico-sociaux. Le glissement sémantique entre intégration et inclusion a son importance : ce n'est plus à l'individu en situation de handicap de s'adapter au système mais au système de s'adapter aux besoins particuliers des élèves.

Actuellement en France, le principe général est donc que tous les enfants dont le handicap est compatible avec une scolarité en milieu ordinaire soient scolarisés dans l'établissement de leur secteur. Cette scolarité peut s'effectuer en inclusion dans les classes avec éventuellement l'aide ponctuelle d'un Accompagnant d'Élève en Situation de Handicap (AESH, qui remplace les Auxiliaires de Vie Scolaire (AVS)). L'inclusion dans l'établissement peut aussi se faire via les Unités Localisées pour l'Inclusion Scolaire (ULIS, qui succèdent aux CLIS). Ce sont des classes à petits effectifs pour accueillir les élèves en situation de handicap qui seraient mis en difficulté par une scolarisation dans une classe ordinaire malgré des aménagements et adaptations pédagogiques. Les élèves en inclusion peuvent être suivis par des enseignants spécialisés rattachés à des instituts d'éducation spécialisée. Enfin les enfants dont le handicap ne permet pas une inclusion en milieu ordinaire (le plus souvent en raison d'un handicap associé) sont scolarisés à temps plein dans ces instituts spécialisés. Ce sont environ 10 000 enfants déficients visuels qui sont scolarisés en France (MONTAGNIÉ, 2007).

Les enfants déficients visuels peuvent aussi avoir plusieurs séances de rééducation par semaine avec des orthoptistes, des ergothérapeutes, des instructeurs en locomotion, des formateurs en braille ou en informatique adaptée, des psychomotriciens, etc. Ces prises en charge supplémentaires réduisent le temps disponible pour les apprentissages, qui eux-mêmes sont souvent plus longs à acquérir de par la situation de handicap. Ainsi 30

à 40 % des élèves déficients visuels ont un cycle de scolarité plus long que la moyenne mais leur taux de succès aux examens est malgré tout élevé (MONTAGNIÉ, 2007).

En scolarisation ordinaire, les supports visuels occupent une place très importante : une large part du matériel éducatif est constituée de schémas et de représentations graphiques. Ces supports sont intrinsèquement peu accessibles aux déficients visuels. Ils nécessitent des efforts de concentration importants de la part des enfants malvoyants qui doivent forcer sur leur vision résiduelle pour intégrer ces informations graphiques. Pour les enfants non-voyants, l'effort cognitif est tout aussi important lorsqu'ils doivent comprendre des schémas décrits verbalement sans l'aide de supports tactiles. Les nouvelles technologies de l'information et de la communication peuvent être mises à profit pour améliorer l'accessibilité de ces représentations graphiques.

## 0.5 Intérêt des nouvelles technologies

De nombreuses innovations ont été développées pour rendre accessible du contenu informationnel aux personnes déficientes visuels. Le premier exemple est bien sûr le braille qui allie une innovation théorique à des développements techniques (machines à écrire en Braille, embosseuses, plages électromécaniques,...) pour que les personnes non-voyantes puissent accéder à la lecture et l'écriture. Le braille n'est cependant lu que par une minorité de personnes non-voyantes (autour de 10 %), même dans les pays à revenus élevés, parce que la cécité y touche en moyenne des personnes âgées pour lesquelles l'apprentissage du braille ne peut être envisagé.

Avec l'essor de l'informatique, ces dispositifs ont été complétés par des imprimantes brailles, lecteurs d'écrans, blocs-notes numériques, tablettes brailles, smartphones etc. C'est un défi pour les personnes déficientes visuelles qui doivent adopter de nouvelles pratiques et maîtriser ces nouveaux outils. Mais c'est également une réelle opportunité parce que l'information devient bien plus disponible qu'auparavant. Une grande majorité des personnes non-voyantes pratique d'ailleurs l'informatique (85 %) ; une proportion plus importante que dans l'ensemble de la population.

L'information sous forme numérique, si elle est très disponible, n'en est cependant pas beaucoup plus facile d'accès si l'effort n'est pas fait pour promouvoir son accessibilité (KERROUMI et al., 2021). Si l'on prend l'exemple des sites Web, selon une enquête de WebAIM<sup>9</sup>, seuls 2 % des 1 000 000 de sites les plus visités en 2020 respectent totalement les normes définies par le W3C. Cet organisme qui gère les standards du Web s'est pourtant penché très tôt sur l'accessibilité du Web avec le projet 'Web Accessibility Initiative' (initiative pour l'accessibilité du Web) (WAI) et a publié des recommandations d'accès pour tous dès 1996. La deuxième version de ces recommandations date de 2008<sup>10</sup> avec une mise à jour en 2018.

Les avancées techniques autour de l'informatique ne font pas que faciliter l'accès à l'information écrite ou à Internet : elles permettent également de développer des outils innovants pour se substituer à la vue. Avec l'amélioration rapide des algorithmes d'intelligence artificielle (KRIZHEVSKY et al., 2012 ; HE et al., 2015 ; DEGHANI et al., 2019 ; BROCK et al., 2021), leur implémentation dans des téléphones (LANE et al.,

9. <https://webaim.org/projects/million>, WebAIM est une organisation à but non lucratif, fournisseuse de solutions en matière d'accessibilité du Web.

10. <https://www.w3.org/WAI/standards-guidelines/fr>

2017 ; TAN et LE, 2019) et l’augmentation de la puissance de calcul disponible en mobilité, de plus en plus de tâches visuelles peuvent être accomplies par des systèmes numériques portables.

Les performances des systèmes d’intelligence artificielle pour reconnaître des objets (KRIZHEVSKY et al., 2012 ; REN et al., 2017) ou des scènes (ZHOU et al., 2014 ; S. LIU et al., 2019), lire du texte écrit sur des panneaux (Y. LIU et JIN, 2017 ; YE et al., 2020) ou retranscrire la voix (ZHANG et al., 2020 ; GULATI et al., 2020) aboutissent à de nombreuses applications qui permettent d’améliorer la qualité de vie des personnes déficientes visuelles. Des aides techniques dédiées permettent par exemple de se déplacer en étant guidé par un système qui analyse la scène visuelle en permanence (ORCAM<sup>11</sup> ou Panda Guide<sup>12</sup>). Des applications sur téléphone (Microsoft Seeing AI<sup>13</sup> ou TapTapSee<sup>14</sup>) permettent de reconnaître les objets ou les personnes autour de soi et d’obtenir une brève description d’une scène visuelle. Il faut cependant constater que du fait des coûts des dispositifs, des limitations fonctionnelles ou du manque de suivi dans le temps de ces projets de développement, une proportion relativement faible de personnes déficientes visuelles s’en saisissent, hormis les plus technophiles.

Dans les écoles et les instituts pour personnes non-voyantes, l’informatique est aussi très présente sous la forme des outils évoqués ci-dessus. Un enfant déficient visuel scolarisé en France utilise fréquemment un ordinateur, associé ou non à une synthèse vocale ou une plage braille pour lire les documents fournis par l’enseignant. Si ces outils sont d’une grande aide et de plus en plus performants pour les éléments textuels, ils ne permettent pas de représenter l’information graphique, qui est pourtant très présente dans de nombreuses matières : mathématiques, géographie, sciences... Ainsi, les élèves non-voyants (et les adultes) doivent se limiter à parcourir des représentations en relief traditionnelles pour accéder à du contenu graphique. Une approche hybride dans laquelle les graphiques sont augmentés d’informations numériques permettrait de faciliter la compréhension de ces graphiques.

C’est sur ces problématiques de contenu hybride physique/numérique que nous développons des outils d’assistance au sein du laboratoire commun « Cherchons pour voir », établi entre l’IRIT et l’IJA. Dans le chapitre 1, nous détaillerons les dispositifs tactiles conçus de manière participative, développés et évalués pour rendre interactifs des graphiques en relief (section 1.3). Cette démarche a également été menée pour développer des dispositifs tangibles (section 1.4), toujours dans le but de rendre accessibles des informations cartographiques et des schémas.

Les dispositifs sont évalués selon plusieurs métriques, mais c’est le plus souvent l’utilisabilité qui est mesurée, ainsi que les connaissances spatiales extraites par les utilisateurs quand il s’agit de tâches impliquant des cartes. Une évaluation quantitative et qualitative des points de repères retenus, des itinéraires et des connaissances de type allocentré est alors effectuée. Les verrous principaux pour cette partie concernent l’analyse des besoins et le design des interactions les plus adaptées possibles ainsi que les protocoles d’évaluations des dispositifs. La population non-voyante n’est pas très large et la passation de sujets non-voyants est plus « coûteuse » que celle de sujets voyants. Il faut donc optimiser le nombre de sujets alors même que la variabilité inter-individuelle dans

---

11. <https://www.orcam.com/en/myeye2>

12. <https://www.panda-guide.fr>

13. <https://www.microsoft.com/en-us/ai/seeing-ai>

14. <https://taptapseeapp.com>

les performances des personnes non-voyantes a tendance à être encore plus élevée que pour la population voyante.

Les travaux de ce 1<sup>er</sup> chapitre portent sur des moyens d'assistance aux personnes déficientes visuelles, utilisables à court terme et moyen terme. J'ai maintenu parallèlement un axe de recherche sur la suppléance visuelle, dont l'impact est à plus long terme. Ces recherches, présentées dans le [Chapitre 2](#) anticipent sur le développement des neuroprothèses visuelles en simulant leur fonctionnement en réalité virtuelle (avec des sujets voyants). Je montrerai dans ce 2<sup>ème</sup> chapitre comment les avancées de la vision par machine permettent de rendre utilisables les implants actuels malgré leur résolution limitée. Les verrous principaux dans cette partie concernent la précision perceptuelle de la simulation, la manière optimale de présenter les informations visuelles et l'interaction avec la neuroprothèse.

# Chapitre 1

## Interactions tactiles et tangibles

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Cognition spatiale</b>	<b>18</b>
1.1.1	Représentations mentales	18
1.1.2	Cadre de référence	19
1.1.3	Développement de la cognition spatiale	19
1.1.4	Représentations spatiales d'itinéraires	20
1.1.5	Représentations spatiales chez les personnes non-voyantes	20
<b>1.2</b>	<b>Graphiques tactiles pour personnes déficientes visuelles</b>	<b>22</b>
1.2.1	Perception tactile	22
1.2.2	Exploration tactile de graphiques	23
1.2.3	Supports statiques	23
1.2.4	Supports dynamiques	24
1.2.5	Limitations et solutions	25
<b>1.3</b>	<b>Documents en relief interactifs</b>	<b>26</b>
1.3.1	Dispositifs tactiles interactifs	26
1.3.2	DERi	27
<b>1.4</b>	<b>Interactions tangibles</b>	<b>31</b>
1.4.1	Tangible Box	33
1.4.2	Puzzle interactif	36
1.4.3	Tangible Reels	38
1.4.4	BotMap	40
<b>1.5</b>	<b>Discussion</b>	<b>42</b>

---

Ce chapitre rassemble les travaux menés dans le cadre du projet ANR AccessiMap<sup>1</sup>, de la thèse ministérielle de Julie Ducasse et d'autres projets sur des dispositifs interactifs développés depuis plusieurs années comme le dispositif DERi<sup>2</sup> (Document En Relief interactif). Julie Ducasse a soutenu sa thèse en octobre 2017.

Avant d'aborder le thème principal de ce chapitre qui concerne les interactions tactiles et tangibles pour l'exploration de documents graphiques et notamment de cartes par des personnes déficientes visuelles, je vais rappeler le contexte de ces travaux en revenant brièvement sur les bases de la cognition spatiale, de la perception tactile et sur les méthodes et outils traditionnellement utilisés pour que les personnes non-voyantes accèdent aux représentations graphiques.

## 1.1 Cognition spatiale

La cognition spatiale désigne les facultés mentales (perception, mémorisation, apprentissage, abstraction, raisonnement, calcul, langage,...) impliquées dans la capacité à intégrer des informations de natures diverses pour se représenter un espace et le manipuler mentalement (M. DENIS, 2012). La cognition spatiale joue un rôle central dans l'orientation et la navigation ainsi que dans l'utilisation de représentations symboliques comme des cartes (B. LANDAU, 2002) ou des descriptions d'itinéraires (M. DENIS, 1997).

### 1.1.1 Représentations mentales

Sans remonter aux philosophes présocratiques, les premières théories psychologiques des représentations mentales émergent à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle dans les publications du philosophe Charles Peirce. Ce n'est cependant qu'à la fin des années 1940 avec les travaux du psychologue comportementaliste Edward Tolman (TOLMAN, 1948) que la notion de représentation spatiale proprement dite apparaît avec les cartes cognitives imaginées par Tolman et ses étudiants pour rendre compte des aptitudes de rats placés dans un labyrinthe (voir JOHNSON-LAIRD, 2004 pour une revue).

La capacité à former des cartes mentales se retrouve chez tous les vertébrés et certains invertébrés comme les arthropodes (PFEFFER et WOLF, 2020) ou certains mollusques (ALVES et al., 2007). Les performances des humains dans le domaine spatial sont particulièrement développées. Nos cartes mentales encodent une représentation interne du monde qui nous permet par exemple de savoir quelle est notre position parmi des repères environnants et quelle(s) direction(s) nous devons emprunter pour atteindre notre but. Ces connaissances spatiales permettent d'effectuer des inférences, par exemple pour relier deux points par un chemin que l'on n'a jamais emprunté ou pour se repérer

---

1. <https://www.irit.fr/accessimap>

2. <https://cherchonspourvoir.org/deri-la-surface-interactive>

dans un espace qui a été modifié depuis notre dernière visite. Les cartes mentales supportent également les constructions langagières (p. ex., les descriptions d'itinéraires) et productions graphiques (p. ex., les cartes) qui nous permettent de communiquer des informations spatiales (M. DENIS, 1996 ; GOLLEDGE, 2004).

### 1.1.2 Cadre de référence

Quand on cherche à définir la position d'objets dans l'espace, par exemple pour l'exécution de mouvements, il faut définir un cadre de référence (BERTHOZ, 1991). C'est le « système de coordonnées » qui va être utilisé pour déterminer l'emplacement des éléments. Pour les représentations spatiales, le cadre de référence peut être défini par rapport à son propre corps (cadre égocentré), par rapport à un autre objet (cadre exocentré) ou par rapport à un repère euclidien externe (cadre allocentré ou géocentré) (KOSSLYN et al., 1974 ; R. L. KLATZKY, 1998).

Parce que les informations sensorielles sont par essence égocentrées, les premières représentations spatiales construites lorsque l'on explore un lieu du regard ou en s'y déplaçant sont elles aussi égocentrées. C'est l'exploration répétée du lieu qui va permettre de s'abstraire de la représentation égocentrée pour en construire une représentation allocentrée (KELLY et MCNAMARA, 2010). Un raccourci dans la construction de cette représentation allocentrée est souvent opéré en consultant une carte du lieu puisqu'elle figure le lieu directement selon un point de vue extérieur et cartésien, sans avoir à faire la transformation soi-même. Pour la plupart des tâches de navigation, la représentation allocentrée est supérieure à la représentation égocentrée puisqu'elle permet d'effectuer plus d'inférences et qu'elle est plus robuste en cas d'erreurs. Certaines tâches sont cependant réalisées plus vite sur la base des informations égocentriques seules et d'autres nécessitent probablement une approche mélangeant les deux niveaux pour être réalisées (MEILINGER et VOSGERAU, 2010). Lors de l'exploration d'un lieu connu, les deux représentations cohabitent puisque la carte allocentrée est alimentée par des informations égocentrées. De la même manière, quand on prépare un itinéraire depuis une carte, on effectue une projection depuis la représentation allocentrée vers une représentation égocentrée qui est celle à laquelle on va être confronté lors du déplacement.

### 1.1.3 Développement de la cognition spatiale

Le développement des capacités cognitives chez l'enfant a été très étudié par Jean Piaget, y compris les aspects liés à l'acquisition de la cognition spatiale. Piaget montre dans des tâches spatiales à différents âges que les premières représentations construites par les enfants dès deux ans sont égocentrées. Parallèlement au développement de la théorie de l'esprit, l'enfant deviendrait progressivement capable de se représenter le monde selon un point de vue extérieur, ce qui aboutirait à la capacité de former des représentations allocentrées à partir de l'âge de 5-7 ans, mais qui ne seraient totalement élaborées que vers 10-12 ans (PIAGET, 1977).

La précision de ces âges de transition a été longuement débattue avec des travaux qui montrent des capacités allocentrées précoces dans certaines tâches. Les grandes lignes de cette progression depuis les représentations égocentrées vers les représentations allocentrées sont également contestées par certains auteurs qui avancent un développement par phases se chevauchant largement (SIEGLER, 2000). Les importantes disparités in-



dividuelles dans les capacités spatiales et la flexibilité du cerveau pour utiliser les informations les plus pertinentes en fonction de la tâche à accomplir rendent complexe la détermination de la séquence d’acquisition de ces différentes capacités et les replacent sur un canevas plus fluide (VAN GEERT, 1998).

### 1.1.4 Représentations spatiales d’itinéraires

À la suite de Siegel et White (SIEGEL et WHITE, 1975), on distingue en général trois niveaux lors de l’acquisition d’informations spatiales en vue de retenir un itinéraire : les **points de repère**, les **routes** et les **connaissances de type cartographiques**. Les points de repère peuvent être incarnés par n’importe quel élément saillant dans l’environnement. Ils permettent de ponctuer l’espace et structurent la carte mentale. Les routes sont un niveau plus intégré et correspondent aux segments reliant différents points de repère entre eux. Les connaissances de type cartographiques sont le niveau le plus intégré et correspondent à une représentation allocentrée des éléments, comme vus du ciel (Figure 6). On remarque ici un parallèle avec les étapes d’acquisition des capacités spatiales au cours du développement et la même progression égo- / extéro- / allo- centrée que lors de la découverte d’un lieu. Ici encore, le modèle dominant avec une acquisition par étapes bien identifiées est contesté au profit d’un passage progressif d’une représentation égocentrée à une représentation allocentrée dépendant de la quantité d’information accumulée et de l’expertise concernant un lieu (MONTELLO, 1998).

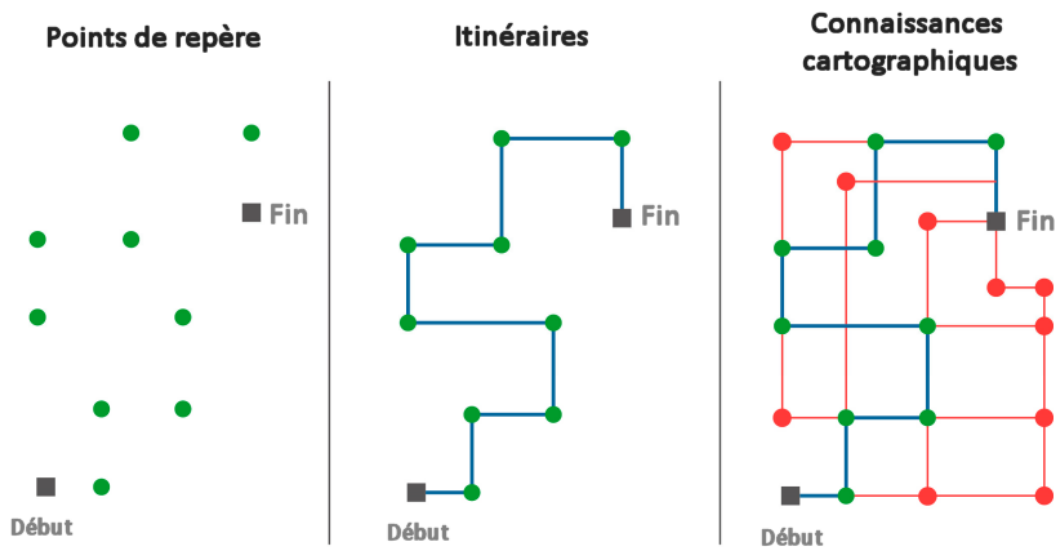


FIGURE 6 – Illustration des 3 niveaux de connaissances spatiales dans le modèle de Siegel et White : les points de repère, les routes (itinéraires) et les connaissances cartographiques (d’après QUESNOT et ROCHE, 2014)

### 1.1.5 Représentations spatiales chez les personnes non-voyantes

La vue est le sens le plus important pour l’orientation et la navigation. Parce que la rétine est un capteur bidimensionnel avec une fréquence d’échantillonnage élevée, la vision permet de capturer en très peu de temps une grande quantité d’informations. Pratiquement la moitié de notre cortex est dévolu au traitement de ces informations visuelles pour les transformer en une représentation mentale cohérente et fiable du

monde extérieur. Lors de déplacements ultérieurs dans un lieu, la vision est utilisée pour mettre à jour, affiner et consolider cette représentation mentale ([THINUS-BLANC et GAUNET, 1997](#)).

Les informations allocentrées présentes sur une carte peuvent aussi être intégrées en un bref instant grâce à quelques balayages du regard. C'est un avantage considérable de la vision sur les autres sens, contraints par un débit d'information / nombre de dimensions moindre (audition) ou la nécessité d'une intégration temporelle pour conférer du sens (toucher).

Cette supériorité de la vision sur les autres sens pour des tâches d'orientation et de navigation est tellement grande qu'il y a eu en psychologie cognitive un courant de pensée jusque dans les années 1960-70 soutenant que les personnes non-voyantes de naissance, n'ayant pas disposé des entrées visuelles nécessaires pour fournir un cadre conceptuel dans lequel ancrer leurs représentations internes de l'espace, **ne pouvaient pas** en former sur la base des entrées haptiques ou auditives ([VON SENDEN, 1962](#); [HARTLAGE, 1969](#)). Les résultats expérimentaux ont par la suite indiscutablement montré que les personnes non-voyantes peuvent construire des représentations spatiales sur la base d'informations haptiques ([OTTINK et al., 2021](#)) ou sonores ([PICINALI et al., 2014](#)) seules. Les performances moindres des non-voyants de naissance dans les tâches de navigation spatiale proviendraient soit d'une **moindre efficacité** dans la construction des représentations spatiales en l'absence de vision ([RIESER et al., 1986](#)), soit d'une **différence de nature** de ces représentations ([JUURMAA, 1973](#)).

Quoi qu'il en soit, l'absence de vision pendant le développement a de nombreuses répercussions sur le développement des capacités spatiales. Des études de navigation et retour au point de départ ont montré de plus grandes différences entre non-voyants de naissance et non-voyants tardifs qu'entre voyants (les yeux bandés) et non-voyants tardifs ([RIESER et al., 1982](#)). Les non-voyants de naissance affichent également des performances très en retrait pour pointer du doigt des objets lors de leur déplacement dans un environnement connu ([DODDS et al., 1982](#)). L'hypothèse la plus acceptée est que l'absence de cadre de référence visuel pour calibrer les perceptions haptiques et auditives induirait cette différence de performance ([MILLAR, 1994](#)).

Cependant le déficit visuel lors du développement ne serait pas préjudiciable à toutes les aptitudes spatiales et certains auteurs ont mis en évidence des tâches dans lesquelles les personnes non-voyantes de naissance montrent des performances similaires ou supérieures à celles de voyants, par exemple pour naviguer dans un labyrinthe ([PASSINI et al., 1990](#)) ou replacer un objet à son emplacement initial après l'avoir transporté sur une courte distance ([HOLLINS et KELLEY, 1988](#)).

Dans une utilisation primaire, la proprioception et le sens du toucher sont essentiellement égocentrés. Mais le toucher permet d'accéder à une information de plus haut niveau, par exemple lors de l'exploration de cartes en relief, qui figurent donc des informations de nature allocentrée. Sur la base de ces informations, les personnes non-voyantes de naissance sont capables d'intégrer une représentation allocentrée de l'espace et de l'utiliser lors d'une tâche de navigation ([UNGAR et al., 1995](#)). Les personnes non-voyantes de naissance sont également capables de produire des plans d'un environnement connu ([CASEY, 1978](#)), même si les plans reconstruits sont moins précis que ceux des non-voyants tardifs et des voyants.

Pour conclure, bien que les non-voyants n'aient pas les mêmes capacités de représentation spatiale que les voyants, ils peuvent accomplir diverses tâches spatiales, sur la base d'informations tactiles, sonores ou proprioceptives, parfois avec des performances similaires à celle des voyants. Les tests expérimentaux montrent cependant des différences qui peuvent s'expliquer par la limitation fonctionnelle liée à l'absence de vision, mais également par d'autres paramètres, comme le manque d'expérience de navigation, la disparité d'accès à des cartes et aux représentations allocentrées, ainsi que par une utilisation différenciée des autres modalités sensorielles.

## 1.2 Graphiques tactiles pour personnes déficientes visuelles

### 1.2.1 Perception tactile

Pour fournir des informations spatiales à une personne non-voyante, les deux moyens les plus évidents sont l'audition et le toucher. Je ne me suis pas intéressé directement à la description verbale d'itinéraires à destination des personnes déficientes visuelles, mais nous avons collaboré avec Michel Denis et Malika Auvray, spécialistes de ces questions, dans le projet ANR NAVIG<sup>3</sup>. L'idée était de concevoir et réaliser un module de calcul d'itinéraire capable de générer automatiquement des descriptions verbales de trajets adaptés à des personnes non-voyantes en tenant compte des éléments pertinents pour leur navigation. Ces travaux, menés avec Slim Kammoun, alors étudiant en thèse dans l'équipe avaient abouti à la réalisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) adapté dans lequel des pondérations favorisant les points de repère non-visuels et évitant les espaces ouverts permettaient de calculer un chemin optimal pour la navigation piéton d'une personne non-voyante (KAMMOUN, MACÉ et al., 2012).

L'autre canal principal pour transmettre des informations spatiales à des personnes non-voyantes est la modalité tactile. Le toucher est un sens complexe, composé de multiples récepteurs (mécanorécepteurs à adaptation lente ou rapide, thermorécepteurs) répartis entre plusieurs types cellulaires. C'est aussi un sens qui a la particularité de fonctionner de manière à la fois passive et active. Lors de l'exploration active d'un objet, c'est la production de mouvements qui permet l'exploration tactile qui résulte donc d'une intégration spatio-temporelle avec un couplage fin entre la kinesthésie des muscles et articulations et les récepteurs tactiles de la peau pour reconstruire mentalement la forme parcourue. Cette intégration volontaire sur des champs récepteurs tactiles de taille réduite explique que la perception tactile soit à la fois lente, limitée spatialement et consommatrice de ressources attentionnelles.

Le toucher possède cependant une grande sensibilité. Il est possible de détecter des différences de hauteur de l'ordre du micron pour un point isolé sur une surface plane (LAMOTTE et WHITEHOUSE, 1986) et de 2 à 3 microns pour des différences de texture (MIYAOKA et al., 1999). La résolution spatiale (le pouvoir de séparation) au bout des doigts est d'environ 0,2 mm (R. KLATZKY et al., 2014), ce qui est relativement élevé, étant donné la taille des doigts, mais reste environ 8 fois inférieure à la résolution visuelle normale pour un support placé au plus près des yeux, vers 20 cm. On considère que des lignes parallèles en relief doivent être distantes d'environ 3 à 4 mm (sur du papier en relief) pour être facilement perçues comme séparées (BRIS, 2004). Ce sont

---

3. <http://navig.irit.fr>

ces limitations importantes et la faible vitesse d’exploration tactile qui imposent une simplification drastique des dessins et des schémas pour leur conversion en des images tactiles.

### 1.2.2 Exploration tactile de graphiques

Lors de l’exploration d’un graphique tactile, les premiers mouvements ont tendance à être amples et rapides pour évaluer la taille et le contenu général. Les mouvements sont ensuite de plus en plus précis pour finalement se concentrer sur les détails. En règle générale, les personnes non-voyantes utilisent leurs deux mains pour explorer des graphiques. Les deux mains peuvent être déplacées simultanément, pour détecter des symétries dans les dessins par exemple. Elles peuvent aussi avoir des rôles différents, par exemple une main servant de référence et l’autre effectuant des allers-retours pour apprécier des distances relatives. L’exploration est également multi-doigt, ce qui facilite la discrimination de textures et le suivi de lignes (MORASH et al., 2014). Ces observations doivent être prises en compte dans la conception des dispositifs audio-tactiles interactifs pour assurer une expérience d’exploration tactile la plus naturelle possible. En l’occurrence, les recommandations sont donc de permettre une exploration bi-manuelle et multi-doigts des documents interactifs (O’MODHRAN et al., 2015).

L’expertise des personnes non-voyantes est très variable concernant l’exploration de graphiques et cartes en relief. En fonction de leur parcours de scolarisation scolaire, de l’âge de l’apparition de la cécité et de leur vision résiduelle, la familiarité avec l’exploration de documents en relief peut être très diverse. Néanmoins, ce type de support est maintenant généralisé dans les établissements spécialisés qui accompagnent des personnes déficientes visuelles dans leur scolarisation ou leur parcours professionnel et reste un des moyens les plus efficaces pour transmettre des informations spatiales à des personnes non-voyantes.

Dans nos sociétés où l’aspect visuel est prépondérant, et encore plus dans l’enseignement, les représentations graphiques constituent un support de choix pour toutes sortes d’activités : présenter des données, des idées, représenter un lieu, des relations entre des éléments, etc. Elles sont très utilisées pour mettre en place toute une palette d’apprentissages, ce qui rend très important leur appropriation par les enfants déficients visuels. Il existe plusieurs solutions traditionnelles pour rendre accessibles aux non-voyants les représentations graphiques en les rendant tactiles. On peut distinguer deux grands types de représentations tactiles selon que les supports utilisés sont statiques ou reconfigurables (dynamiques).

### 1.2.3 Supports statiques

Les supports statiques pour des représentations graphiques adaptées aux déficients visuels sont le plus souvent constitués de papier thermogonflable. C’est un papier spécial contenant des micro-capsules d’une résine qui se dilate de manière irréversible à la chaleur. Après avoir adapté et simplifié le graphique (tâche complexe opérée le plus souvent par des adaptatrices de documents), celui-ci est imprimé sur le papier thermogonflable au moyen d’une imprimante classique. Lors du passage du papier dans un four à lampes (Figure 7A), les zones imprimées en noir chauffent plus que les zones blanches : elles gonflent sous l’effet de la chaleur et font apparaître un relief persistant à la surface du papier (Figure 7B). D’autres supports statiques moins faciles à mettre

en œuvre sont également utilisés, comme le plastique thermoformé sur une matrice en relief (Figure 7C), l'impression de vernis transparent ou l'impression 3D. Une autre méthode largement utilisée, mais qui ne permet de produire que des dessins à l'unité requiert un tapis en silicone (de type Dycem) sur lequel une feuille en plastique souple est posée. En utilisant une pointe de stylo bille, il est possible d'imprimer un relief persistant dans la feuille en plastique.



FIGURE 7 – Documents en relief statiques. A) Four à lampe pour papier thermogonflable. B) Relief apparent sur du papier thermogonflé. C) Carte du monde en plastique thermoformé

### 1.2.4 Supports dynamiques

Les supports reconfigurables permettent d'obtenir des graphiques modifiables. Dans les centres d'éducation spécialisés, ce sont principalement des tableaux aimantés qui sont utilisés pour représenter des lieux ou des itinéraires (Figure 8A). Les points de repère et les trajets peuvent être figurés par des éléments magnétiques collés et déplacés à la main sur le tableau. La personne non-voyante peut ensuite explorer manuellement cette représentation. Le même principe est utilisé avec des tableaux de liège sur lesquels des punaises, éventuellement reliées par des fils, peuvent représenter les points et les lignes d'un graphique ou d'un plan. Des tapis en Velcro sont également utilisés pour le même usage (Figure 8B).

Il existe également des supports de graphiques en relief dynamiques composés d'une matrice de points qui peuvent monter et descendre sur commande. Le plus connu de ces produits est l'Hyperbraille<sup>4</sup>, qui peut comporter jusqu'à 7200 points adressables individuellement, mais le prix de ces appareils est rédhibitoire (50+ k€), et ils ne se trouvent que dans très peu d'établissements (Figure 8C).

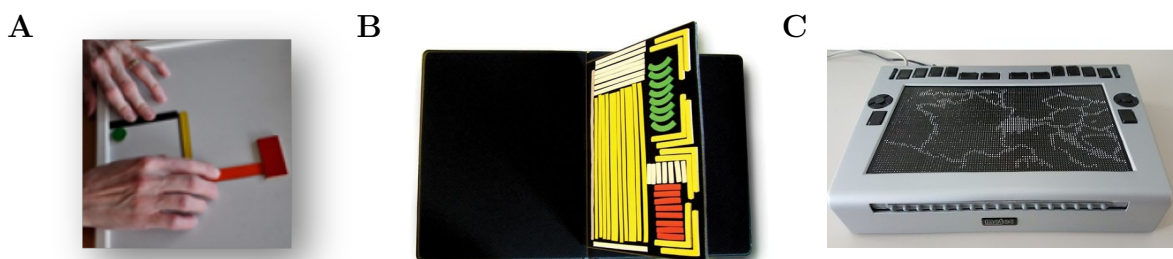


FIGURE 8 – Documents en relief dynamiques. A) Tableau magnétique et aimants figurant un trajet. B) Jeu d'éléments en Velcro pour construire un itinéraire. C) Dispositif HyperBraille avec 104×60 points d'affichage tactile

4. <http://www.hyperbraille.de>

### 1.2.5 Limitations et solutions

Qu'ils soient statiques ou dynamiques (en excluant l'Hyperbraille, qu'il n'est pas possible de déployer pour des questions de coût), ces supports tactiles souffrent de deux défauts majeurs :

- Le premier est qu'ils ne peuvent présenter qu'un nombre d'informations limité. La résolution tactile est très inférieure à la résolution visuelle et la complexité d'un document d'origine visuelle doit le plus souvent être réduite pour l'adapter en un document tactile intelligible. De plus, si un document tactile comprend des éléments en braille, ceux-ci vont interférer avec les éléments en relief et réduire encore l'espace disponible. Le braille prend beaucoup de place et la légende d'un document tactile est le plus souvent reportée sur un document annexe qui peut rapidement faire plusieurs pages (Figure 9). Cette séparation physique entre le document principal et la légende force l'utilisateur à explorer alternativement le document et sa légende de manière répétée, ce qui crée des interruptions dans l'exploration et rend difficile la bonne compréhension du document. Pour une carte de géographie, qui peut être complexe à appréhender dans son ensemble, cette exploration hachée temporellement rend difficile la construction d'une représentation mentale fidèle et unifiée. De plus le braille est loin d'être universel : en France, il n'est lu que par environ 10 % des personnes très malvoyantes et non-voyantes. La proportion de brailistes est bien plus élevée pour les personnes non-voyantes ayant suivi un cursus dans un établissement spécialisé, mais elle n'est pas non plus de 100 %, notamment en raison de troubles associés empêchant son apprentissage.

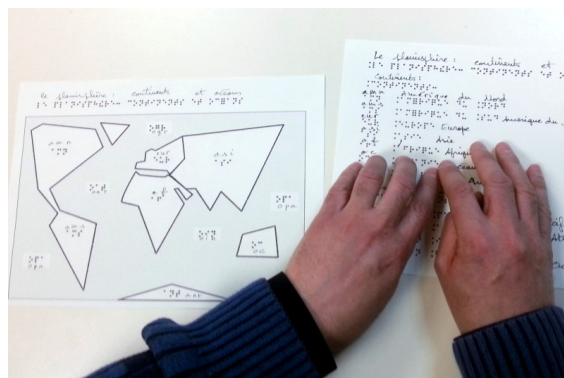


FIGURE 9 – Carte du monde en papier thermogonflé, accompagnée de sa légende sur une feuille séparée. La personne non-voyante doit identifier les clés de légende sur la carte et les retrouver dans la page de légende pour en obtenir la signification

- Le second défaut majeur des documents tactiles classiques est qu'ils ne peuvent pas être modifiés facilement. La création de ces supports prend du temps et il n'est pas possible de les mettre à jour ou de les corriger facilement. Pour les supports reconfigurables, l'absence de retour d'information fait qu'il n'est pas possible pour une personne déficiente visuelle de les utiliser seule et qu'ils doivent recourir à une tierce personne pour vérifier que les éléments sont placés correctement. L'absence d'interactivité limite aussi les tâches qu'il est possible de réaliser avec le support, comme la sélection des informations à afficher ou l'annotation de ces éléments.

C'est pour pallier les limitations des supports traditionnels (statiques ou dynamiques) que nous avons développé dans l'équipe ELIPSE et au sein du laboratoire « Cherchons pour voir » des dispositifs audio-tactiles interactifs pour « augmenter » le support tactile d'informations numériques. Lors du développement de ces dispositifs, nous veillons à mettre systématiquement en place une démarche centrée utilisateur en impliquant dès le début des phases de conception les utilisateurs finaux des dispositifs, qui peuvent être soit les personnes déficientes visuelles elles-mêmes, soit les professionnels qui les encadrent.

Comme l'IJA accueille en majorité des enfants, il est important que les prototypes que l'on développe soient faciles et rapides à prendre en main et présentent un aspect ludique pour une expérience utilisateur optimale. Nous collaborons régulièrement avec des collègues en ergonomie / ergonomie cognitive pour améliorer l'utilisabilité des dispositifs que nous développons et les rendre plus attrayants pour les enfants.

## 1.3 Documents en relief interactifs

Ajouter de l'interactivité à un document en relief présente plusieurs avantages. Cela permet de remplacer la plupart des éléments en braille dans le document, pour gagner de la place et pour rendre son exploration plus fluide puisqu'il n'y a plus d'allers-retours à faire entre le document et sa légende. Des fonctions plus élaborées peuvent aussi être implémentées dans un système interactif, comme la sauvegarde de l'état d'un document, son annotation par l'utilisateur, le guidage vocal pour trouver des éléments ou encore des interactions avec les données présentées.

### 1.3.1 Dispositifs tactiles interactifs

Une grande diversité de systèmes interactifs à destination des personnes déficientes visuelles ont été développés ces 30 dernières années. Nous ne présenterons ici que les dispositifs hybrides, ayant une composante à la fois physique et numérique, par opposition aux dispositifs purement physiques (sans interactivité) et aux dispositifs uniquement numériques (interactivité auditive, vibratoire ou à retour de force, sans carte physique). **Cette classification est élaborée dans la thèse de Julie Ducasse (DUCASSE, 2017).** Pour les dispositifs hybrides, une sous-catégorisation distingue les dispositifs tactiles, tangibles et à affichage dynamique. Nous aborderons les deux premiers dans ce chapitre.



FIGURE 10 – 'Tactile Talking Computer' (2000) : Système commercialisé à destination des personnes non-voyantes avec une couverture en relief sur une surface tactile permettant de déclencher des balises sonores par pression tactile

Le premier système interactif pour l'exploration des plans et des schémas en relief décrit dans la littérature est le système NOMAD (PARKES, 1988), composé d'un écran tactile recouvert d'un graphique thermogonflé, l'interactivité étant assurée par une synthèse vocale en fonction des appuis de l'utilisateur. Au début des années 2000, l'entreprise 'Touch Graphics' a commercialisé un système audio-tactile apparenté, le 'Talking Tactile Computer' (S. LANDAU et GOURGEY, 2001, figure 10) pour explorer des cartes et des graphiques en relief. Un système similaire utilisant une embosseuse braille pour le support en relief et une tablette tactile pour l'interactivité a été développé en 2006 (MIELE et al., 2006). Les écrans

multitouch sont restés rares jusqu'au tournant des années 2010 et les systèmes antérieurs ne pouvaient détecter qu'un seul appui, avec une résolution rendant parfois délicate l'utilisation du dispositif. C'est à partir de la période où les écrans tactiles

multipoints sont devenus plus courants que nous avons développé dans l'équipe un système hybride pour rendre interactifs des cartes et des graphiques thermogonflés en les fixant à la surface d'un écran ou d'une tablette tactile (BROCK et al., 2012). Ce système s'est appelé DERi et nous détaillerons son fonctionnement dans la section suivante.

En parallèle, une autre méthode de suivi des interactions tactiles, sans utiliser de tablette est rendue possible par l'amélioration des algorithmes de vision par machine. Timo Götzelmann développe un système dans lequel un graphique imprimé en 3D est reconnu par la caméra d'un téléphone tenu par l'utilisateur. En pointant avec l'autre main sur des parties de ce graphique, l'utilisateur peut déclencher des balises sonores (GÖTZELMANN, 2014). Le 'Tactile Graphics Helper' (FUSCO et MORASH, 2015) utilise lui aussi une caméra pour détecter la position des mains sur un graphique et donner un retour sonore sur l'élément pointé du doigt par l'utilisateur. Sans support pour fixer la caméra, ces systèmes manquent cependant de fiabilité dans la détection des pointages de l'utilisateur. La précision est améliorée quand la caméra est fixée sur un support, mais le problème des occlusions pèse toujours sur la fiabilité de la détection. Il est aussi très délicat avec une caméra située au-dessus de la main (même avec une caméra 3D RGB+D) de savoir si les doigts sont en contact avec le support ou bien s'ils sont juste au-dessus, ce qui peut causer des fausses détection d'appuis et déclencher des sonifications intempestives.

En 2016, Götzelmann adapte son système de graphiques imprimés en 3D pour le rendre compatible avec la détection tactile sur tablette multitouch (LucentMaps, GÖTZELMANN, 2016). Un système similaire est publié la même année (TAYLOR et al., 2016) en association avec un site internet (désormais disparu) qui permet de générer les fichiers d'impression de cartes. L'adaptation automatique de contenu est cependant à double tranchant parce qu'il est très difficile de concevoir un algorithme de simplification de cartes qui peut s'accommoder de toutes les situations. La personne non-voyante peut certes utiliser seule son système, mais uniquement si la simplification automatique de document n'est pas mise en défaut et rend tactilement intelligible les informations présentées.

#### 1.3.2 DERi

Dans le projet NAVIG (KAMMOUN, PARSEIHIAN et al., 2012), nous utilisons un positionnement GPS amélioré en détectant des amers visuels pour guider un piéton non-voyant sur un trajet au moyen de sons spatialisés. Cette tâche de navigation dans un environnement inconnu reste difficile, et pour optimiser la navigation, nous avons développé au cours du projet un module de calcul d'itinéraires adaptés tenant compte des préférences de navigation des personnes non-voyantes (KAMMOUN, MACÉ et al., 2012). Pour améliorer encore ce guidage et permettre aux utilisateurs du système de comprendre leurs déplacements dans l'espace, nous voulions que les utilisateurs puissent préparer les itinéraires calculés avant de les emprunter.

L'idée était de sonifier de manière interactive une carte en relief en fonction des déplacements des doigts sur le support. Ce projet s'est appelé DERi (Document En Relief interactif), et il a principalement été développé à l'origine (à partir de 2011) par Anke Brock pendant sa thèse (BROCK et al., 2012; BROCK, 2013) puis par Grégoire Denis. Bien que n'étant pas impliqué en premier lieu dans l'encadrement de la thèse d'Anke, j'ai participé aux réflexions amenant à la genèse de DERi, à son développement et à son évaluation en encadrant des stagiaires mobilisés dans les centres spécialisés



(cf tableaux [CV1 M2](#) et [CV2 M1](#) : Nina Docteur, Pauline Maurette, Célia Pieruccioni, Thomas Bonnier, Julien Rivière et Mathilde Cazes). Ce projet est à l'origine d'une grande partie des dispositifs que nous avons conçus par la suite pour favoriser l'accessibilité des graphiques et des cartes. L'idée que nous explorons avec DERi est qu'une présentation concomitante des informations tactiles et sémantiques (sous forme auditive) facilite grandement la compréhension des documents graphiques par les personnes non-voyantes.

### 1.3.2.1 Projet ANR AccessiMap

Le projet DERi a été rapidement soutenu par un financement ANR (AccessiMap<sup>5</sup> 2014-2018) et la collaboration de plusieurs acteurs partenaires, dont l'entreprise Makina Corpus<sup>6</sup>, a permis de développer un éditeur en ligne de DERi ainsi qu'un lecteur sur tablettes Android / Surface et sur Windows. Le développement et le suivi des versions actuelles de l'éditeur et du lecteur (codées en Java) sont effectués par Mathieu Raynal et Anthony Bordeau (respectivement MCF et ingénieur dans l'équipe ELIPSE).

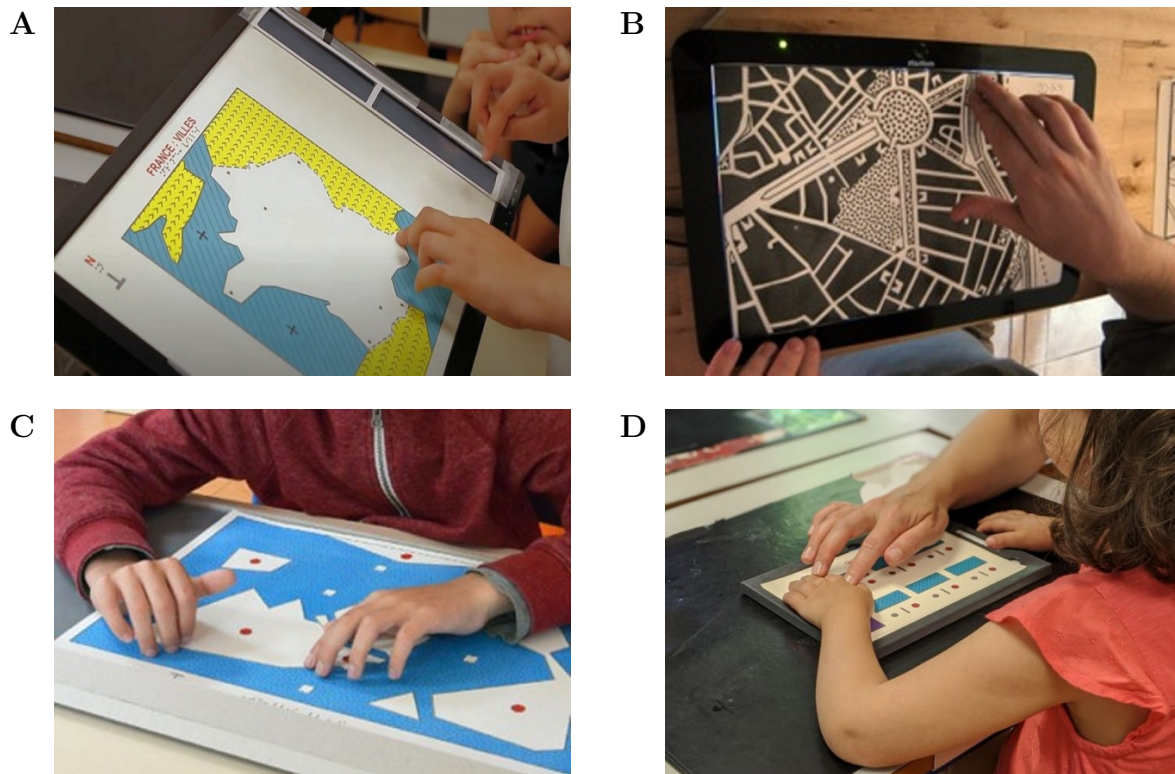


FIGURE 11 – Photographies de DERi. A) Carte de France en relief posée sur un écran tactile. L'enfant non-voyant obtient des informations auditives en appuyant sur les villes. B) Version tablette de DERi; exploration interactive d'un quartier de Toulouse. C) Carte du monde pour l'apprentissage des continents et des océans. D) DERi permet aussi de rendre accessibles des graphiques et des schémas; ici un questionnaire sur les gestes barrières

Une des particularités de ce projet est d'être élaboré en étroite association avec les utilisateurs finaux. Dans la démarche de conception participative adoptée, les utilisateurs non-voyants, ainsi que les professionnels des instituts partenaires, sont partis prenante

5. <https://www.accessimap.com>

6. <https://makina-corporus.com>

à chaque étape de la conception et du développement via une analyse des besoins et un processus d'idéation ayant recours à des 'remue-méninges' et des 'focus groups'.

Le dispositif DERi est constitué d'un écran tactile sur lequel un document en relief est placé (Figure 11), en général en papier thermogonflé, mais une plaque fine imprimée en 3D est également utilisable. Lors de l'exploration tactile de ce document, des zones d'interaction préalablement définies dans un éditeur d'interaction sont associées à des informations sonores qu'il est possible de déclencher en effectuant par exemple un double appui avec le doigt. Ainsi les allers-retours entre le document et sa légende sont supprimés et laissent place à une expérience d'exploration continue.

Deux études publiées par l'équipe ont évalué l'utilisabilité du dispositif DERi. Dans la première étude (BROCK et al., 2012), le score moyen de satisfaction sur l'échelle (SUS) était de 87 / 100. Un score au-delà de 85 est considéré comme excellent (BANGOR et al., 2008) et à une exception près, les scores individuels sur 12 utilisateurs non-voyants étaient tous supérieurs à 75 / 100, ce qui est au-delà de la limite indiquant une « bonne » utilisabilité. Dans une autre étude sur 24 utilisateurs non-voyants (BROCK et al., 2015), le score SUS était également très élevé avec une valeur moyenne de 84 / 100.

Les utilisateurs exprimaient une préférence très nette pour la carte interactive par rapport à la carte non-interactive avec 17 sujets préférant DERi, 6 préférant la carte papier et un sujet sans préférence particulière. Dans cette étude, l'utilisabilité des cartes en relief interactives était supérieure à celle des cartes en relief classiques, en particulier pour l'efficacité (mesurée comme le temps nécessaire pour apprendre les cartes, figure 12) et la satisfaction. La précision des apprentissages pour ce qui est de la rétention des informations de type points de repère, itinéraires et données cartographiques était similaire entre les deux types de cartes, mais les utilisateurs de la carte interactive étaient plus confiants dans leurs réponses bien que leur temps d'apprentissage fût plus court.

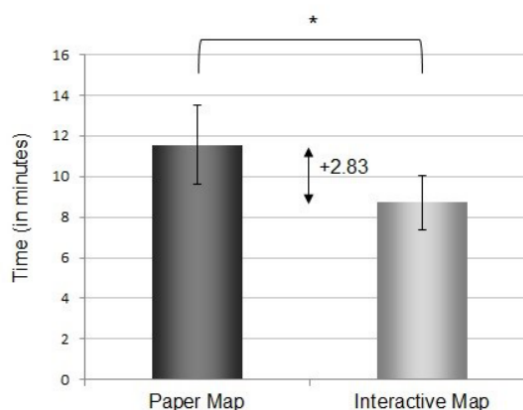


FIGURE 12 – Le diagramme montre que le temps d'apprentissage d'une carte est significativement inférieur pour une carte interactive DERi par rapport à une carte papier ; l'efficacité est donc supérieure. Les barres d'erreurs représentent l'IC95. (Tiré de BROCK et al., 2015)

### 1.3.2.2 Diffusion dans les établissements

Ces outils sont déployés dans plusieurs instituts partenaires, au premier rang desquels l'IJA et le CIVIL-Lestrade à Ramonville près de Toulouse. Ces deux établissements sont relativement comparables au regard du public déficient visuel accueilli. Le dispositif DERi est utilisé pour les cours de géographie, d'anglais, de français, de sciences ou d'informatique, mais également pour l'apprentissage de la locomotion sans vision avec des plans de quartiers et de carrefours ou des cartes adaptées.

En interaction avec des instructrices de locomotion de l'IJA et du CIVIL-Lestrade, nous avons porté DERi sur tablette afin de rendre utilisable le dispositif en mobilité.

La motivation principale était d'étudier les apports d'un système de cartographie interactif auquel les utilisateurs pourraient se référer pendant le déplacement. En plus du portage et de l'adaptation du logiciel sur plate-forme mobile, nous avons conçu et réalisé des coques en impression 3D pour maintenir le plan en relief à la surface de l'écran (et protéger les tablettes!). Des tests préliminaires ont été menés en mobilité (Figure 13A), ainsi qu'une chasse au trésor à l'IJA pendant laquelle deux équipes d'enfants trouvaient des indices en les repérant sur la tablette DERi (Figure 13B). La mobilité impose l'exploration du document d'une seule main et sur une surface d'interaction plus réduite. Des évaluations sont prévues pour mesurer l'utilisabilité du dispositif avec ces contraintes supplémentaires.

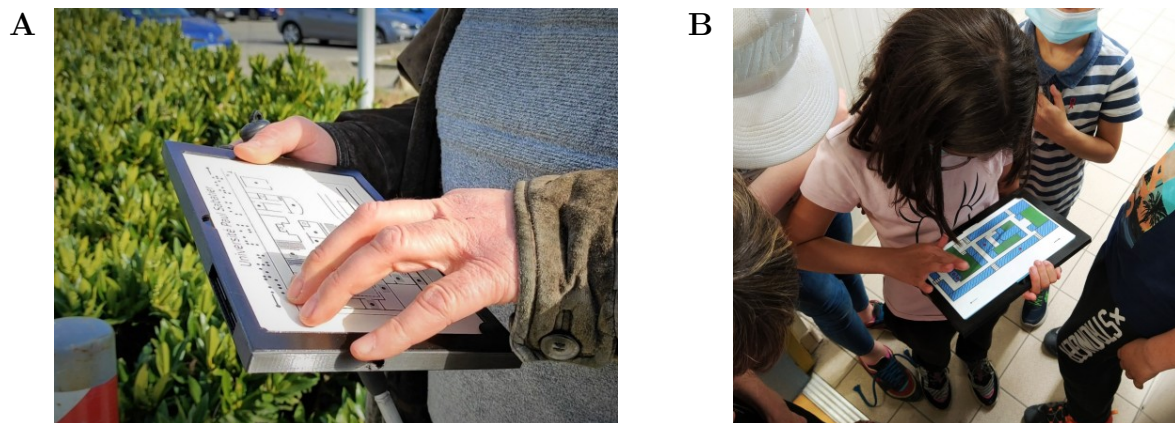


FIGURE 13 – A) Test de DERi tablette pour la locomotion à l'Université Paul Sabatier B) Chasse au trésor à l'IJA sur DERi tablette

Plusieurs stages de master 1 & 2 en informatique, en psychologie et en ergonomie se sont déroulés en co-encadrement dans le cadre de conventions entre le laboratoire et les deux instituts cités. Ces instituts montrent un vif intérêt pour ces dispositifs et l'enjeu dans les années à venir est de proposer une plate-forme commune pour assurer que des documents DERi réalisés dans un institut sont utilisables sur les dispositifs installés dans les autres instituts. L'équipe envisage la création d'une fondation ou d'une association qui pourrait assurer cette fonction avec une pérennité suffisante et l'indépendance nécessaire.

En sus de l'IJA et du centre Lestrade, l'INJA<sup>7</sup> à Paris, l'INSHEA<sup>8</sup> à Suresnes et le CTRDV<sup>9</sup> à Villeurbanne, sont intéressés par le dispositif. De plus, les professionnels de l'adaptation des documents ainsi que les professionnels concernés par la transmission du savoir à destination des personnes déficientes visuelles sont organisés en réseau (le GPEAA) et l'intérêt pour ce dispositif est très fort dans leur communauté. Nous avons organisé une formation à l'éditeur de DERi au mois de juin 2019 à laquelle une dizaine de professionnels de la déficience visuelle ont participé. Une autre est prévue en novembre prochain, la période sanitaire que nous avons traversée ayant limité les sessions planifiées plus tôt.

7. <http://www.inja.fr>

8. <https://www.inshea.fr>

9. <https://ctrdv.fr>

### 1.3.2.3 Au-delà du tactile

Avec DERi, les personnes déficientes visuelles peuvent mieux comprendre les cartes et les graphiques grâce à une expérience d'exploration facilitée et mieux intégrée (BROCK et al., 2015). Les cartes sont cependant fabriquées en papier thermogonflé ou via des supports minces qui limitent les textures qu'il est possible d'utiliser et *a fortiori* les hauteurs des éléments présents sur la carte. Il est possible de réaliser des documents avec une épaisseur supérieure, en plastique thermoformé ou en impression 3D. Dans ce cas, c'est la détection des appuis tactiles qui devient limitante pour des élévations maximales par rapport à l'écran d'environ un à deux millimètres selon les modèles d'écrans tactiles et de tablettes.

Pour dépasser les limitations inhérentes aux écrans tactiles et ajouter un niveau d'interactivité supplémentaire, en permettant à l'utilisateur de manipuler physiquement des éléments de la carte sans perdre cette interactivité, nous avons conçu et développé différents dispositifs tangibles pour lesquels une surface interactive en relief peut recevoir des pièces en 3D, elles-mêmes interactives. Ces travaux ont été initiés par une proposition d'évolution de DERi pour rendre le dispositif plus attractif et ludique pour les enfants. Dans Mapsense (BRULÉ et al., 2016), des objets imprimés en 3D avec du filament conducteur ou recouverts de papier aluminium déclenchaient des sons quand ils étaient positionnés aux emplacements prévus à cet effet sur une carte tactile interactive. Cette étude a montré que les objets tangibles augmentaient l'attractivité du dispositif pour les enfants et favorisait la mémorisation des informations de la carte. Nous avons donc démarré un volet de recherches sur les apports du tangible dans les systèmes de cartographie interactive pour les personnes déficientes visuelles.

## 1.4 Interactions tangibles

Les interfaces tangibles ont été développées à la fin des années 1990 dans le mouvement des interfaces visant à dépasser les interactions à la souris et au clavier sur un écran. La démarche est qualifiée de post-WIMP ('Windows, Icons, Menu & Pointing devices') (BEAUDOUIN-LAFON, 2000) et vise à simplifier l'usage des ordinateurs en adoptant des modes d'interactions plus naturels. Les interfaces tangibles combinent des objets physiques et des données numériques en suivant le concept de 'graspable user interface' (FITZMAURICE et al., 1995 ; ISHII et ULLMER, 1997). L'utilisateur du système manipule physiquement des objets dont la position ou l'orientation sont suivis afin d'interagir avec des données numériques. L'utilisateur peut d'ailleurs lui-même faire partie du système tangible en interagissant avec le système numérique via des mouvements de ses membres ou même de son corps en entier (CLAY et al., 2012).

À partir des années 2000, les recherches sur les interfaces tangibles se sont structurées en un domaine à part entière. Domaine par nature fortement interdisciplinaire avec des travaux empruntant à la fois à l'IHM, la réalité augmentée, l'électronique, la robotique mais aussi et entre autre le design, l'architecture ou l'art. Une large diversité d'interfaces tangibles ont été développées au cours des vingt années qui ont suivi. Des contributions théoriques de modélisation des interfaces tangibles et de définition de cadres de références (ULLMER et ISHII, 2001 ; SHAER et al., 2004 ; JACOB et al., 2008 ; LEPREUX et al., 2016) ont structuré le domaine (voir SHAER et HORNECKER, 2009 pour une revue). Malgré le nombre important d'interfaces développées, les dispositifs tangibles destinés à être utilisés sans vision sont relativement peu répandus.

En 2010, McGookin et collègues (McGookin et al., 2010) ont réalisé et évalué un prototype, le 'Tangible Graph Builder', permettant à des personnes non-voyantes d'explorer des graphiques en manipulant des objets suivis par une caméra située sous la surface d'interaction. Les éléments du graphique pouvaient être déplacés dans les cases d'une grille et un retour sonore adapté était généré pour indiquer à l'utilisateur les valeurs correspondant aux positions occupées (Figure 14). TIMM (pour 'Trackable Interactive Multimodal Manipulatives'), Manshad et al., 2012 était un système conçu pour créer, explorer et éditer des diagrammes tangibles via des objets interactifs capables de vibrer et de produire des sons. Comme dans le précédent système, les TIMMs sont repérés par une caméra placée sous la surface d'interaction. Dans ces deux systèmes, les objets tangibles étaient ponctuels et les lignes entre les éléments tangibles n'étaient pas représentées. Un autre prototype, le 'Digitizer Auditory Graph' (Choi et Walker, 2010) permettait de construire un graphique en utilisant des bâtonnets de cire. Une caméra prenait ensuite une photographie pour déterminer la position des bâtonnets et donner une description sonore du graphique.

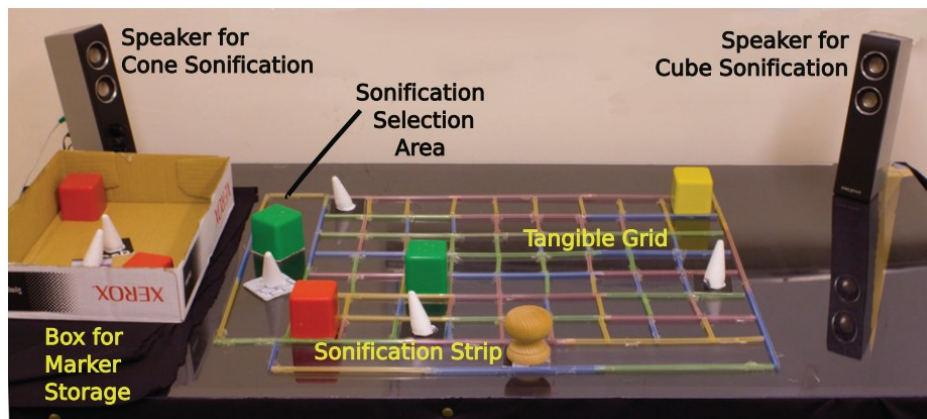


FIGURE 14 – Interface tangible de construction et d'exploration de graphiques pour personnes non-voyantes. L'utilisateur est guidé pour placer sur une grille des objets représentant les différents points d'une courbe de données. (Tiré de McGookin et al., 2010)

D'autres interfaces tangibles ont été développées spécifiquement pour construire et explorer sans vision des cartes. Dans le dispositif conçu et réalisé par Schneider et Strothotte (Schneider et Strothotte, 2000), les personnes non-voyantes étaient guidées vocalement pour construire un itinéraire en utilisant des pièces magnétiques de différentes tailles. Pour la construction comme pour l'exploration, le suivi se faisait en détectant via une caméra la position d'un doigt marqué d'un anneau de couleur. Le Tangible Pathfinder (Sharlin et al., 2004) est un concept d'interface tangible (à priori sans implémentation) dans lequel les utilisateurs sont guidés pour positionner des éléments d'itinéraires (routes, trottoirs, murs, passages piétons, ...) à la surface d'une tablette tactile. La représentation tangible peut ensuite être explorée avec les mains pour déclencher des retours sonores.

Parmi les interfaces tangibles pour personnes déficientes visuelles présentées ci-dessus, seules le 'Tangible Graph Builder' et le 'Digitizer Auditory Graph' ont été formellement évaluées avec des utilisateurs non-voyants. Au-delà de la satisfaction des utilisateurs et de l'utilisabilité des dispositifs, un certain nombre d'éléments importants doivent être pris en compte pour la conception de dispositifs tangibles à destination des personnes

non-voyantes. Pour les dispositifs permettant de représenter des cartes, nous retenons la nécessité de pouvoir :

- Représenter de manière physique et numérique des points, mais aussi des lignes
- Disposer d'éléments tangibles physiquement très stables
- Créer des objets de formes différentes pour les distinguer tactilement
- Associer une contrepartie numérique à chaque élément physique
- Concevoir des retours sensoriels multiples ; verbal, sonore, vibratoire, ...
- Guider l'utilisateur lors du placement des éléments tangibles
- Réagir de manière fiable aux actions de l'utilisateur lors de l'exploration

Dans les sections suivantes, je présente les dispositifs réalisés et évalués avec des étudiants de l'équipe au cours des cinq dernières années. Nous avons tenté de tenir compte, dans la mesure du possible, des éléments listés ci-dessus lors de la conception de ces dispositifs. Chaque dispositif avait cependant ses caractéristiques propres selon la présence ou non d'éléments fixes sur la surface d'interaction, la nature des éléments tangibles et différentes contraintes de coût, de taille ou de technique utilisée.

### 1.4.1 Tangible Box

À la suite du prototype Mapsense (cf [section 1.3.2.3](#)), nous avons développé en collaboration avec un enseignant de l'IJA un dispositif dans lequel des éléments tangibles pouvaient être identifiés et suivis sur une surface interactive de grande taille sans que le coût ne soit prohibitif. Dans Mapsense, le nombre de formes différentes qui pouvaient être détectées était assez faible puisqu'il correspondait à des motifs de stimulation tactile univoques en tenant compte des rotations et translations.

Ici, nous souhaitions pouvoir interagir avec une vingtaine d'éléments tangibles ayant chacun leur identité, tout en maintenant le coût suffisamment bas pour que chaque enseignant puisse disposer de son propre dispositif. Le système devait également avoir une taille et un poids raisonnable et être rapide à installer. En effet, plus de 80 % des élèves déficients visuels sont maintenant en inclusion dans des classes ordinaires et les enseignants spécialisés doivent transporter le dispositif d'un établissement à un autre pour l'utiliser. Pour limiter les manipulations requises pour l'installation, l'idée était également que tout soit inclus dans une boîte et qu'il n'y ait pas de caméra ou d'autre appareil à installer et calibrer.

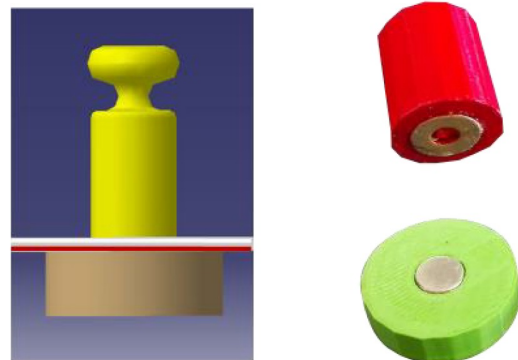


FIGURE 15 – Les pions de la Tangible Box sont constitués de deux parties. L'une, manipulable par l'utilisateur, au-dessus de la surface d'interaction, et l'autre, couplée magnétiquement à la 1<sup>ère</sup> partie et repérable par le système, au-dessous de la surface d'interaction

Dès le départ, la stratégie a été de se passer d'écran pour réduire les coûts. Après de nombreuses ébauches et tests, la solution finalement retenue pour avoir des éléments tangibles qui soient à la fois très stables, de petite taille (pour permettre d'en placer beaucoup sans trop encombrer la surface), et dont le suivi par le système puisse être effectué en continu a été d'utiliser des pions composés de deux parties aimantées placées

en vis-à-vis de part et d'autre de la surface d'interaction (Figure 15). Ainsi la partie manipulée par l'utilisateur, au-dessus de la surface reste localisable en permanence en détectant de manière continue la position de la partie située sous la surface. La seule contrainte étant de ne pas décoller le pion manipulé mais de le faire glisser sur la surface, afin de maintenir le couplage avec le pion inférieur. Le pion inférieur est recouvert d'un marqueur (à la manière d'un QR Code) qui lui assure de conserver son identité dans le système.

La position du pion est suivie par une caméra grand-angle placée au fond de la boîte et reliée à un mini-ordinateur Raspberry Pi <sup>10</sup>. Le système comprend également un routeur Wi-Fi pour accéder sans fil au système et faciliter les développements, un ruban lumineux pour éclairer les marqueurs (la boîte est opaque), un pavé tactile pour naviguer dans les menus et un haut-parleur pour le retour sonore.

La partie logicielle du système a été réalisée par Julie Ducasse et la partie matérielle dont la boîte en aluminium par un étudiant en IUT génie mécanique. Le dispositif se présente sous la forme d'une boîte de 60 x 35 x 20 cm, pesant autour de 4 kg et incluant tous les éléments nécessaires à son fonctionnement (Figure 16). Le prix de revient d'un dispositif est inférieur à 200 €.



FIGURE 16 – Vue d'ensemble de la Tangible Box. A. Haut-parleur. B. Pavé numérique. C. Pions manipulables par l'utilisateur. D. Surface d'interaction. Ici recouverte d'un papier thermogonflé, mais de nombreux support d'épaisseurs variées sont utilisables. E. Système de fixation du support à hauteur réglable. F. Zone de rangement des pions inutilisés

En s'adaptant à des supports d'interaction de différentes hauteurs et en supportant des objets de différentes tailles et formes (objets imprimés en 3D dans lesquels un ou plusieurs aimants sont placés), la Tangible Box est un dispositif versatile. Pour explorer les usages pédagogiques qu'il est possible d'en faire, nous avons organisé des sessions de brainstorming à l'IJA et au centre Lestrade avec des enseignants spécialisés pour

10. <https://www.raspberrypi.org>

générer des scénarios d'usage en plus de ceux proposés par l'enseignant co-initiateur du projet. Lors de ces sessions, une vingtaine d'idées de scénarios, réalistes au vu des capacités de la Tangible Box, ont été proposées.



FIGURE 17 – Le jeu collaboratif « Le petit chaperon rouge » de l'éditeur « Purple Brain », porté sur la Tangible Box et présenté au festival du jeu à Cannes en 2017

Plusieurs projets ont vu le jour en s'appuyant sur ces séances de créativité. Le plateau supérieur en [figure 16](#) est une application pour apprendre à lire l'heure et la [figure 17](#) montre un jeu interactif inspiré d'un jeu de plateau collaboratif. Ce dernier projet a été réalisé avec Audrey Cabrolier, étudiante en Master d'architecture de l'information, et l'association AccessiJeux<sup>11</sup> qui adapte des jeux grand public pour les personnes déficientes visuelles. Le résultat de cette adaptation du jeu « Le petit chaperon rouge » a été présenté en février 2017 au festival international des jeux de société à Cannes.

L'adaptation d'autres jeux de plateau est envisagée en poursuite de la collaboration avec l'association AccessiJeux. Les jeux dans lesquels de nombreux pions sont nécessaires présentent un défi pour être adaptés sur la Tangible Box (limitation du nombre de pions différents détectables mais également de l'encombrement du plateau). Par extension, et en respectant les recommandations émises pour l'adaptation des jeux vidéo ([BUAUD et al., 2002](#)), de prochaines applications pourraient consister à adapter des jeux multimédias sur la Tangible Box.

La Tangible Box a suscité beaucoup d'enthousiasme auprès des professionnels des instituts spécialisés. Pour poursuivre les développements, nous avons recruté un ingénieur, Anthony Bordeau, qui a mis au point plusieurs versions du boîtier, de plusieurs formats (entre A3 et 24" de diagonale) et en s'appuyant sur une détection optique comme dans la version originale ou sur un cadre infrarouge pour réduire l'épaisseur et le poids et améliorer la robustesse de la détection.

Un exemple de plateau construit par un étudiant en Master d'ergonomie cognitive, Lachezar Dimitrov, en interaction avec une instructrice en locomotion de l'IJA, Anna Bartolucci est visible en [figure 18](#). Un pion imprimé en 3D (personnage blanc sur la droite) peut être déplacé entre les murs de l'IJA représentés en Lego et déclenche différents sons enregistrés dans les pièces de l'institut. Cette application a permis notamment à une élève non-voyante ayant des troubles associés de comprendre l'organi-

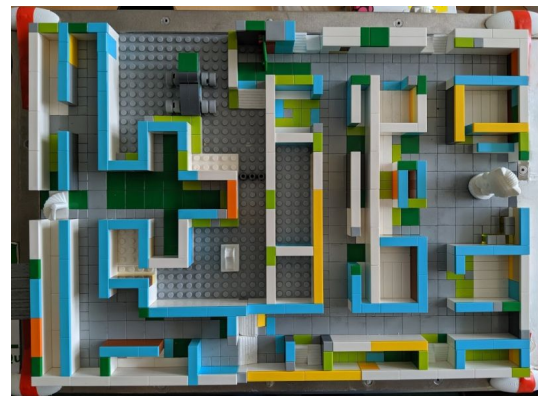


FIGURE 18 – Plateau construit en Lego, représentant le rez-de-chaussée du bâtiment principal de l'IJA. Ce plateau est posé sur la Tangible Box et les déplacements du pion déclenchent de manière interactive des sons enregistrés dans l'établissement

11. <https://www.accessijeux.com>



sation spatiale du rez-de-chaussée de l’IJA alors qu’elle était scolarisée depuis plus de deux ans dans l’établissement. Pour les élèves ayant des difficultés cognitives, la présence de vrais murs sur le plan rend plus facile la compréhension de l’organisation des lieux. Sur du papier thermogonflé, les murs doivent être interprétés à partir de lignes d’1 mm de haut, ce qui peut représenter un vrai défi pour ces élèves.

Une partie du travail en cours sur la Tangible Box consiste à élaborer une interface de programmation utilisable directement par les enseignants afin qu’ils puissent réaliser eux-mêmes leurs applications. L’interface graphique en développement leur permet de définir les objets tangibles et leur position initiale, les zones d’interaction pour déclencher des sons ou de la synthèse vocale, ainsi que des variables pour réaliser des applications interactives allant au-delà du simple déclenchement d’actions au passage dans des zones (gestion de conditions, interactions entre pions, historique d’exploration, ...). **Un article présentant le concept de la Tangible Box est publié dans une conférence nationale sur le handicap (Mulet et al., 2020)** et un autre article avec des tests préliminaires dans différents cas d’usages est en cours de soumission à une revue internationale d’IHM.

### 1.4.2 Puzzle interactif

Parallèlement à la Tangible Box, un projet de dispositif tangible avec plusieurs couches interactives a été initié avec un enseignant à l’INJA à Paris (Julien Berthier). Le prototype s’appuyait sur l’expérience acquise avec DERi et Mapsense et ces travaux ont été menés avec Stéphanie Giraud lors de son post-doctorat dans l’équipe ELIPSE, dans le cadre du projet ANR AccessiMap. Ici encore, les contraintes de coût, de taille et de poids étaient importantes. Contrairement au dispositif précédent, le puzzle interactif était une application dédiée et la surface d’interaction était usinée dans ce but. Le dispositif permettait d’étudier les apports d’un dispositif interactif pour l’apprentissage de représentations spatiales complexes chez les enfants déficients visuels.

Le dispositif est constitué d’un plateau de bois dans lequel des reliefs ont été sculptés en découpe laser (Figure 19A). Chaque élément métallique visible sur la photographie de gauche (vis et clous) permet d’obtenir un retour sonore sur l’élément qui se trouve à cet emplacement. Ce premier niveau d’interaction tactile est complété d’un second niveau constitué de pièces imprimées en 3D qui peuvent s’assembler entre elles comme dans un puzzle ainsi que dans les reliefs du 1<sup>er</sup> niveau pour former une nouvelle surface interactive (Figure 19B). Ces pièces en 3D comportent également des éléments métalliques répondant au toucher par des interactions sonores.

Dans le prototype développé, il s’agissait d’une représentation de Paris à travers différentes époques. Ce dispositif est particulièrement adapté aux apprentissages pédagogiques avec un côté ludique évident qui aide à focaliser l’attention des élèves pendant la classe. De fait c’est le témoignage unanime que rapportent les enfants qui ont eu l’occasion de manipuler ce puzzle interactif. Dans une expérience menée avec une classe de l’INJA, nous avons montré que la présentation tangible et interactive des informations permet un meilleur apprentissage par rapport à la présentation via un document en relief classique réalisé en papier thermogonflé et accompagné de sa légende (Figure 20). C’était le cas notamment pour les évaluations portant sur les connaissances spatiales (barres "Geography" sur la figure) avec une bien meilleure rétention des informations portant sur les points d’intérêt, les routes et les connaissances de type cartographique. La performance était pratiquement doublée sur les 24 questions par élève posées après

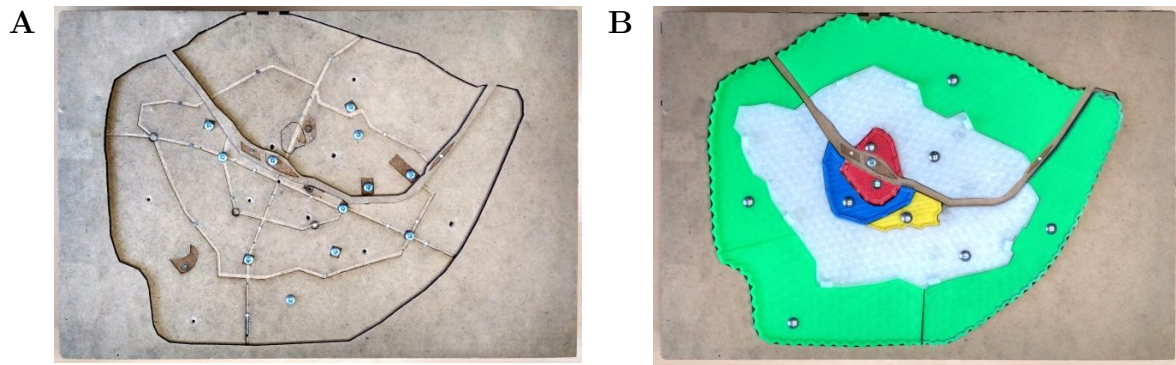


FIGURE 19 – Puzzle interactif tangible. Deux niveaux d’interaction dans ce dispositif. Un premier niveau (A) où chaque élément métallique déclenche un événement audio. Un deuxième niveau (B) où des pièces imprimées en 3D viennent recouvrir le plateau en conservant des capacités d’interaction audio (les éléments brillants sur les pièces déclenchent des sons)

exploration du plan interactif comparé à l’exploration du même plan en papier thermogonflé (2 groupes de 12 élèves non-voyants ou malvoyants). **Ces travaux ont fait l’objet d’une publication dans ‘Frontiers in Psychology’ (Giraud et al., 2017).**

Pour la réalisation de la partie interactive de ce prototype, une approche ‘do-it-yourself’ avait été retenue, notamment en s’appuyant sur des cartes électroniques TouchBoard<sup>12</sup> pour détecter les appuis et pour produire les sons. Les pièces en 3D avaient été imprimées au Campus-Fab<sup>13</sup> de l’université et j’avais réalisé l’intégration (découpe, câblage, et soudure) de l’ensemble du dispositif. L’utilisation d’étiquettes RFID avait été un temps pressentie, à la manière d’applications tangibles développées sur tables interactives pour les enfants (KUBICKI et al., 2015), mais l’enseignant ne souhaitait pas que les élèves déplacent un lecteur RFID à la surface de la maquette, ou encore qu’ils aient à passer les pièces du puzzle devant un lecteur.

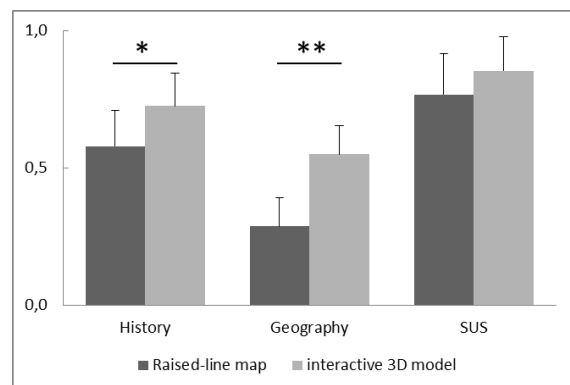


FIGURE 20 – Score normalisé de réponses à des questions sur un contenu graphique présenté en ayant recours à un document en relief classique (‘raised-line map’) ou à un document interactif et en 3D (‘interactive 3D model’, le Puzzle). Les enfants ont de meilleures performances avec le dispositif interactif

Cette réalisation a donné lieu à des réflexions avec les partenaires des centres spécialisés. Même si quelques compétences sont nécessaires pour réaliser un tel dispositif, il nous semble intéressant de diffuser plus largement cette idée que les enseignants et autres professionnels de l’éducation peuvent développer par eux-mêmes des dispositifs interactifs. Les méthodes de prototypage rapide que nous utilisons pour développer nos systèmes, avec des cartes électroniques simples à interfacer et des modules logiciels réutilisables, permettent à un large public de s’emparer de ces questions. Pour accompagner la diffusion de ces idées, nous avons créé en 2016 un « hackathon » d’un format particulier

12. <https://www.bareconductive.com/products/touch-board>

13. <https://www.univ-tlse3.fr/campus-fab-1>

se déroulant sur plusieurs mois (le THackaVoi<sup>14</sup>). Nous l'avons animé chaque année depuis la création (sauf en 2020 et 2021 pour cause de COVID). Le principe est de réunir en équipes des enseignants de l'IJA et des étudiants en informatique à l'Université Paul Sabatier. Les enseignants proposent des projets de dispositifs interactifs qu'ils co-réalisent ensuite avec les étudiants. Les éditions de ces concours se sont terminées par une cérémonie de présentation des réalisations devant le personnel de l'IJA et une remise des prix pour les équipes désignées gagnantes. La forte visibilité du concours a permis à de nombreux professionnels de l'IJA d'aborder l'électronique et l'informatique de manière beaucoup plus décomplexée et cette initiative va se poursuivre dans les années qui viennent.

Les 'fablabs' qui s'ouvrent partout en France mais aussi les services de transcription des établissements spécialisés peuvent parfaitement constituer des centres de ressources pour réaliser de tels projets. Nous avons mis en ligne sur le site du THackaVoi<sup>14</sup> une liste de tutoriaux librement accessibles permettant de fabriquer de tels dispositifs interactifs, soi-même en autonomie, ou avec les ressources couramment disponibles dans un fablab.

Le prototype de puzzle interactif s'est avéré fonctionnel et il est toujours utilisé en classe par l'enseignant avec qui nous l'avons conçu et fabriqué. Cependant, en comparaison du dispositif interactif DERi décrit précédemment, ce dispositif n'est pas éditable puisqu'il est dédié à une seule application et qu'il n'est pas possible d'y changer la configuration des éléments physiques à sa surface. C'est pour cela que nous avons poursuivi nos développements pour réaliser d'autres dispositifs tangibles permettant une mise à jour des informations de la carte.

### 1.4.3 Tangible Reels

Sur le dispositif DERi, le contenu de la carte peut être interactif, aux emplacements où des informations sonores sont ajoutées, mais le contenu tactile est figé dans la carte en relief et une modification nécessite la ré-impression du support tactile. Sur le puzzle interactif, les éléments physiques sont manipulables, mais ils ne peuvent occuper qu'une seule position et leur disposition n'est pas librement reconfigurable.

C'est pour ajouter une dimension dynamique au support de l'information lui-même que nous avons conçu un dispositif dans lequel les points et les lignes représentant une carte ou un graphique peuvent être placés et déplacés par l'utilisateur. La [figure 21](#) présente à la fois les éléments interactifs et la manière de les connecter pour construire une carte ou un graphique. Une fois la représentation graphique construite, l'utilisateur peut explorer ce document interactif en pointant du doigt les points et les lignes pour en obtenir une description vocale.

Ce dispositif est composé de plusieurs éléments. Tout d'abord du Tangible Reel lui-même, qui est un enrouleur utilisé par exemple pour accrocher les badges ou les clés. L'enrouleur constitue un point de la carte ou du graphique et le fil enroulable représente une ligne dont la taille pourra être ajustée à la longueur souhaitée. Une ventouse est disposée sur la face inférieure de l'enrouleur. Cette ventouse assure la stabilité de l'élément tangible et le rend facilement repositionnable par l'utilisateur. Les Tangible Reels sont entourés d'un anneau métallique et un aimant est ajouté à l'extrémité de leur fil enroulable. Cet aimant peut être facilement attaché / détaché de l'anneau métallique

---

14. <https://thackavoir.fr>

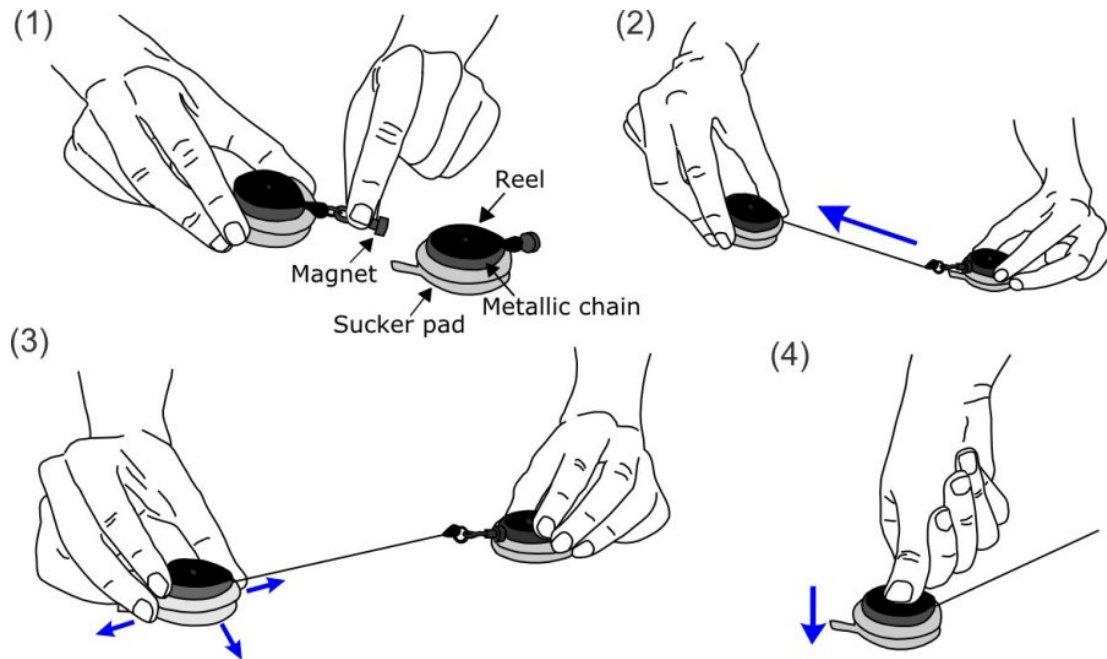


FIGURE 21 – Représentation schématique des Tangible Reels et des étapes nécessaires pour les placer et les relier entre eux afin de reconstruire un graphique. (1) Accrochage d'un nouveau Tangible Reel. (2) Extension du filin enroulable. (3) Positionnement précis du Tangible Reel (guidage). (4) Pression pour ancrer le Tangible Reel grâce à la ventouse placée dessous

d'un autre Tangible Reel pour matérialiser des lignes droites entre les différents nœuds de la représentation graphique.

Pour suivre en permanence la position des points et guider l'utilisateur, un marqueur est positionné à l'intérieur de la ventouse. Ce marqueur est détecté par une caméra située sous la vitre qui sert de support aux Tangible Reels. Un cadre infrarouge placé autour de la surface d'interaction en verre permet de détecter les doigts des utilisateurs. L'utilisateur peut ainsi pointer les éléments de la représentation graphique (points et lignes) pour en obtenir une description verbale.

Ce dispositif a été développé en lien étroit avec des utilisateurs finaux au sein d'une démarche de conception participative. À l'issue de plusieurs itérations dans le processus de création, l'utilisabilité du dispositif final a été évaluée au cours de deux expériences avec des utilisateurs non-voyants (4 puis 8 participants). Des cartes contenant entre 6 et 12 points ainsi que 5 à 8 lignes étaient construites puis explorées par les sujets, guidés par le système. Leur tâche était de construire le plus fidèlement possible ces cartes (98 % des Tangibles Reels ont été placés correctement et 85 % des cartes étaient entièrement correctes), puis de répondre à des questions sur la disposition des éléments de la carte et leurs relations spatiales. 90 % des réponses étaient correctes et le score SUS moyen était de 84 / 100, ce qui démontre

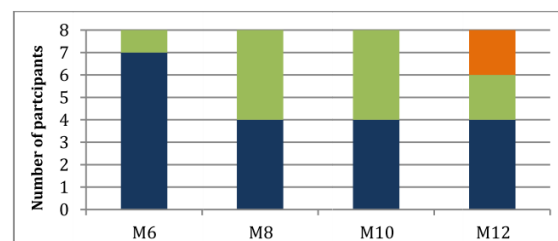


FIGURE 22 – Pour chaque carte, contenant de 6 à 12 points (M6 à M12), les 8 participants rapportaient la difficulté perçue pour reconstruire la carte. En bleu : plutôt facile, en vert : difficulté normale et en orange : plutôt difficile

l'utilisabilité du système et sa capacité à fournir des informations spatiales précises aux sujets.

La [figure 22](#) montre pour chaque complexité de carte (6, 8, 10 ou 12 points) la difficulté perçue dans la tâche de reconstruction. La tâche était très majoritairement évaluée comme étant facile ou de difficulté ordinaire, même pour les cartes les plus complexes. Cette étude a permis de conclure que les Tangible Reels permettent de matérialiser de manière efficace des intersections et des lignes pour construire une carte tangible et reconfigurable. À l'issue des expérimentations, nous avons réalisé un atelier pédagogique avec une enseignante de l'IJA pour explorer comment les enseignants pourraient s'appropriier les Tangible Reels dans des scénarios pédagogiques. **Ces résultats ont été publiés à CHI : Ducasse et al., 2016, une conférence A\* en informatique.**

#### 1.4.4 BotMap

Lors de l'exploration des différents scénarios d'utilisation des Tangible Reels, nous avons été confrontés à des situations dans lesquelles la mise à jour de la position des différents nœuds et lignes constituant le graphe prenait trop longtemps. En explorant cette idée de dispositifs permettant de réaliser des graphiques à la fois tangibles, interactifs, mais également dynamiques, nous avons réalisé qu'un tel dispositif pourrait servir de support à la représentation d'opérations sur les cartes traditionnellement inaccessibles aux personnes déficientes visuelles, comme les opérations de déplacement de la carte ('pan') et le changement d'échelle ('zoom').

Dans ce dispositif, les éléments tangibles sont plus dynamiques encore que dans les Tangible Reels puisque ce sont des petits robots autonomes ([Figure 23](#)). Ce dispositif permet à des personnes non-voyantes de réaliser des opérations de défilement et de zoom sur une carte; actions qu'ils ne peuvent réaliser qu'avec un dispositif dynamiquement reconfigurable.



FIGURE 23 – Botmap : les éléments de la carte sont représentés par des robots autonomes qui peuvent se déplacer indépendamment pour simuler des opérations de défilement et de zoom sur une carte

Le dispositif est constitué d'une flotte de petits robots du commerce<sup>15</sup> disponibles aux alentours de 50 € pièce. Ces robots sont guidés par les motifs colorés au-dessus desquels ils se déplacent. En plaçant les robots sur un écran et en affichant des motifs dynamiquement sous les robots, il est possible de piloter finement leur trajectoire. Dans le prototype de laboratoire que nous avons développé, la position des robots est déterminée par un marqueur placé au-dessus des robots. Un algorithme de déplacement des robots, tenant compte des collisions et des entrées-sorties nécessaires dans une zone de stockage a été développé pour optimiser le temps de remplacement des

robots ([Figure 24](#)). Ce temps moyen de remplacement reste cependant relativement élevé avec ce modèle de robots, 7 à 9 secondes, mais d'autres robots tels que les Zooids<sup>16</sup>

15. Ozobot : <http://ozobot.fr>

16. <https://aviz.fr/swarmui> & <https://github.com/ShapeLab/SwarmUI>

(LE GOC et al., 2016) peuvent largement améliorer ces temps de rafraîchissement de la représentation graphique pour fluidifier l'expérience utilisateur.



FIGURE 24 – La position des Ozobots sur la carte est mise à jour en affichant un motif lumineux permettant de les diriger vers la nouvelle position de la ville qu'ils représentent, vers une nouvelle ville ou vers une aire de stockage

Au cours d'une expérience avec des voyants les yeux bandés (10 sujets) et de deux expériences avec des personnes non-voyantes (8 et 3 sujets), nous avons évalué l'utilisabilité de ce dispositif pour faire découvrir et comprendre la notion de défilement cartographique et de zoom à des personnes déficientes visuelles. La dernière tâche à réaliser consistait à déterminer un itinéraire de visite entre deux villes distantes en respectant certaines contraintes. Tous les sujets non-voyants ont réussi cette tâche qui nécessitait d'intégrer des informations à différents niveaux de zoom et sur de grandes distances, incluant des déplacements.

Le [tableau 2](#) présente sous forme synthétique les taux de succès pour 4 de ces tâches. Les résultats des questionnaires sur les différents types de connaissances spatiales acquises lors de l'exploration des cartes (points de repères, routes et connaissances cartographiques) ont montré que les sujets avaient construit une représentation mentale fiable de ces informations. **Ces travaux ont été publiés**

**dans le journal TOCHI (Transactions on Computer-Human Interaction) : Ducasse et al., 2018.** L'article détaille les mesures d'utilisabilité du dispositif, d'acquisition des connaissances spatiales, de compréhension des cartes et de fidélité de la représentation mentale ainsi que la charge mentale induite dans ces tâches.

Type of trial	Keyboard	Sliders	Total
Zoom in (N = 16)	100%	100%	100%
Pan (N = 16)	93.8%	100%	96.9%
Zoom in & Pan (N = 16)	62.5%	75%	68.7%
Zoom out & in (N = 16)	100%	87.5%	93.7%

TABLEAU 2 – Taux de succès pour 4 tâches de déplacement et de zoom (parfois combinés) dans BotMap. Ce taux est évalué pour les deux modalités d'interaction, au clavier et avec des curseurs tangibles

## 1.5 Discussion

La généralisation de l'usage des technologies d'information et de communication et les progrès en termes d'accessibilité des supports et du matériel informatique ont abouti à une variété de dispositifs (lecteurs d'écrans, plages brailles, smartphones,...) qui ont contribué à réduire les difficultés rencontrées par les personnes déficientes visuelles pour la communication ou l'accomplissement de nombreux actes quotidiens.

Cependant certains domaines ne bénéficient pas encore des mêmes avancées. C'est le cas par exemple pour l'accès aux représentations graphiques et aux cartes que nous avons abordé dans ce chapitre. Les dispositifs que nous avons conçus, développés et évalués à l'IJA et dans d'autres instituts partenaires visent à permettre l'accès à ces représentations graphiques.

### Une valorisation du travail de recherche... valorisante

Pour tous ces dispositifs, conçus de manière participative avec des professionnels de la déficience visuelle et des personnes non-voyantes, nous avons procédé à des études d'utilisabilité chaque fois que cela était possible. Les résultats nous ont montré que les dispositifs interactifs permettent de mieux comprendre les graphiques et les cartes et que la rétention des informations à long terme est améliorée par rapport aux supports traditionnels.

Mais l'appropriation d'un dispositif ne se résume pas à son utilisabilité. Des critères comme l'utilité perçue, l'esthétique, le statut du dispositif ou l'engagement qu'il suscite sont également très importants à prendre en compte ([THUERING et MAHLKE, 2007](#)), notamment parce que ces dispositifs sont utilisés par des enfants et en classe. Selon les professionnels qui les utilisent en inclusion, ils permettent de nouvelles pratiques fédérant des enfants voyants et non-voyants qui jusqu'alors travaillaient sur des équipements distincts. Pour les plus jeunes d'entre ceux qui utilisent le dispositif et qui sont moins familiarisés avec les outils numériques, disposer d'un outil interactif est une grande source de motivation et des élèves qui peuvent avoir du mal à se concentrer vont être plus focalisés sur la leçon grâce au dispositif interactif.

Ces retours constructifs des enfants et des professionnels de la déficience, formels au cours d'entretiens semi-dirigés ou informels lors de divers événements organisés dans le cadre du laboratoire commun « Cherchons pour voir » (soirées « apérosiences », concours THackaVoir, discussions à l'occasion de sessions d'idéation ou des expériences) ont permis d'établir un lien suivi qui favorise le transfert des dispositifs conçus et développés à l'IRIT vers les établissements spécialisés. C'est une forme de valorisation qui peut être difficile à quantifier et qui ne rentre pas dans les cases des grilles d'évaluation des instances de recherche mais qui donne un sens à ces recherches au-delà de leur 'valeur' scientifique. Permettre un accès plus large aux représentations graphiques et cartographiques aux personnes déficientes visuelles revêt une importance sociétale et c'est un service qui est rendu à la communauté à travers la réalisation et la diffusion de ces projets.

### Perspectives pour les dispositifs interactifs développés

Le dispositif actuellement le plus diffusé et le plus utilisé dans les différents instituts partenaires est DERi. Le développement des outils d'édition et de lecture sont encore

dans une phase très active et nous implémentons de nouvelles fonctions pour rendre cet outil d'exploration de contenu en relief plus versatile encore, en interaction avec les professionnels de ces établissements. L'expérience sanitaire que nous avons vécue avec le COVID, pendant laquelle les enseignants spécialisés devaient suivre la progression des élèves à distance dans des conditions parfois difficiles, a ouvert une réflexion sur une extension de ces outils numériques pour leur utilisation à distance. Ainsi une version de **DERi à distance** est en développement en interaction avec des enseignants pour qu'ils puissent interagir à travers une connexion Internet sur un document interactif partagé. L'enseignant aura la possibilité de charger et décharger dynamiquement des couches de données sur DERi et assister en direct aux interactions de l'élève avec le document partagé.

D'autres pistes d'évolution sont activement explorées, par exemple pour que des **scénarios d'exercices** se déroulent de manière autonome, le score étant calculé directement par DERi en fonction des réponses de l'élève. Une version préliminaire a d'ailleurs vu le jour cette année avec une quête à la manière d'un jeu-dont-on-est-le-héros qui se déroulait sur un plateau imprimé en 3D disposé à la surface de la Tangible Box (le cœur du système est commun entre DERi et la Tangible Box). L'arbre de décision était modélisé dans une machine à état pour suivre les choix et les déplacements du joueur et interagir avec lui de manière appropriée en fonction du déroulé de l'histoire. Une version simplifiée et programmable graphiquement est en cours de réalisation pour que les professionnels des établissements puissent s'en emparer.

Une version de DERi où la **géolocalisation de la tablette** est prise en compte comme un paramètre d'interaction est également à l'essai. L'idée est de générer des informations sonores différenciées en fonction de la position de l'utilisateur. Un premier scénario de chasse au trésor a été élaboré avec des enfants de l'IJA en juin 2021. Les indications pour trouver les indices qui permettaient de localiser le trésor ne se déclenchaient que lorsque la tablette se trouvait dans la bonne pièce (localisée en intérieur par des balises Bluetooth). L'utilisation d'un plan interactif en mobilité permet de travailler sur de nouveaux apprentissages dans lesquels les enfants non-voyants doivent maintenir en mobilité une correspondance entre ce qui est figuré sur leur carte interactive et les lieux dans lesquels ils se trouvent. Le contexte du jeu se prête particulièrement bien à ce cadre d'apprentissage car la motivation renforce la participation active des enfants dans les tâches d'exploration de la carte. Les éducateurs de l'IJA envisagent d'utiliser DERi dans ce contexte de jeu pour faciliter la compréhension par les nouveaux élèves du bâtiment de l'IJA, complexe et sur plusieurs étages, et leur permettre ainsi d'être plus autonomes dans leur parcours de rééducation auprès des différents professionnels. DERi deviendrait d'ailleurs un bon outil pour étudier la navigation et la formation des représentations spatiales chez des enfants déficients visuels en fonction des informations cartographiques qui leur sont fournies.

Les perspectives de développement pour les autres dispositifs tangibles sont plus inégales. Même si les **Tangible Reels** ont été très appréciés par les élèves qui les ont utilisés, il est nécessaire d'affiner les cas d'usages les plus appropriés avant de les utiliser réellement à l'institut. L'autre raison pour laquelle ils ne sont pas déployés pour le moment est d'ordre pratique : le dispositif est encore très encombrant et ne peut pas être installé dans un établissement où l'espace est restreint. Il en est de même pour **BotMap** qui est également un peu encombrant mais doit surtout être porté sur une plate-forme robotique plus robuste et plus rapide comme les Zooids, pour devenir pleinement utilisable.



Le **puzzle interactif** possède un véritable potentiel pour être utilisé en classe pour différentes matières. Il permet de représenter des données géographiques complexes à plusieurs couches de manière simple et ludique. Il est cependant fastidieux dans l'état actuel de développer un puzzle complet. Le câblage des éléments est réalisé manuellement et chaque puzzle est un dispositif unique qu'il faut construire de A à Z. Une évolution de cette plate-forme est envisageable en s'appuyant sur une grille connectée sur laquelle des éléments génériques pourraient être connectés.

La **Tangible Box** est quant à elle déjà utilisée à l'IJA et le CTRDV à Villeurbanne commencera à l'utiliser en 2022. Les applications réalisables sur ce dispositif sont très diverses et la manipulation d'éléments tangibles interactifs apporte une dimension ludique qui renforce la motivation des enfants. Les versions actuelles de la Tangible Box sont beaucoup moins encombrantes que la 1<sup>ère</sup> version et sont utilisables directement en les posant sur une table à hauteur normale. Il est prévu d'évaluer l'utilisabilité du dispositif quand plusieurs utilisateurs collaborent et manipulent des éléments tangibles simultanément.

Au final, du point de vue des usages, ces différents dispositifs ont chacun leurs avantages et leurs faiblesses. Par exemple, même si les Tangible Reels ont l'avantage d'être très dynamiques et versatiles pour construire un plan et le modifier, ils ne permettent pas de construire des plans aussi complexes que ceux qu'on peut imprimer sur du papier thermogonflable et utiliser avec DERi. En fonction du scénario pédagogique envisagé et du public ciblé, le choix se portera vers l'un ou l'autre des dispositifs développés, tactile ou tangible.

### Autres dispositifs interactifs

Pour rester synthétique, je n'ai pas évoqué ici tous les projets de recherche sur lesquels j'ai travaillé. Nous avons par exemple travaillé avec Julie Ducasse sur un système qui viendrait améliorer la perception des cartes complexes dans DERi, comme celles affichant des sous-graphiques pour plusieurs villes, pour des élections par exemples. Le prototype motorisé (Figure 25A) permettait, en appuyant sur un sous-graphique de la carte posée sur une tablette DERi d'obtenir sous 4 doigts d'une main un « aperçu » physique des hauteurs relatives des barres de ce sous-graphique et de pouvoir passer dynamiquement d'un sous-graphique à un autre. Ce prototype répondait aussi à la problématique de l'énumération de tableaux de chiffres qui est très complexe à comprendre à l'oral. Quatre colonnes pouvaient être « haptiquement affichées » simultanément et un passage ligne par ligne permettait de parcourir rapidement un tableau à double entrée.

Pendant son séjour en postdoctorat dans l'équipe, j'ai aussi travaillé avec Quentin Chibaudel, sur des tâches collaboratives s'appuyant sur des robots autonomes développés à l'origine pour des applications éducatives (CHIBAUDEL et al., 2020). Nous avons utilisé ces robots dans une version adaptée d'une chasse au trésor (encore une!) dans laquelle les enfants progressaient en binômes (Figure 25B). Un enfant recevait des informations sur l'emplacement des indices par les mouvements d'un robot sur un plan et devait communiquer à son partenaire les déplacements à effectuer physiquement dans une pièce pour trouver ces indices. Des scénarios de collaboration entre voyants et non-voyants ou entre non-voyants sont aussi à l'étude sur DERi, DERi distance ou la Tangible Box pour déterminer comment opérer un partage optimal des informations entre participants n'ayant pas forcément les mêmes capacités de perception.

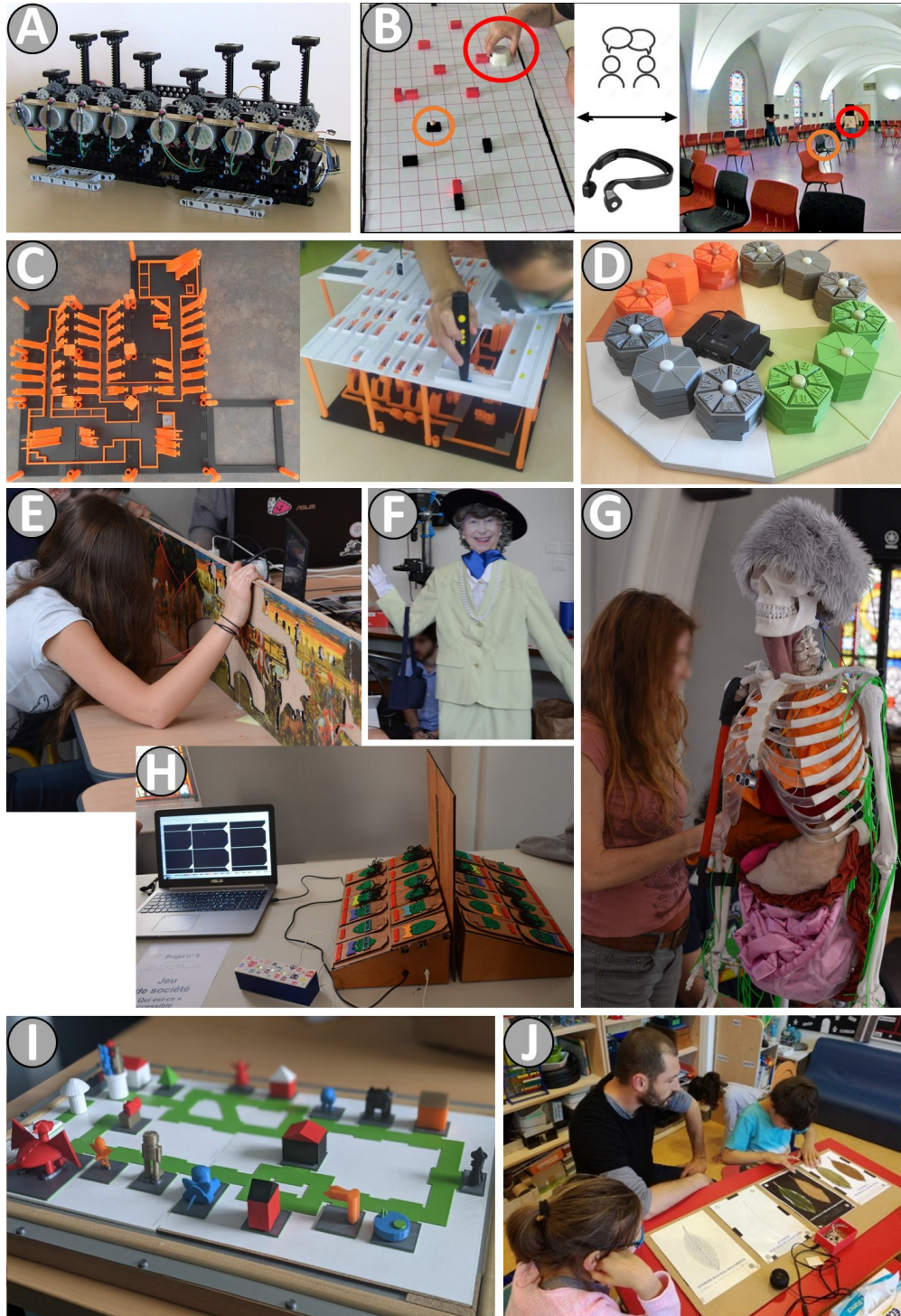


FIGURE 25 – Multiples projets effectués dans différents cadres. A. Rendu dynamique de graphiques ; les tiges verticales peuvent monter et descendre pour représenter des valeurs. B. Coopération à distance entre un guide et un explorateur via des robots éducatifs. C. Maquette interactive de la gare de Bordeaux pour travailler sur la verticalité en locomotion. D. Calendrier interactif pour comprendre l'organisation des mois, des semaines et jours dans une année. E. Tableau sonore interactif en partenariat avec le musée des Augustins à Toulouse. F. Reine d'Angleterre indiquant les parties du corps en anglais. G. Anatomie interactive sur un squelette en taille réelle. H. Adaptation accessible aux enfants non-voyants du jeu « Qui suis-je ? ». I. Version accessible d'un jeu-dont-on-est-le-héros sur la Tangible Box. J. Herbarier interactif en classe de biologie

Je souhaite également évoquer les recherches en cours sur des maquettes interactives initiées lors du stage de M2 d'Elen Sargsyan avec le Centre de Soins et d'Éducation Spécialisé (CSES) Alfred Peyrelongue près de Bordeaux. En interaction avec deux instructrices en locomotion, nous avons réalisé une maquette 3D presque complète de la gare de Bordeaux (60x60 cm) afin de faciliter la compréhension de ce lieu complexe et d'y préparer des itinéraires (Figure 25C). Les utilisateurs peuvent explorer la maquette sur 2 étages et obtenir une description sonore à différents emplacements via des étiquettes PenFriend<sup>17</sup> et des étiquettes RFID à lire avec un smartphone. Elen poursuit ses travaux et vient de démarrer une thèse dans l'équipe ELIPSE.

Enfin, de nombreux autres projets ont vu le jour au sein du laboratoire CPV, en particulier grâce à des interactions initiées par les projets du festival de co-construction THackaVoir. Ces projets ont permis de travailler sur la représentation du temps (Figure 25D), la sonification de tableaux d'art (Figure 25E), la perception du schéma corporel (Figure 25F & G), des jeux de déduction (Figure 25H) et d'autres réalisations plus ou moins complexes développées dans une dynamique de collaboration active avec les professionnels des différents instituts (Figure 25I & J).

### Contributions scientifiques et perspectives

Les recherches que je viens d'évoquer ont une composante appliquée évidente, pour améliorer l'exploration et la compréhension des graphiques et des cartes par les personnes déficientes visuelles. C'est la contribution sociétale principale évoquée ci-dessus. D'un point de vue plus fondamental, ces travaux contribuent à quatre domaines de recherche : l'IHM, les neurosciences, les sciences de l'éducation et la géomatique.

**IHM** : la contribution principale est bien sûr en IHM, puisque tous ces travaux s'inscrivent principalement dans ce cadre. L'évaluation de l'utilisabilité de ces interfaces non-visuelles fait progresser nos connaissances sur les paramètres à prendre en compte dans le design d'interactions sans vision et nous permettent d'émettre des recommandations pour la conception de ces dispositifs. Les interactions tangibles et haptiques sont également des domaines explorés dans nos recherches. Il est prévu d'outiller DERi à court terme pour enregistrer toutes les actions de l'utilisateur et permettre une analyse quantitative plus fine du comportement des sujets.

**Neurosciences** : les tests que nous réalisons pour évaluer les dispositifs portent souvent sur des cartes. Les performances des sujets pour restituer ces informations spatiales nous renseignent sur les représentations mentales mobilisées lors de ces tâches. Nos résultats confirment que les personnes non-voyantes, si elles disposent des outils adaptés, peuvent forger des représentations spatiales fiables de l'environnement. Il n'y a pas encore eu (ici) d'études spécifiques sur la construction de ces représentations spatiales chez les personnes non-voyantes en fonction des indices spatiaux fournis, mais c'est une voie de recherche que je trouverais intéressante à explorer à l'avenir.

**Sciences de l'éducation** : enfin, les dispositifs que nous concevons sont le plus souvent destinés à être utilisés par des enfants. Comme nous touchons là aux apprentissages, ces dispositifs concernent les sciences de l'éducation, dans lesquelles les dimensions croisées qui favorisent les acquisitions sont étudiées. C'est le travail qu'a entrepris Julie Mulet, en postdoctorat dans l'équipe après une formation en psychologie cognitive et sciences de l'éducation, sur l'appropriation et l'usage de ces dispositifs dans le

---

17. <https://www.penfriendlabeller.com/>

cadre du projet AccessGraph<sup>18</sup>. Une dimension importante de ses recherches concerne la réduction de la charge cognitive lors de l'utilisation des dispositifs. Nous privilégions de plus en plus systématiquement une approche multisensorielle qui favorise les apprentissages et réduit justement cette charge cognitive (SHAMS et SEITZ A., 2008). Ainsi le support visuel doit être soigné pour que les malvoyants puissent s'appuyer sur leurs résidus visuels et complété d'informations tactiles et sonores congruentes.

**Géomatique :** j'ai brièvement évoqué la simplification automatique de contenu cartographique dans la section 1.3.1. Permettre à un utilisateur non-voyant d'être autonome dans la génération des cartes en relief interactives qu'il souhaite parcourir est une très bonne chose. Pendant le projet AccessiMap, nous cherchions à développer un module d'adaptation automatique de la complexité des plans pour simplifier le travail des adaptateurs en document. L'idée était d'extraire une zone géographique dans Open Street Map<sup>19</sup> et d'appliquer un filtre réglable de simplification des tracés pour effectuer automatiquement une partie du travail d'adaptation. Or il se trouve que cette question est un véritable verrou scientifique. Le problème est bien plus complexe qu'envisagé au départ et la simplification automatique doit intégrer des dizaines de règles et de conventions plus ou moins explicites et parfois difficiles à verbaliser ; les adaptateurs en document effectuant souvent les modifications « à l'œil », ou « parce que c'est plus harmonieux comme ça ». Il est délicat de déterminer algorithmiquement dans toutes les situations quelles vont être les informations qui pourront être supprimées et celle qui sont pertinentes et doivent absolument figurer sur le document final. Nous avons commencé ce travail de formalisation dans le traitement automatique des carrefours au sein du projet ANR ActivMap. Le consortium regroupe des spécialistes de la cartographie algorithmique à l'Institut Géographique National (IGN) et au Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS) et un panel d'utilisateurs de cartes adaptées, d'adaptateurs en documents et de formateurs en locomotion. Le but du projet à terme est de créer des outils en ligne de simplification automatique des carrefours qui permettraient de générer un fichier SVG pour une impression sur papier thermogonflable, un fichier STL pour une éventuelle impression en 3D et une description vocale du carrefour. Même en se limitant aux carrefours, le projet est ambitieux mais en bonne voie de réalisation avec un regroupement des compétences requises.

### La recherche à l'épreuve du réel

Nous sommes dans une courbe exponentielle de progrès technique qui rend possible des réalisations hors d'atteinte il y a seulement quelques années. En informatique, la tentation est grande d'essayer d'appliquer chaque nouvelle technologie qui émerge à la question que l'on étudie. Il faut cependant garder à l'esprit que ces nouveautés ne garantissent en rien le succès des dispositifs développés. S'il est relativement facile de concevoir de nouveaux prototypes de recherche, il est plus difficile de produire des dispositifs utilisables et encore plus compliqué d'en faire des dispositifs *utilisés*. Pour arriver jusqu'à cette étape, il est primordial de trouver un équilibre entre des propositions issues de la recherche et des évolutions proposées par les utilisateurs, et ce de manière itérative. La difficulté est parfois d'arriver à faire passer l'idée, sans brusquer et sans avoir toujours raison, qu'il peut y avoir de bonnes surprises à essayer des choses très différentes.

---

18. <https://cherchonspourvoir.org/le-projet-accessgraph>

19. <https://www.openstreetmap.fr>

Les professionnels de la déficience visuelle sont à la recherche de solutions et tout l'enjeu de la démarche participative est de traduire leur discours en besoins pour ensuite y appliquer des méthodes d'idéation afin de concevoir des systèmes qui couvrent réellement les besoins exprimés. Même si j'ai parfois eu l'impression de toucher là aux limites du développement qui peut être mené dans un cadre de recherche publique, l'espace de collaboration ouvert rend les implications de notre travail concrètes.

À noter que cette association d'un laboratoire de recherche avec un institut spécialisé dans un laboratoire commun est à ma connaissance unique en France. Le recrutement de Grégoire Denis à la fin de sa thèse à l'IJA comme responsable du numérique et des projets innovants a d'ailleurs permis d'établir un contexte très favorable au transfert des dispositifs.

Pour autant, il est parfois bon que le chercheur s'entende dire combien il peut être stigmatisant de se promener dans la rue avec une Kinect sur la tête... Trop souvent, l'aspect esthétique des prototypes de laboratoire est mis au second plan alors qu'il est très important. Les personnes malvoyantes peuvent y être directement sensibles, mais les personnes non-voyantes le sont également, que ce soit par l'exploration tactile ou bien à travers le regard que portent les autres sur le dispositif. L'aspect esthétique des dispositifs est donc important pour l'inclusion sociale et culturelle des personnes qui vont utiliser ces appareils.

### Remarques conclusives et recommandations

Les objectifs des parties prenantes dans les projets que nous menons ne sont pas toujours parfaitement alignés et il a pu être délicat de réconcilier les attentes des uns et les objectifs de recherche des autres. Ces 10 années d'expérience auprès de mon équipe, des professionnels des instituts et des personnes déficientes visuelles me permettent aujourd'hui de résumer quelques principes importants à prendre en compte pour qu'un dispositif de recherche soit réellement *utilisé* :

- l'utilisabilité est fondamentale mais pas suffisante ;
- les dispositifs doivent rester bon marché sans quoi leur adoption par les établissements sera compromise ;
- l'esthétique constitue un critère d'acceptation important qui ne doit pas être négligé, même dans les prototypes de laboratoire si l'on souhaite avoir des sujets motivés ;
- pour que le transfert soit effectif, il faut que les professionnels de la déficience (enseignants spécialisés, éducateurs, formateurs en locomotion) puissent prendre en main eux-mêmes les outils d'édition afin de développer leur propre contenu ;
- la personnalisation des dispositifs, par exemple en ayant le choix des pions, est un facteur significatif dans l'appropriation du dispositif, notamment par les enfants ;
- le niveau de finalisation du dispositif a un impact direct sur sa prise en main par les professionnels et sur le cadre général de collaboration : un professionnel de l'accompagnement ne souhaite pas disposer d'un prototype ou d'une preuve de concept mais veut pouvoir utiliser un produit fini. Ceci vient parfois bousculer la place du chercheur et les objectifs de ses travaux de recherche...

**Tableau synthétique - chapitre 1**

Le tableau suivant récapitule mes contributions présentées dans le chapitre 1 :

	DERi	Puzzle interactif	Tangible Reels	Tangible Box	BotMap
Contributions scientifiques	++	+	++	+	+
Encadrement	8+ M1 / M2	Postdoc S. Giraud	Thèse Julie Ducasse		
Conception / développement	++	++	++	+++	+
Étude d'usages	++	+	++	++	+
Publications	<a href="#">MACÉ et al., 2019</a>	<a href="#">GIRAUD et al., 2017</a>	<a href="#">DUCASSE et al., 2016</a>	<a href="#">MULET et al., 2020</a>	<a href="#">DUCASSE et al., 2018</a>
Diffusion/valorisation	++	+		++	



# Chapitre 2

## Simulation de neuroprothèses visuelles

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Contexte des neuroprothèses</b>	<b>52</b>
<b>2.2</b>	<b>Neuroprothèses visuelles</b>	<b>54</b>
2.2.1	Neuroprothèses corticales	54
2.2.2	Neuroprothèses rétiniennes	55
<b>2.3</b>	<b>Limitations et solutions</b>	<b>57</b>
<b>2.4</b>	<b>Simulation de neuroprothèses visuelles</b>	<b>59</b>
2.4.1	Conception du simulateur	60
2.4.2	Reconnaissance d'objets	62
2.4.3	Détection de visages	64
2.4.4	Détection de texte	67
2.4.5	Navigation dans un environnement virtuel	69
<b>2.5</b>	<b>Discussion</b>	<b>71</b>

---



Ce chapitre rassemble les travaux menés au cours du co-encadrement de 2 thèses.

(1) Celle de Grégoire Denis sur les apports de la vision par machine à l'utilisabilité des neuroprothèses visuelles ([G. DENIS, 2014](#)). Cette thèse avait reçu le soutien de l'axe stratégique « santé et autonomie » de l'IRIT. Elle était co-encadrée par Corinne Mailhes, professeur à l'INP dans l'équipe Signal et Communication (SC) à l'IRIT, spécialisée dans le traitement du signal et a été soutenue en décembre 2014.

(2) Celle de Victor Vergnieux sur l'amélioration de la navigation (dans des environnements virtuels) en vision prothétique simulée ([VERGNIEUX, 2015](#)). Christophe Jouffrais était co-encadrant sur cette thèse. Victor Vergnieux a soutenu en décembre 2015.

Le chapitre précédent concernait des dispositifs interactifs tactiles ou tangibles désormais utilisés de manière courante dans différents instituts pour personnes déficientes visuelles. Ces technologies d'**assistance** permettent d'adapter l'environnement pour réduire le handicap. Dans le présent chapitre, nous abordons des technologies de **suppléance**, grâce auxquelles les capacités sensorielles des personnes déficientes visuelles sont augmentées. Les neuroprothèses visuelles sont des dispositifs « généralistes » ; ils laissent entrevoir à plus ou moins long terme la possibilité d'une restauration de la vision pour des personnes non-voyantes. Aujourd'hui, les implants visuels, même s'ils sont prometteurs, n'ont atteint que des performances limitées et leur diffusion reste confidentielle parmi les personnes non-voyantes malgré plus de 50 ans de recherche et développement dans le domaine. Il faut donc s'inscrire dans une échéance plus lointaine vis-à-vis de ces dispositifs qui ont néanmoins le potentiel pour rendre de grands services en s'appuyant sur les progrès de la micro-électronique et de l'informatique, comme les implants cochléaires ont commencé à le faire pour les personnes malentendantes il y a 30-40 ans.

## 2.1 Contexte des neuroprothèses

Nous avons décrit dans le chapitre précédent des aides techniques destinées à faciliter la compréhension des graphiques et des cartes par les personnes déficientes visuelles. Des aides spécifiques ont été développées pour leur faciliter de nombreuses tâches dans la vie de tous les jours : des aides électroniques à la mobilité ([KAY, 1974](#) ; [FARCY et DAMASCHINI, 2001](#)), à la navigation ([LOOMIS et al., 1994](#) ; [RAN et al., 2004](#)), à la lecture et à la reconnaissance d'objets (cf p. 15 : Orcam, Panda Vision, Seeing AI,...) ou encore d'autres aides plus spécialisées comme les identifiants de billets de banque ou de couleurs.

En parallèle à ces aides spécifiques, des dispositifs ont été développés pour tenter de donner ou de restaurer des capacités visuelles aux personnes non-voyantes. Ces dispositifs s'appuient en général sur une caméra pour capturer la scène visuelle et d'un moyen de stimulation pour restituer ces informations après un transcodage. Quand les informations originellement visuelles sont présentées à un autre système sensoriel (auditif

ou tactile), on parle de **substitution sensorielle**. Quand les informations sont réinjectées dans une partie encore fonctionnelle du système visuel au moyen d'électrodes de stimulation, on parle de **neuroprothèse**.

Les premiers systèmes de substitution sensorielle ont été développés dans les années 1960 par Bach-y-Rita ([BACH-Y-RITA et al., 1969](#)). Dans le TVSS ('Tactile Vision Substitution System', [figure 26-1](#)), la modalité de substitution était somesthésique. Le système consistait en matrices de 20 x 20 picots positionnées sur le dos ou sur le ventre. L'intensité de stimulation via ces actuateurs reproduisait l'intensité lumineuse captée par la caméra. La résolution de sortie de la caméra était ajustée par un rééchantillonnage équivalent au nombre de picots présents dans la matrice de stimulation. Une stimulation électrotactile de la langue au moyen de 49 électrodes a aussi été développée par la même équipe 30 ans plus tard ([BACH-Y-RITA et al., 1998](#), [figure 26-2](#)). Un principe similaire a aussi été utilisé pour transformer des informations visuelles en informations sonores ([MEIJER, 1992](#) ; [ARNO et al., 2001](#)) selon différents schémas de codage pour transcoder les dimensions horizontales, verticales et l'intensité lumineuse de l'image en « coordonnées » dans une « image sonore » d'une certaine durée et en jouant sur la hauteur et l'intensité du son.

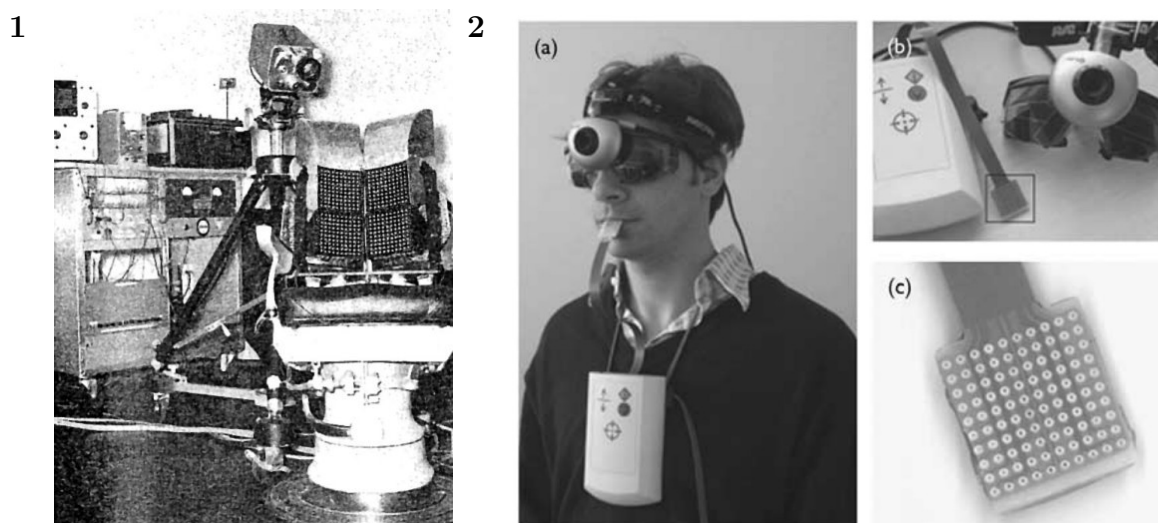


FIGURE 26 – Dispositifs de substitution sensorielle. 1) TVSS : système de substitution sensorielle visuo-tactile ; l'image d'une caméra est transformée en stimulation tactile via une matrice de picots (montée sur une chaise de dentiste !). 2) TDU : dispositif de stimulation électro-tactile de la langue  
 2a) Système complet en fonctionnement 2b) Aperçu des éléments du système 2c) Matrice de stimulation électrotactile de 49 points (7x7). (Tiré de [BACH-Y-RITA et al., 1969, 1998](#))

Ces dispositifs de substitution sensorielle n'ont pas rencontré le succès escompté dans la population non-voyante. Malgré des décennies de développement, leur utilisation reste l'apanage de quelques utilisateurs experts, comme le reconnaissait d'ailleurs Bach-y-Rita ([BACH-Y-RITA, 1983](#)) qui compare leur utilisation à l'apprentissage d'une langue étrangère. Les raisons de leur faible popularité parmi les non-voyants sont multiples, mais à mon sens l'obstacle principal est que la modalité sensorielle cible (tactile ou auditive) n'a pas les caractéristiques adéquates pour traiter un flux de données aussi important que celui généré avec une caméra, même en réduisant drastiquement sa résolution (et une réduction trop importante finit également par la rendre inintelligible). L'autre problème majeur d'utilisabilité de ces dispositifs est qu'ils provoquent rapide-

ment un inconfort (fourmillements/irritations tactiles ou sons désagréables) et qu'ils ont tendance à saturer des canaux sensoriels par ailleurs très utilisés en suppléance de la vision par les personnes déficientes visuelles. Ces dispositifs restent encore étudiés à l'heure actuelle (AUVRAY et al., 2007 ; BUCHS et al., 2021), en particulier pour ce qu'ils révèlent de la plasticité cérébrale et notamment la réattribution de territoires corticaux au traitement d'informations qui ne leur étaient pas destinées de manière ontogénique (MERABET et al., 2009 ; STRIEM-AMIT et al., 2016).

## 2.2 Neuroprothèses visuelles

L'autre manière de restituer des informations visuelles, qu'on pourrait qualifier de restitution sensorielle intra-modale consiste toujours à capter les informations visuelles au moyen d'une caméra en entrée du système, mais à stimuler électriquement le système visuel lui-même dans une partie plus proximale de l'encéphale et encore fonctionnelle. La personne implantée va alors percevoir des phosphènes aux emplacements de stimulation des points lumineux. Les phosphènes sont l'analogie des acouphènes dans le système auditif : ce sont des stimuli visuels que l'on perçoit mais qui ne correspondent pas à une réalité visuelle. Les neuroprothèses visuelles peuvent être interfacées à différents étages du système visuel et des implants ont été développés pour stimuler la rétine (HUMAYUN et al., 1996), le nerf optique (BRELÉN et al., 2005), le relais thalamique (PANETSOS et al., 2011) et le cortex visuel (BRINDLEY et LEWIN, 1968). Nous décrivons par la suite les deux principaux types d'implants, corticaux et rétinien.

### 2.2.1 Neuroprothèses corticales

Les premiers essais de stimulation électrique du système visuel au moyen d'une matrice d'électrodes posée en position occipitale, à la surface du cortex visuel, ont été menés par Brindley et Lewin (BRINDLEY et LEWIN, 1968, figure 27) puis par Dobelle et Mladejovsky (DOBELLE et MLADJEVSKY, 1974) qui ont caractérisé différents paramètres modulant l'apparence des phosphènes (position, intensité, taille de l'électrode, fréquence de décharge). Ces systèmes étaient relativement dangereux parce que les courants impliqués pour faire percevoir des phosphènes étaient proches des seuils de stimulations engendrant des épilepsies (rapporté dans le livre d'un des premiers patients implanté par Dobelle :

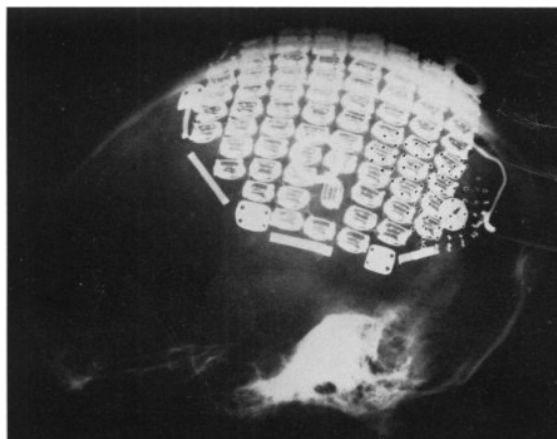


FIGURE 27 – L'implant cortical de Brindley et Lewin comportait 80 électrodes de surface recouvrant une grande partie du cortex occipital (tiré de BRINDLEY et LEWIN, 1968)

NAUMANN, 2012). De plus, ils n'apportaient qu'un bénéfice limité (résolution spatiale très faible) et pour une durée n'excédant pas quelques mois ou quelques années au mieux à cause de la repousse tissulaire ayant tendance à isoler électriquement l'implant. Au début des années 2000, à la suite d'accidents d'implantations corticales effectuées par Dobelle au Portugal pour contourner le durcissement de la réglementation de la FDA sur ces dispositifs, la stimulation directe du cortex visuel par des électrodes de sur-

face a été peu à peu abandonnée. Le décès de Dobbelle en 2004, personnage visionnaire et controversé jouera aussi un rôle dans l'abandon de ces systèmes.

Parallèlement, les courants utilisés ont pu être fortement réduits quand des électrodes de stimulation intracorticales ont commencé à être utilisées en remplacement des électrodes de surface (SCHMIDT *et al.*, 1996). Schmidt montre qu'il est possible de générer des phosphènes avec un courant 10 fois moins intense et que la distance entre électrodes peut être réduite par 5, augmentant d'autant la résolution de l'implant. Un implant comportant 100 électrodes pénétrantes attachées à une puce de silicium est développé à l'université d'Utah à la fin des années 1990 (NORMANN *et al.*, 1999 : 'Utah Array Electrode'). De nombreux autres projets de neuroprothèses corticales voient ensuite le jour entre 2000 et 2015, mais soit les avancées ont été très lentes, soit les fonds ont fini par manquer et la plupart de ces projets n'ont pas abouti.

A l'heure actuelle, il y aurait 4 projets actifs dans le monde (FARNUM *et PELLÉD*, 2020) sur le développement de neuroprothèses visuelles corticales, toutes sans fil. (1) L'implant Orion (60 électrodes) développé par Second Sight, actuellement en phase d'essai clinique<sup>1</sup>. Cet implant doit remplacer à terme l'implant rétinien de cette entreprise (cf section suivante 2.2.2). (2) La neuroprothèse de l'université de l'Illinois développée par un groupe dirigé par Phillip Troyk (TROYK, 2017) dans lequel de nombreux implants de 16 électrodes recouvrent la surface du cortex visuel primaire pour rassembler un total de 1000 électrodes. Les essais cliniques doivent commencer cette année. (3) Le 'Gennaris array' de l'université de Monash en Australie (ROSENFELD *et al.*, 2020), qui est constitué d'un ensemble de 4 implants pour un total de 172 électrodes réparties sur le cortex visuel, actuellement testé sur des animaux. (4) Un implant développé au Texas (BEAUCHAMP *et al.*, 2020) avec 60 électrodes et encore en phase précoce de développement. Les essais cliniques prennent toujours plusieurs années pour ces dispositifs et l'agrément de la mise sur le marché intervient à l'issue de la publication des résultats des essais, s'ils sont positifs.

### 2.2.2 Neuroprothèses rétiniennes

À partir de la fin des années 1990, la miniaturisation aidant, il est devenu possible d'implanter des matrices d'électrodes au contact de la rétine avec leur électronique de commande à la surface de l'œil (Figure 28). Les premiers essais chez l'homme ont été menés en 1996 par Humayun (HUMAYUN *et al.*, 1996). Humayun va ensuite fonder la société Second Sight qui obtiendra à partir de 2011 en Europe et 2013 aux États-Unis une autorisation de mise sur le marché pour l'Argus II, un implant rétinien comportant 60 électrodes (6 x 10 électrodes sous-tendant 11° x 19° de champ visuel). Entre 2013 et 2019, Second Sight aura vendu et implanté environ 350 Argus II dans le monde pour un bénéfice relativement faible pour les patients (selon un rapport de l'INESS<sup>2</sup> (Institut National d'Excellence en Santé et services Sociaux du Québec)). Le dispositif avait d'ailleurs été autorisé par la FDA sous le chapitre 'humanitarian device exemption' et non pour des bénéfices avérés pour les utilisateurs.

Cependant une proportion importante des non-voyants implantés ont rapporté des capacités fonctionnelles restaurées pour localiser des objets de grande taille ou se déplacer sans aide dans un environnement peu connu (HUMAYUN *et al.*, 2012). A l'été

---

1. <https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT03344848>

2. <https://www.inesss.qc.ca>, rechercher "Implant ARGUS"

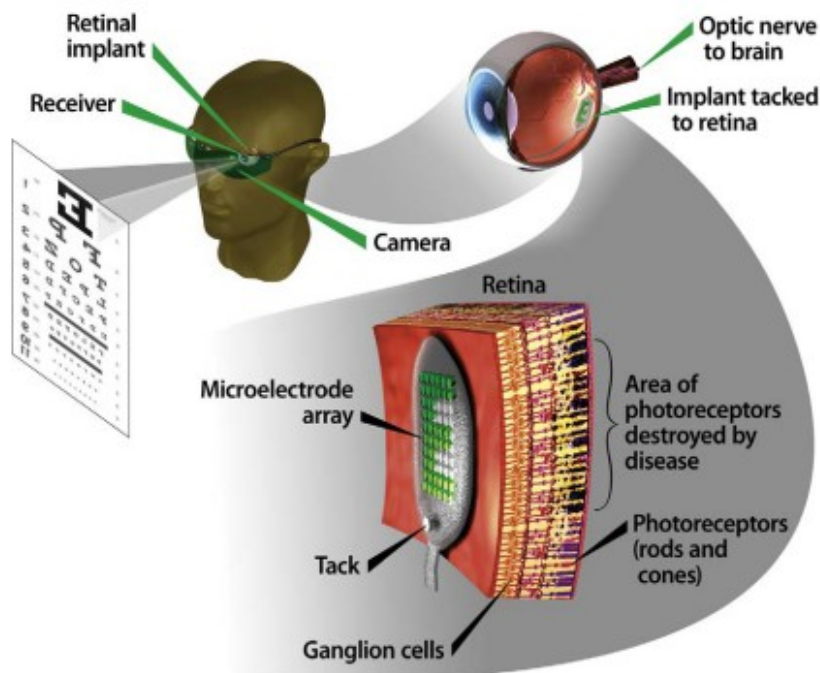


FIGURE 28 – Illustration du fonctionnement d'un implant rétinien. La matrice d'électrodes est attachée à la rétine à l'intérieur de l'œil. La scène visuelle est capturée par une caméra fixée sur des lunettes. Les commandes de stimulation et l'énergie électrique sont transmises par induction à un boîtier électronique attaché à l'extérieur du globe oculaire (non représenté) et relié à l'implant. (tiré de [CHADER et al., 2009](#))

2019, Second Sight a mis fin aux implantations de l'Argus II pour se concentrer sur Orion, son implant cortical (cf section précédente 2.2.1). L'entreprise a indiqué qu'elle souhaite se tourner vers un marché plus large. En effet l'une des plus importantes limitations des implants rétiniens est qu'ils ne peuvent fonctionner que si toute la chaîne de traitement visuel est conservée à partir des cellules ganglionnaires dont les axones se regroupent pour former le nerf optique. Pour une pathologie touchant la conduction du signal, comme par exemple l'hypoplasie du nerf optique, assez fréquente congénitalement dans les pays à haut revenus, un implant rétinien ne peut pas restaurer la vision. En comparaison, les implants corticaux ne sont pas affectés par les pathologies des voies visuelles, mais en l'absence d'entrées visuelles, les réorganisations tissulaires peuvent en revanche être plus importantes dans le cortex que dans la rétine.

C'est également à l'été 2019 après de nombreuses années de développement et un début de commercialisation en Europe que l'entreprise allemande Retina AG a cessé la distribution de ses implants Alpha IMS & Alpha AMS, probablement par manque de fonds. Les deux implants de Retina AG comportaient environ 1500 photodiodes placées sous la rétine et alimentées en énergie par une antenne placée derrière l'oreille. L'implant était cependant affecté d'une diaphonie importante entre canaux et la restauration fonctionnelle avec 1500 microélectrodes n'était pas sensiblement supérieure à celle apportée par les 60 électrodes de l'Argus II. La longévité de l'implant était également problématique avec une durée moyenne de fonctionnement comprise entre 6 mois et 3 ans selon l'implant ([DASCHNER et al., 2017](#)).

Pixium Vision, une 'start-up' émanant de l'institut de la vision à Paris était la troisième et dernière société dans le monde à disposer d'une autorisation de mise sur le marché pour son implant IRIS-II de 150 électrodes placées à la surface de la rétine. Les implantations de cette neuroprothèse ont cependant été suspendues en 2017 un an après avoir démarré, notamment pour des problèmes de fiabilité. L'entreprise se concentre maintenant sur un autre type d'implant rétinien (Prima) qu'elle développe en partenariat avec l'université de Stanford et le groupe de Daniel Palanker ([PALANKER et al., 2020](#)). L'implant est composé de photodiodes éclairées par un projecteur infrarouge fixé sur des lunettes et tourné vers la rétine. Les premiers essais cliniques sont prometteurs selon une communication de l'entreprise datée d'octobre 2021.

Enfin, une entreprise israélienne, NanoRetina<sup>3</sup> développe un implant rétinien avec des centaines d'électrodes en silicium recouvertes d'un substrat améliorant le contact entre les neurones et l'implant. Les essais cliniques viennent de débiter et les résultats préliminaires ne sont pas disponibles. Les premiers patients ont cependant rapporté avoir eu des perceptions lumineuses lorsque l'implant est activé.

Au vu des avancées des différents projets, il est difficile de prédire quels seront les implants qui auront le plus de succès entre les neuroprothèses rétiniennes et corticales. Il y a eu plusieurs mouvements de va-et-vient et la tendance actuelle est de revenir vers des implants corticaux qui permettent de traiter un plus large spectre de pathologies (la production de phosphènes reste possible malgré des voies visuelles non fonctionnelles). Les contraintes sur la miniaturisation et la fiabilité mécanique sont exacerbées dans l'œil tandis que le cortex visuel laisse plus de place pour intervenir et est soumis à des accélérations bien moins fortes. Toutefois les deux types d'implants ont des limitations similaires quant au nombre de phosphènes qu'il est possible de générer et ils sont soumis aux mêmes problèmes d'utilisabilité, discutés dans la section suivante.

## 2.3 Limitations et solutions

Tous les implants précédemment cités, quel que soit leur type, sont affectés de sévères limitations fonctionnelles et pratiques. L'utilisation des implants est en général fatigante pour le cerveau ou les yeux et les patients n'allument leurs implants que quelques heures par jour au mieux. Parce que la résolution effective des implants est très basse, la récupération fonctionnelle qu'ils procurent est toujours très limitée. Les utilisateurs les plus à l'aise avec l'implant Argus II peuvent lire au bout de plusieurs secondes des lettres présentées une à une en noir et blanc et en grande taille sur un écran. Des tâches plus écologiques de reconnaissance d'objets dans des conditions moins contrôlées qu'en laboratoire (du tri de chaussettes!) s'avèrent très compliquées ([STRONKS et DAGNELIE, 2014](#)). La variabilité dans l'illumination, les ombrages, le contraste, la taille, l'orientation et la position des objets rendent les informations visuelles reçues par les personnes implantées insuffisamment diagnostiques pour leur permettre d'identifier les éléments visuels de manière efficace.

En 2009, des auteurs de premier plan de la communauté des neuroprothèses ont publié des projections sur le nombre d'électrodes que contiendraient les implants à différentes dates dans le futur ([CHADER et al., 2009](#)). Au moment de la rédaction de l'article en 2009, l'implant le plus avancé était l'Argus II avec 60 électrodes. La projection prévoyait un passage à 200 électrodes en 2011 et plus de 1000 électrodes en 2014

---

3. <https://www.nano-retina.com/>

(Figure 29). Douze ans plus tard, en 2021, plus aucun implant n'est disponible sur le marché et l'implant avec le plus grand nombre d'électrodes indépendantes à avoir jamais été implanté en avait 150 (IRIS-II de Pixium Vision). Ce nombre d'électrodes n'est pas anecdotique ; nous verrons dans la section suivante (section 2.4) qu'il conditionne directement la récupération fonctionnelle que l'on peut attendre d'un implant.

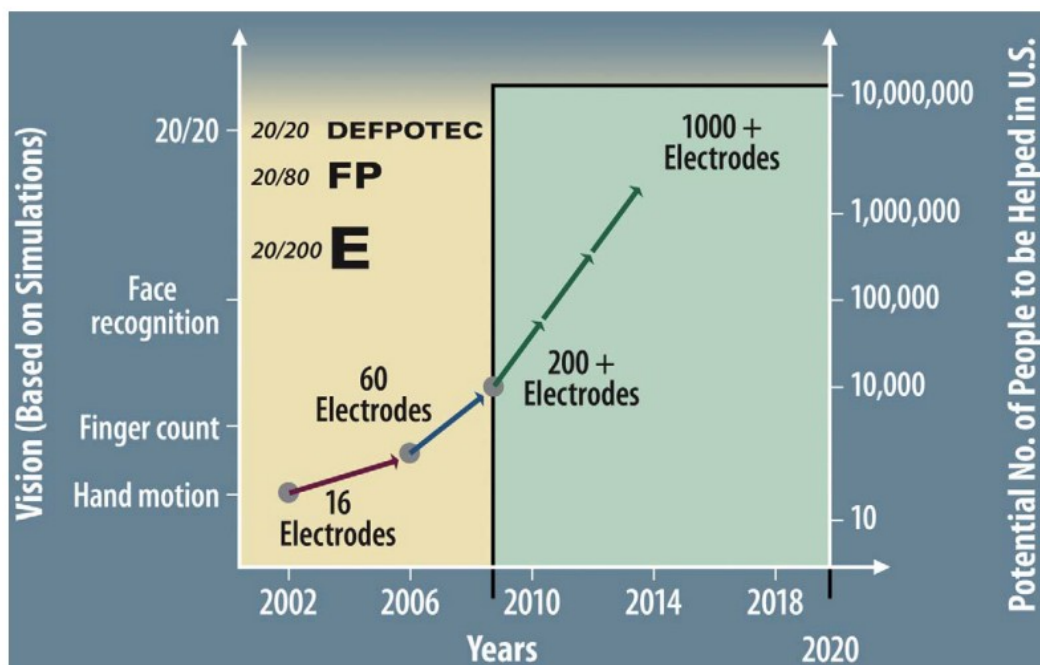


FIGURE 29 – Le graphique présente une projection du nombre d'électrodes attendu dans les implants à venir. Sur le graphique, le nombre d'électrodes pressenties, l'axe de gauche indique les capacités fonctionnelles restaurées et l'axe de droite la population américaine concernée par ces implants (plus les implants sont performants et plus les indications thérapeutiques sont larges). (tiré de CHADER et al., 2009)

De nombreuses raisons expliquent pourquoi l'augmentation du nombre d'électrodes est si difficile à réaliser. Quand il s'agit d'un implant oculaire, la structure est très petite et il est difficile de miniaturiser suffisamment les fils et les autres éléments de l'implant pour augmenter le nombre d'électrodes. Un multiplexage permet de résoudre en partie ce problème, mais l'électronique embarquée sur l'œil ne doit pas le faire chauffer au-delà du seuil d'inconfort, ce qui pose un grand défi du point de vue de l'efficacité énergétique. Une autre difficulté qui se pose à la fois pour les implants rétiniens et corticaux concerne la finesse de l'interfaçage avec les neurones. Moins cette connexion est intime et plus l'impédance est élevée, ce qui nécessite des courants plus élevés et augmente donc la diaphonie entre les canaux. De grands progrès sont à opérer sur ces interfaces électrodes/neurones. Nous avons d'ailleurs travaillé sur ces questions avec un groupe du LAAS spécialisé dans les nanosciences. L'idée était de nanostructurer avec un polymère conducteur des électrodes souples et de vérifier si un meilleur interfaçage avec les neurones pouvait alors se produire pour réduire l'impédance mesurée. Des enregistrements chez le rat ont montré que ces électrodes permettent de gagner **de 2 à 3 ordres de grandeur** en favorisant la repousse axonale et le contact intime avec l'électrode (CASTAGNOLA et al., 2015 ; SAUNIER et al., 2020).

La résolution des implants n'est pas le seul problème qui limite la restauration de la perception visuelle. Les tâches de localisation d'objets, parce que la caméra est

attachée à la tête et non à l'œil comme l'est notre capteur naturel (la rétine) sont rendues très difficiles. L'utilisateur doit apprendre à garder alignée la caméra sur ses lunettes avec ses yeux (en disposant d'un retour visuel très parcellaire pour fermer cette boucle sensori-motrice), sans quoi la localisation de l'objet deviendrait tout de suite erronée. Par exemple, si les yeux sont dirigés vers la droite alors que la caméra est pointée en face, une stimulation électrique pour figurer un objet bien contrasté et droit devant sera perçue comme étant sur la droite puisque c'est le centre de la rétine qui sera stimulé et que les yeux sont dans cette direction. Ce décalage de repère rend parfois très compliquée la localisation des stimuli visuels pour les personnes implantées.

D'autres difficultés émergent avec la baisse de sensibilité à la stimulation électrique du tissu nerveux dans le temps (particulièrement dans le cortex, avec des phénomènes d'encapsulation gliale et astrocytaire (KOZAI et al., 2015)) et l'arrêt du fonctionnement de certaines électrodes (oxydation, coupure d'un conducteur, ...). La dynamique temporelle des phosphènes peut aussi être beaucoup plus lente que la vision normale et limiter la perception des objets en déplacement (PÉREZ FORNOS et al., 2012). Avec le recul, on s'aperçoit que les enjeux sur les implants actuels relèvent plus du domaine biomédical que de la pleine restauration fonctionnelle ou de l'augmentation de la qualité de vie des personnes implantées. Ces paramètres biomédicaux concernent par exemple le vieillissement des matériaux, la durée de vie des implants ou la biocompatibilité à long terme. Au-delà de ces aspects, des recherches fondamentales sur la psychophysique des implants sont également nécessaires pour déterminer comment faire émerger des percepts cohérents grâce à des stimulations successives ou répétées dans le cortex ou la rétine. Les implants actuels permettent aussi d'approfondir les connaissances sur la réorganisation des différents étages du système visuel en fonction de la pathologie considérée et de la durée écoulée sans entrées visuelles. La dégénérescence des tissus ou leur dé-afférentation ont un impact important sur les performances de restauration fonctionnelle des implants et doivent être prises en compte pour les recommandations d'implantation.

## 2.4 Simulation de neuroprothèses visuelles

La simulation de vision prothétique (en anglais SPV pour 'Simulated Prosthetic Vision') permet de reproduire chez une personne voyante au moyen d'un casque de réalité virtuelle les sensations visuelles perçues par une personne ayant un implant visuel. Bien qu'ils ne modélisent pas parfaitement le rendu des neuroprothèses visuelles, ces simulateurs sont un premier support pour l'évaluation de l'utilisabilité des implants. L'utilisation de SPV permet d'investiguer différentes questions de recherche avec une grande souplesse : il est possible par exemple de faire varier librement le nombre de phosphènes ou la taille du champ de vision restitué, et de mesurer les performances obtenues dans des tâches nécessitant différents niveaux d'acuité visuelle. On peut également concevoir et évaluer de nouvelles formes de rendu à partir de techniques de traitement d'images. Ces évaluations sont bien plus économiques que celles réalisées directement avec des personnes implantées qui sont peu nombreuses et difficiles d'accès parce que souvent incluses dans des protocoles cliniques dans lesquels des tests supplémentaires ne sont pas autorisés.

Les premiers simulateurs ont vu le jour au début des années 1990 : Cha et ses collègues ont utilisé des grilles avec 100 (10x10) à 1024 (32x32) perforations placées devant un écran pour analyser le nombre de phosphènes requis pour atteindre des performances



fonctionnelles proches de la normale (CHA, K. W. HORCH et NORMANN, 1992), pour lire (CHA, K. W. HORCH, NORMANN et BOMAN, 1992) ou encore pour se déplacer dans un environnement inconnu (CHA, K. HORCH et al., 1992). Ils ont montré que 625 phosphènes (25x25) répartis sur un champ visuel de  $1,7^\circ$  fournissait une vision tunnel permettant de lire à la moitié de la vitesse normale et que ce même nombre de phosphènes, répartis sur  $30^\circ$  d'angle visuel était suffisant pour rétablir une vitesse de locomotion normale dans un environnement contenant des obstacles. Depuis, de nombreuses équipes ont développé et utilisent des simulateurs dans des contextes variés. En plus des tâches citées précédemment, les SPV ont permis de déterminer le nombre minimal de phosphènes requis pour reconnaissance des objets (entre 300 et 1000 selon les conditions), des visages (quelques centaines pour la détection, autour de 1000 pour l'identification), ou encore pour rétablir la coordination œil-main (plusieurs centaines) (pour une revue, voir BARRY et DAGNELIE, 2011).

### 2.4.1 Conception du simulateur

Le projet que j'ai présenté au CNRS pour mon recrutement portait précisément sur les SPV, avec déjà l'idée d'utiliser la vision par machine et de l'interfacer avec une neuroprothèse simulée pour évaluer la restauration fonctionnelle qu'il serait possible d'atteindre en gardant comme contrainte un nombre d'électrodes très réduit. J'ai démarré ces travaux sur la SPV en postdoctorat à l'IRIT, notamment en encadrant des stagiaires de M2, puis après mon intégration au CNRS en recrutant Grégoire Denis en thèse (2012-2015, G. DENIS, 2014) sur une bourse fléchée vers l'axe stratégique Santé et Autonomie de l'IRIT.

Mon approche se distinguait principalement par 3 caractéristiques :

1. Un SPV réaliste prenant en compte de nombreux paramètres de stimulation
2. L'utilisation de vision par machine pour simplifier la tâche visuelle
3. Des tests en conditions plus écologiques que pour la plupart des SPV

#### 2.4.1.1 Précision de la simulation (1)

Avec Grégoire Denis, nous nous sommes attachés à concevoir et développer un modèle de neuroprothèse au cœur du simulateur de vision prothétique le plus précis possible. Pour rendre le modèle d'affichage des phosphènes réaliste, nous avons établi une liste des facteurs physiques et physiologiques impactant l'apparence des phosphènes et intégré les connaissances publiées sur la phénoménologie des phosphènes, rapportée par les premiers patients ayant reçu un implant visuel (HUMAYUN et al., 2012). Ainsi le simulateur que nous avons conçu et développé prenait en compte :

- Le nombre et la position des électrodes
- La taille apparente des phosphènes
- La forme des phosphènes
- Le flou gaussien sur l'apparence des phosphènes
- La fraction d'électrodes non-fonctionnelle
- Le « bruit » spatial sur la position des phosphènes
- Le facteur d'agrandissement (pour corriger la taille apparente des phosphènes en fonction de l'excentricité dans le cas d'un implant cortical)
- Le nombre de niveaux de luminance perceptible
- L'asservissement à la position des yeux pour maintenir la stimulation visuelle à un emplacement précis de la rétine

- La modélisation de l’adaptation à la stimulation électrique (« rafraîchissement » des phosphènes affichés au bout d’une certaine durée, pour contrer l’adaptation rapide des cellules ganglionnaires/neurones corticaux)

La prise en compte de l’ensemble de ces facteurs dans notre simulation de neuroprothèse la rendait bien plus réaliste que celles publiées dans la littérature entre 2000 et 2015. Cet important travail sur la plausibilité biologique des informations affichées par le simulateur nous a permis d’être confiants dans la fiabilité des mesures de performances atteignables avec une neuroprothèse visuelle en fonction du nombre de phosphènes affichés.

### 2.4.1.2 Utilisation de la vision par machine (2)

Une deuxième originalité de notre approche repose sur notre réflexion autour de l’utilisabilité des neuroprothèses visuelles en fonction du nombre d’électrodes et de la quantité d’informations affichées. L’approche classique pour les implants actuels consiste à redimensionner l’image de la caméra pour la faire correspondre à la taille de la matrice d’électrodes, puis à activer les électrodes de l’implant en fonction de la luminance des pixels dans cette image basse résolution. Cette approche est qualifiée de **’scoreboard’**, en référence au tableau d’affichage des stades. Quelques exemples de rendus scoreboard avec 3 tailles de matrices d’électrodes sont présentés en [figure 30](#). L’utilisateur doit essayer de donner du sens à cette image basse résolution, ce qui est difficile quand le nombre d’électrodes est faible ou que la scène visuelle est complexe.

Pour simplifier la tâche visuelle, et permettre à des personnes non-voyantes implantées d’utiliser dès maintenant les implants disponibles malgré leur résolution limitée, nous proposons une approche dans laquelle des traitements de haut niveau sont opérés sur l’image (reconnaissance et localisation d’objets / de murs) avant que celle-ci ne soit présentée à l’utilisateur. Dans cette **approche par reconnaissance et localisation**, seules les informations pertinentes pour la réalisation de la tâche en cours sont affichées. Ainsi, pour une tâche de saisie d’objet par exemple, seuls les phosphènes correspondant à la position actuelle de cet objet dans le champ visuel sont illuminés. Une alternative, intermédiaire entre les deux représentations peut être qualifiée de **’scoreboard augmenté’** et consiste à afficher l’image scoreboard classique en y ajoutant des informations supplémentaires grâce à un niveau de luminance des phosphènes dédié (le niveau le plus clair par exemple) ou à un clignotement particulier.

Dans les expériences de SPV que nous avons réalisées, nous avons utilisé le système de reconnaissance d’objets de la société Spikenet technology que nous utilisons également dans le projet NAVIG. L’algorithme de vision artificielle de cette société est bio-inspiré avec un réseau multi-couches, principalement **’feed-forward’**, composé de neurones impulsionnels asynchrones. Une architecture d’ailleurs dérivée des résultats obtenus au CerCo sur la catégorisation visuelles rapide ([section 0.2](#)). L’avantage de ce réseau de neurones était qu’il était très rapide malgré une puissance de calcul limitée à l’époque. Aujourd’hui, 10 ans plus tard, les algorithmes de vision par machine permettant des traitements de haut-niveau, en temps réel, et avec une plus grande fiabilité seraient intégrables dans la plupart des boîtiers embarqués des implants ([LANE et al., 2017](#)).

### 2.4.1.3 Évaluations en conditions écologiques (3)

Toutes les expériences de SPV que nous avons réalisées ont consisté à comparer l'approche classique en mode scoreboard avec l'approche par reconnaissance et localisation que nous proposons, dans laquelle un module de vision par machine est utilisé pour traiter l'image de la caméra et fournir une information de plus haut niveau à l'utilisateur. Des efforts importants ont été apportés à la pertinence écologique des tâches réalisées. Je présente ci-dessous 3 expériences réalisées avec Grégoire Denis. La première était une tâche de saisie d'objets disposés sur une table, dans des conditions contrôlées mais proches de la réalité. Dans la deuxième expérience, les sujets devaient détecter la présence de visages dans la même pièce qu'eux (les « cibles » étaient des personnes se tenant debout à différentes distances et positions). Dans la troisième, il s'agissait de détecter des blocs de texte avec des lettres de différentes tailles. Cette situation était moins fidèle à la réalité parce que le texte était présenté sur un écran, mais le fait d'utiliser des images naturelles (photographies) de panneaux rapprochait des conditions réelles. Ce protocole permettait de mieux maîtriser la taille apparente du texte qu'avec un sujet libre de ses mouvements.

Je présente également ici deux expériences effectuées avec Victor Vergnieux sur la navigation en SPV dans un labyrinthe virtuel dans lequel différents rendus prothétiques permettaient de représenter l'environnement de manière simplifiée, toujours comparé à l'approche scoreboard. En plus des performances de navigation, les connaissances spatiales des sujets sur l'environnement virtuel étaient évaluées. Dans toutes ces expériences, les sujets portaient un casque de réalité virtuelle surmonté d'une caméra pour capturer la scène visuelle (il s'agissait d'une caméra virtuelle dans l'environnement virtuel, asservie aux mouvements de la tête de l'utilisateur par un système de capture de mouvements). Le contenu de ces expériences est détaillé dans les sections suivantes.

## 2.4.2 Reconnaissance d'objets

Dans cette première expérience, il s'agissait donc pour les 14 sujets voyants équipés d'un casque de réalité virtuelle d'effectuer une tâche de saisie d'objets disposés sur une table ([Figure 31A&B](#)). Avant le début de l'essai, l'objet à atteindre était indiqué à l'écran. Les objets étaient déplacés à chaque essai pour éviter les effets d'apprentissage. L'affichage dans le casque pouvait prendre 4 conditions. 3 conditions scoreboard ([Figure 30](#), colonnes 2-4) avec des tailles de matrices différentes : SC1, 6x10 -> 60 électrodes (Argus II); SC2, 15x18 -> 270 électrodes (taille pressentie à l'époque pour l'Argus III); SC3, 32x38 -> 1216 électrodes (implant utilisé pour permettre des performances élevées en scoreboard). La 4ème condition (LOC) était celle dans laquelle un module de vision par machine détecte sur l'image de la caméra l'objet recherché et n'affiche que le ou les phosphènes correspondant à son emplacement (approche par localisation : [figure 31D](#)). Pour cette 4ème condition, seule la taille de matrice la plus petite, 6x10 électrodes était utilisée.

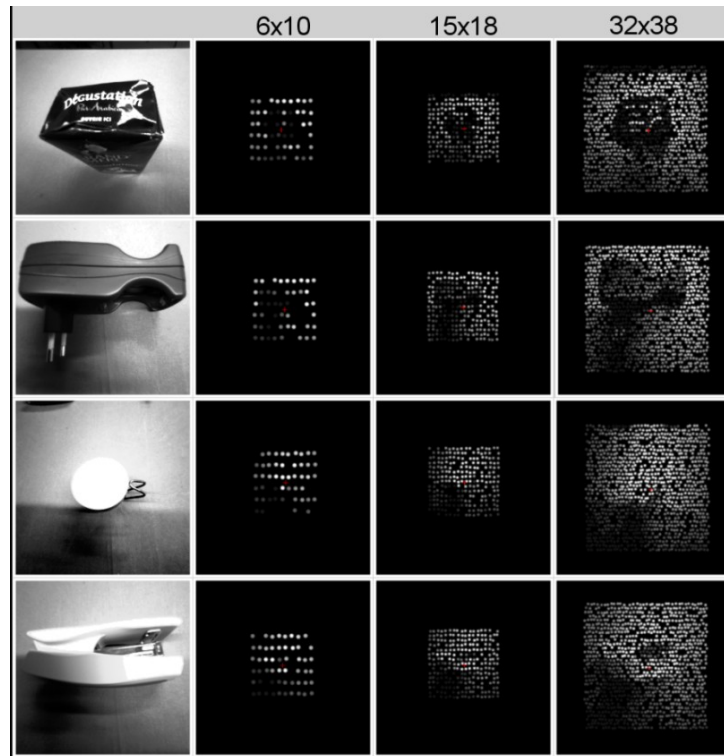


FIGURE 30 – Vision prothétique simulée pour un rendu s'appuyant sur l'approche scoreboard. 4 objets sont représentés pour 3 tailles de matrices, 6x10, 15x18 et 32x38 électrodes

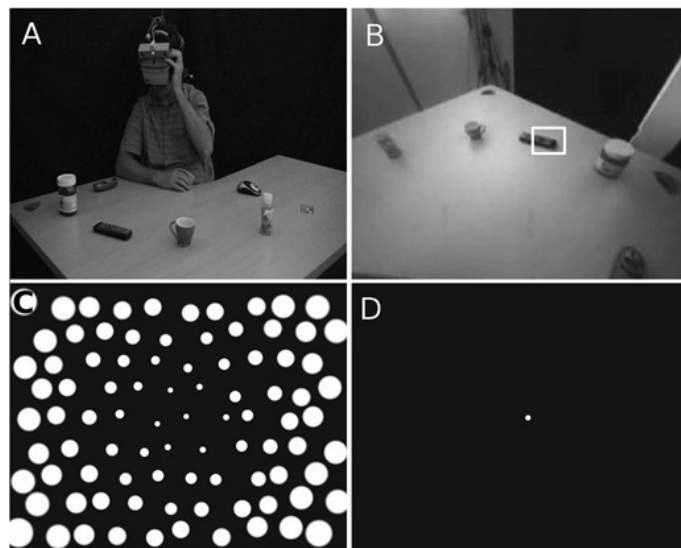


FIGURE 31 – Tâche de saisie d'objets dans l'approche par localisation. A) Le sujet est en train de parcourir l'environnement à la recherche du téléphone. B) Un algorithme de vision artificielle repère le téléphone dans l'image de la caméra. C) Vue d'ensemble des phosphènes qu'il est possible d'allumer avec l'exemple d'un implant à 100 électrodes. D) L'unique phosphène qui s'allume dans la condition par localisation dans le casque de réalité virtuelle indique la position du téléphone dans le champ de vision du sujet

Nous souhaitons répondre à deux questions dans cette première expérience de reconnaissance et de localisation d'objets réels :

- Question 1 : L'approche par localisation nous permet-elle d'atteindre un objet avec un implant rétinien basse résolution ?
- Question 2 : Pour atteindre et toucher un objet, quelle est la résolution de matrice minimum requise dans une approche scoreboard, pour que les performances obtenues par les sujets soient comparables à celles obtenues dans l'approche par localisation ?

## Résultats

Avec l'approche scoreboard, le taux de réussite est de 16 % (+/- 3,9 %) pour la matrice simulée la plus petite et atteint 72 % (+/- 10,8 %) (Figure 32). Avec l'approche par localisation, il atteint 81 % correct (+/- 9,4 %). Le temps pour aller toucher l'objet correct est 5 secondes plus court (17 vs. 22 sec.) pour la condition localisation par rapport à la condition SC3, celle avec la plus grande taille d'implant.

Nos résultats indiquent que le rendu visuel basé sur l'approche par localisation permet d'atteindre de petits objets du quotidien malgré une résolution de matrice très limitée. 60 électrodes sont en effet suffisantes pour obtenir une performance très satisfaisante : plus de 80 % de réussite en moyenne, avec un temps moyen pour atteindre les objets compris entre 15 et 20 secondes. Grâce à cette reconnaissance de haut niveau effectuée dans l'approche par localisation, la performance pour réaliser une tâche de saisie d'objet devient pratiquement indépendante du nombre de phosphènes, et donc du nombre d'électrodes qu'il est nécessaire d'implanter. Cela signifie que les implants actuels, en adoptant ce fonctionnement par localisation, apporteraient un gain fonctionnel aux personnes implantées malgré leur nombre d'électrodes très restreint. **Ces résultats ont fait l'objet d'une publication à la conférence ICNPD ('International Conference on Neuroprosthetic Devices'), (M. DENIS, 2012) et dans la revue 'Artificial organs' (MACÉ et al., 2015).**

### 2.4.3 Détection de visages

La détection et l'identification de visages sont des fonctions visuelles complexes que nous utilisons tous les jours. Nous sommes capables de savoir très rapidement si des visages ou des personnes sont dans notre champ de vision et à quel emplacement. Une fois cette détection effectuée, des mécanismes plus fins sont mis en jeu pour procéder à l'identification des visages en mobilisant nos connaissances et nos expériences

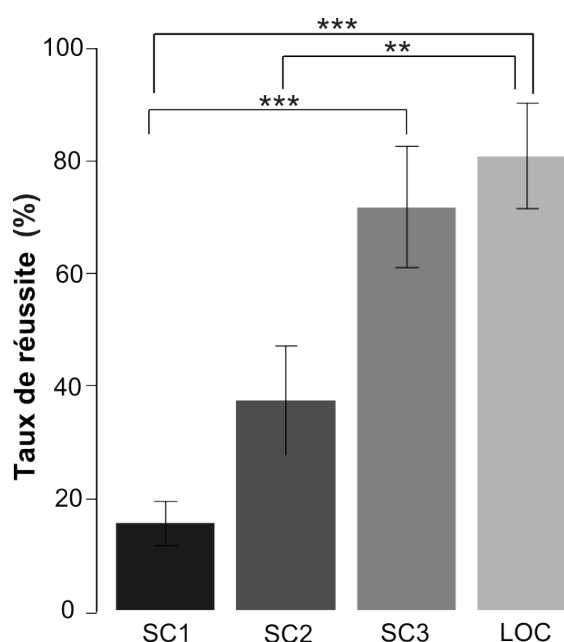


FIGURE 32 – Moyenne du taux de réussite pour les 4 conditions de restitution. SC1, SC2 et SC3 : matrice de 6x10, 15x18 et 32x38 en approche scoreboard. LOC : matrice de 6x10 en approche par localisation. \*\*p<0,01, \*\*\*p<0,001

passées afin d'accéder aux informations sémantiques et lexicales sur ces visages. Ces fonctions sont essentielles à notre vie sociale et font partie de celles que les personnes non-voyantes souhaiteraient pouvoir effectuer grâce à une neuroprothèse visuelle. Avec la résolution des implants actuels et leur rendu basé sur une approche scoreboard, aucune neuroprothèse visuelle ne permet de détecter à distance une personne. L'étude suivante en simulation de vision prothétique avec une approche par localisation cherche à déterminer les paramètres nécessaires à la réalisation de cette tâche.

Dans cette pré-étude sur 4 sujets, deux conditions de l'approche par localisation étaient comparées, toutes deux avec une matrice de 6x10 électrodes. Avec une telle résolution, la détection d'un visage situé à plusieurs mètres est impossible avec un affichage scoreboard classique et cette condition n'a pas été incluse. La première condition, à l'instar de l'expérience précédente sur la saisie d'objets, affichait uniquement le ou les phosphènes correspondant à l'emplacement du ou des visages détectés. La seconde condition combinait l'approche scoreboard et l'approche par localisation, ce que nous avons qualifié de scoreboard augmenté. Le principe est illustré sur la [figure 33](#). L'architecture complète du système est représentée en [figure 34](#). Le sujet se trouvait debout au milieu d'une pièce. Il devait à chaque essai indiquer s'il avait détecté ou non un visage et éventuellement pointer du doigt dans leur(s) direction(s) (0, 1 ou 2 visages présents à chaque essai). Les visages à détecter se trouvaient à 1,5 ou 2,5 mètres selon 7 azimuts différents. Un système de capture de mouvement permettait de mesurer la précision du pointage des sujets.

Cette expérience devait permettre de répondre aux questions suivantes :

- Question 1 : l'approche scoreboard augmenté que nous proposons permet-elle de réaliser une tâche de localisation de visages efficacement en simulant un implant basse résolution ?
- Question 2 : la performance est-elle impactée en scoreboard augmenté, comparée à l'approche par localisation (dans laquelle moins d'informations sont présentes) ?

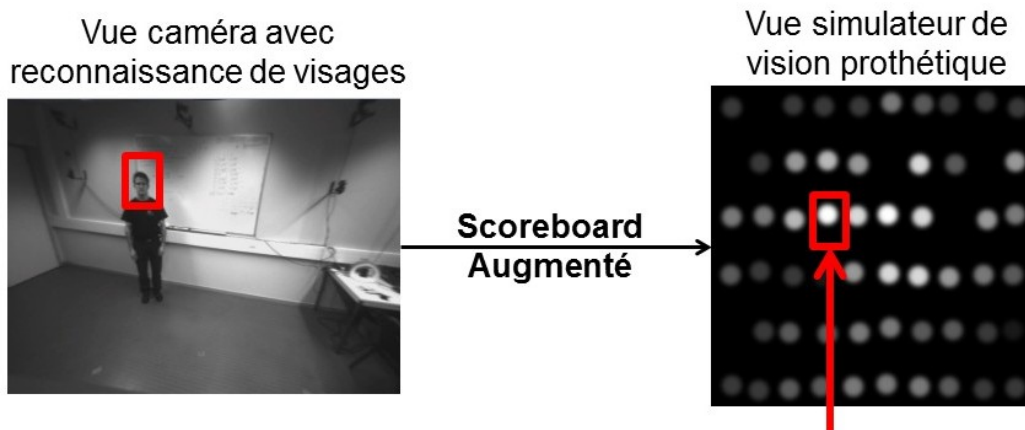


FIGURE 33 – Scoreboard augmenté : lorsqu'un visage est détecté et localisé (gauche), un phosphène clignotant (flèche rouge) indique sa position dans le champ visuel du sujet, en surimpression de la vue scoreboard

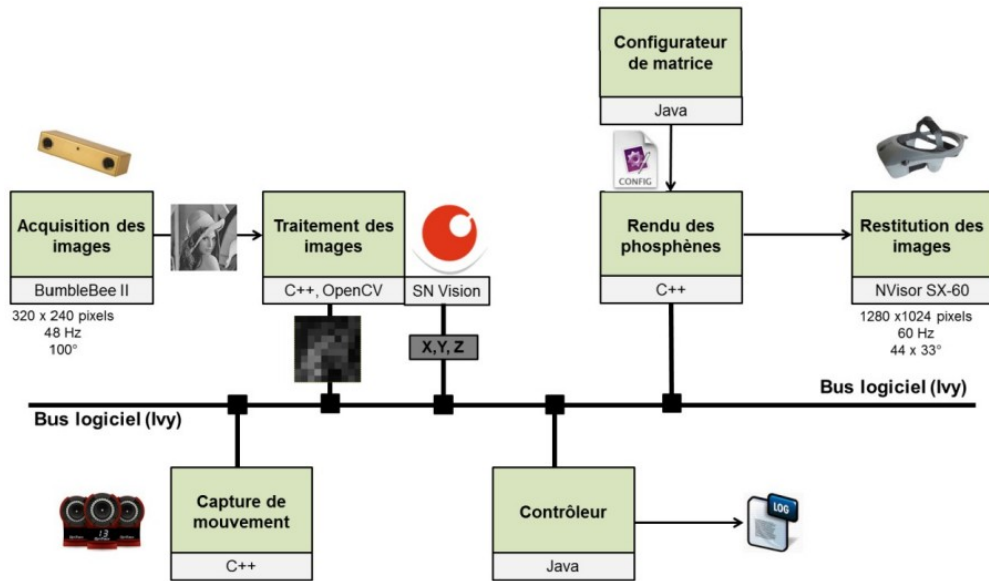


FIGURE 34 – Architecture du simulateur de vision prothétique pour la tâche de détection de visage. La capture de mouvement est utilisée pour déterminer la direction du ou des visages à détecter et la direction de pointage par le sujet (Tiré de G. DENIS, 2014)

## Résultats

En condition scoreboard augmenté, le taux de réussite dans la tâche était très élevé puisque le pourcentage de réponses correctes était en moyenne de 95 %. (Figure 35). La précision n'était pas significativement différente entre les conditions Localisation et Scoreboard augmenté. Le temps de réponse était en moyenne de 20 secondes et l'erreur de pointage était similaire dans les 2 conditions, autour de 13 % (+/- 3,9 %).

Avec les neuroprothèses actuelles, il n'est pas envisageable d'identifier un visage : en effet, les études en simulation de vision prothétique montrent que plusieurs centaines de phosphènes distincts sont nécessaires pour effectuer cette tâche. Or, les solutions existantes n'en génèrent tout au plus que quelques dizaines. Avec un rendu scoreboard, nous affirmons qu'il n'est pas

non plus possible aujourd'hui de détecter et localiser un visage se trouvant à plus d'un mètre. Les résultats de l'expérience montrent en revanche qu'il est possible de détecter et de localiser des visages dans l'environnement avec un implant de très basse résolution (6x10 électrodes) dès lors que les visages sont détectés par un algorithme de vision artificielle et que l'information est affichée par l'implant sous une forme plus intelligible. Les deux conditions testées ne présentaient pas de différences statistiquement significatives quant à la précision des réponses et du pointage, ce qui montre que les

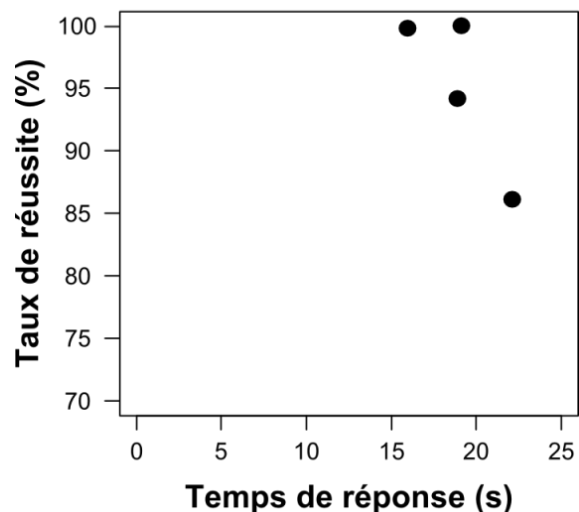


FIGURE 35 – Taux de réussite vs. temps de réponse pour les 4 sujets pilotes dans la condition scoreboard augmenté

informations supplémentaires affichées dans la condition scoreboard augmenté n'ont pas interféré avec la tâche principale. Or ces informations scoreboard fournissent au sujet des informations de contexte dont il est potentiellement utile de disposer dans certains environnements. **Ces résultats ont fait l'objet d'une publication à la conférence CHI, dans la section 'Work in progress' (G. DENIS et al., 2013).**

### 2.4.4 Détection de texte

Dans notre quotidien, l'information écrite est omniprésente. Elle sert à nous renseigner, nous guider, nous avertir ; au sens large, transmettre de l'information. Dans une ville, on retrouve cette information écrite sous différentes formes : des panneaux signalétiques, des panneaux d'information, des enseignes de magasin, des noms de rues, des numéros de bus, etc. Dans des lieux comme les aéroports, les gares ou les stations de métros, les panneaux nous permettent d'obtenir rapidement l'information nécessaire pour naviguer entre différents lieux (un quai de gare, un terminal d'embarquement, des toilettes, etc.). Dans des bâtiments, l'information écrite peut nous aider à trouver les ascenseurs, les escaliers, un service, un bureau particulier ou la sortie ! Toutes ces informations écrites à des emplacements très variés et sur des supports divers sont pour leur grande majorité totalement inaccessibles pour les personnes non-voyantes. Comme précédemment pour la détection de visages, la détection de texte en temps réel dans l'environnement est aussi une attente forte des personnes non-voyantes. S'il existe des applications d'OCR maintenant facilement accessibles avec un smartphone, cela suppose que la personne sache déjà précisément où pointer la caméra de son appareil photo. En général, ces applications sont donc utilisées pour lire des documents écrits posés sur une table ou des affiches desquelles il est possible de s'approcher. La détection de texte dans l'environnement, et d'autant plus dans des situations de mobilité, représente donc un réel enjeu.

Dans cette expérience, nous évaluons un rendu visuel basé sur l'approche « scoreboard augmenté » dans une tâche de localisation de texte (Figure 36). Nous souhaitons répondre aux questions suivantes :

- Question 1 : le rendu scoreboard augmenté est-il adapté pour localiser du texte avec un implant de basse résolution ?
- Question 2 : quelle résolution spatiale est nécessaire dans une approche scoreboard classique pour atteindre les mêmes performances ?

Le système fonctionnait comme pour l'expérience de reconnaissance d'objets, à la différence que l'algorithme de vision utilisé n'était pas celui de Spikenet technology, qui n'était pas adapté pour cette tâche. Plusieurs itérations du système de détection de texte, en collaboration avec l'équipe SC de l'IRIT, ont été nécessaires avant d'arriver à un résultat satisfaisant aussi bien pour la vitesse de détection que pour la précision. L'algorithme fonctionne en plusieurs étapes : après normalisation de la luminance de l'image, le module principal de détection de caractères utilise l'algorithme MSER ('Maximally Stable Extremal Regions') pour détecter les zones de l'image contenant un ou plusieurs caractères. Des étapes de filtrages étaient ensuite appliquées pour retirer les régions trop grandes, trop petites ou avec un ratio de taille improbable. Les régions restantes étaient ensuite regroupées horizontalement et verticalement pour former les blocs de texte. L'algorithme opérait à 20 Hertz sur un ordinateur portable, ce qui était suffisant pour l'expérimentation. La tâche des 16 sujets consistait à repérer sur un écran si l'image naturelle affichée contenait du texte ou non, et le cas échéant, indiquer



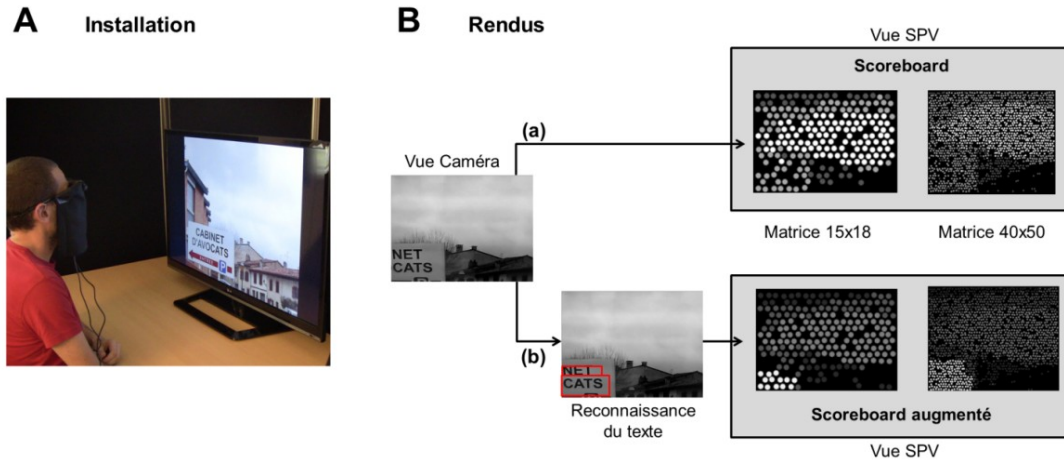


FIGURE 36 – Vue d’ensemble du dispositif pour l’expérience de localisation de texte : le sujet est assis à 57 cm d’un téléviseur et doit localiser des blocs de texte en vision prothétique simulée. B - Les deux rendus utilisés dans cette expérience : (a) rendu basé sur l’approche scoreboard, l’image est simplement réduite à la résolution de la matrice ; (b) rendu basé sur l’approche scoreboard augmenté, les blocs de texte reconnus apparaissent distinctement avec des phosphènes blancs

dans quel cadran celui-ci se trouvait. Il y avait 4 conditions dans cette expérience : 2 tailles de matrices d’électrodes (15x18 et 40x50) et 2 modes d’affichage (scoreboard et scoreboard augmenté). Dans le mode scoreboard augmenté, le niveau de luminance le plus élevé était réservé pour afficher le(s) bloc(s) de texte détecté(s). La taille apparente des lettres était également contrôlée et pouvait prendre 3 valeurs, 1°, 2° et 4° d’angle visuel.

## Résultats

Les résultats de l’expérience (Figure 37) indiquent que la détection de texte par des algorithmes de vision artificielle permet de repérer et localiser des blocs de texte dans l’environnement avec sept fois moins d’électrodes (15x18=270 vs 40x50=2000) pour une précision plus élevée qu’avec l’approche classique dans laquelle l’image est affichée sur la matrice d’électrodes sans traitement préalable (Aug15x18 : précision de 91 % +/- 3,9 % contre 64 % +/- 5,8 % pour SCB40x50). Les sujets étaient également plus rapides de 3 à 7 secondes dans les conditions scoreboard augmenté.

Dans cette expérience de simulation de vision prothétique, nous avons proposé un nouveau rendu visuel basé sur l’approche scoreboard augmenté (comme pour la dé-

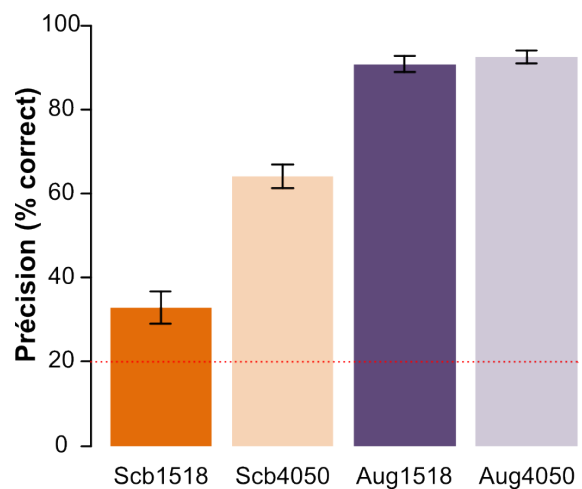


FIGURE 37 – Précision des sujets par condition dans la tâche de localisation de blocs de texte. La ligne en pointillé rouge correspond au niveau chance (20 % : 5 réponses possibles)

tection de visages). Par l'utilisation d'un algorithme temps réel de détection de texte, nous mettons en évidence toutes les zones contenant du texte dans le champ de vision des sujets. Avec l'approche scoreboard, classiquement implémentée dans les neuroprothèses visuelles actuelles, un implant contenant 270 électrodes ne permet pas de détecter du texte dont les caractères mesurent  $4^\circ$  ou moins. Cette taille apparente de  $4^\circ$  correspond à des lettres de 4 cm perçues à 50 cm, ou encore à des lettres de 8 cm situées à un mètre. Pour se ramener à une situation concrète, il n'est donc pas possible avec un implant de 270 électrodes de détecter un panneau signalétique se situant à plus d'un mètre (les lettres de ces panneaux mesurant en moyenne entre 8 et 10 cm). Avec notre approche scoreboard augmenté et le rendu visuel que nous proposons, nos résultats indiquent qu'il est possible, avec la même résolution d'implant, de détecter du texte à une distance au moins quatre fois supérieure. **Ces résultats ont été publiés dans les annales de la conférence EMBS ('Engineering in Medicine and Biology Society')** G. DENIS et al., 2014)

### 2.4.5 Navigation dans un environnement virtuel

La navigation est particulièrement difficile sans vision. Les personnes non-voyantes ont bien souvent besoin d'être accompagnées pour se déplacer en ville ou dans des bâtiments de grande taille et très peu d'entre elles s'aventurent seules dans des environnements inconnus (SANDER et al., 2005). Dans une expérience de navigation en environnement virtuel, nous avons simulé ce que percevrait une personne non-voyante équipée d'une neuroprothèse visuelle de type Argus III (initialement prévue pour avoir 15x18 électrodes, puis finalement annulée en 2019). Les outils utilisés pour construire cet environnement virtuel sont très similaires à ceux utilisés dans un autre environnement virtuel que nous avons conçu pour faire un simulateur de navigation dans le projet NAVIG où nous testions différentes adaptations d'un SIG pour guider des piétons déficients visuels en ville. Le simulateur de navigation prothétique mis au point ici dans l'environnement Ogre3D<sup>4</sup> permet de manipuler finement les indices spatiaux, afin d'étudier la manière dont les non-voyants se représentent l'espace et quels sont les indices les plus cruciaux à fournir pour leur permettre d'élaborer une représentation fiable des lieux parcourus. Les travaux suivants ont été menés dans le cadre de la thèse de Victor Vergnieux VERGNIEUX, 2015.

Cette expérience compare deux approches de rendus avec une même matrice de 15x18 électrodes : en scoreboard et scoreboard augmenté. Comme pour les expériences présentées ci-dessus, la première consiste à présenter une vue « pixelisée » de l'environnement (approche scoreboard, figure 38, colonne SB). La seconde s'appuie sur un système de reconnaissance d'objets (simulé ici puisque dans un environnement virtuel, figure 38, colonne ASB) faisant apparaître de manière différentielle les éléments reconnus (approche par localisation ; ici, le contraste entre le sol et les murs était augmenté). Les sujets étaient équipés d'un casque de Réalité Virtuelle (RV) dont la position était suivie par un système de capture de mouvement pour déplacer la caméra virtuelle en fonction des mouvements de la tête du sujet. Les déplacements linéaires s'effectuaient au clavier. La tâche des sujets était de parcourir un labyrinthe afin de recueillir des bijoux et de les ramener à l'endroit de départ (plaque jaune en haut à droite sur la figure 38). Un indice composite était calculé en fonction du nombre de bijoux ramenés et du temps mis pour accomplir cette tâche.

---

4. <https://www.ogre3d.org>

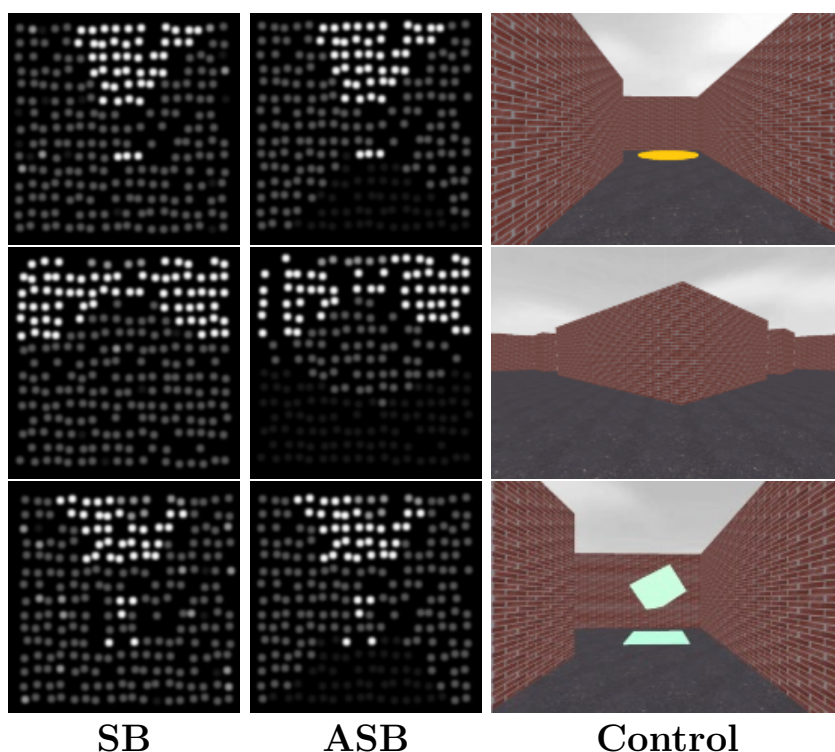


FIGURE 38 – Différents rendus de l’environnement virtuel pour la tâche de navigation en vision prothétique simulée. Vue scoreboard à gauche (SB), vue scoreboard augmenté au centre (ASB) et vue contrôle à droite

## Résultats

Les sujets étaient bien plus performants pour effectuer la tâche lorsqu’ils disposaient d’information intégrées sur la structure de l’environnement (ASB vs SB : indice de performance de 7,3 vs 5,2 - figure 39). Ainsi, l’approche par localisation est plus efficace que l’approche scoreboard pour explorer un environnement inconnu et s’y orienter. Les sujets, en s’appuyant sur les informations supplémentaires fournies sur l’environnement pouvaient mieux comprendre et mieux se représenter la structure de l’espace dans lequel ils évoluaient. **Ces résultats ont été publiés à la conférence EMBS (‘Engineering in Medicine and Biology Society’)** (VERGNIEUX et al., 2014). Une étude similaire dans laquelle plusieurs rendus scoreboard augmenté étaient utilisés (luminance dépendant de la distance ou bien de la structure en fil de fer de l’environnement) démontre le gain fonctionnel de cette approche. Les sujets avaient de meilleures performances et une meilleure compréhension de l’environnement quand ils l’exploraient avec un rendu sco-

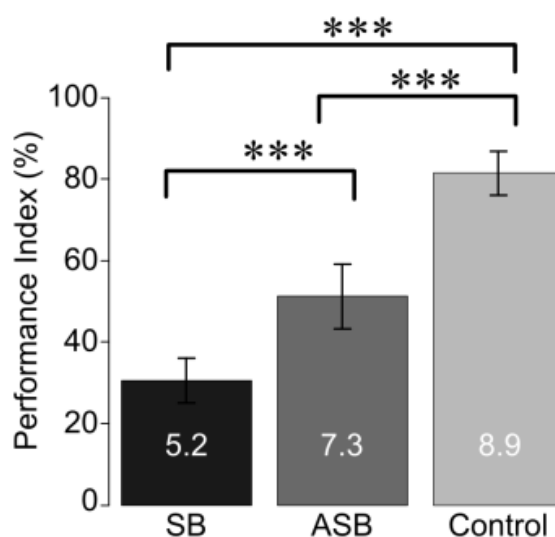


FIGURE 39 – Indice de performance dans la tâche de navigation SPV en fonction de la condition de rendu visuel

reboard augmenté que scoreboard classique. Je ne détaille pas ici les résultats de cette étude mais ceux-ci **ont été publiés dans la revue 'Artificial organs'** ([VERGNIEUX et al., 2017](#)).

## 2.5 Discussion

Les travaux de simulation de neuroprothèses présentés dans ce chapitre se distinguent de la plupart des travaux de la littérature par le souci d'une plausibilité biologique et écologique. Dans ces expériences sur l'utilisabilité des implants simulés, nous avons tenté de rester très proches de situations écologiques en effectuant des tâches réelles de saisie d'objet ou en détectant les visages de personnes présentes dans la pièce. Pour l'expérience de détection de blocs de texte, les conditions étaient plus contrôlées, mais le texte correspondait à des images naturelles contenant des panneaux indicateurs pour se rapprocher des conditions réelles. Dans les expériences de navigation en vision prothétique simulée, le dispositif n'était pas suffisamment portable pour être utilisé dans des conditions réelles en ville. De plus, nous ne disposions pas à l'époque d'algorithmes suffisamment performants pour extraire en temps réel la structure de l'environnement sur un dispositif portable. Une collaboration en cours avec les collègues de l'équipe REVA à l'IRIT dans le cadre du projet INCA permettra de lever quelques-uns de ces verrous technologiques en utilisant des algorithmes de 'deep learning' pour extraire des informations de structure de l'environnement pendant des déplacements de l'utilisateur en extérieur.

Dans toutes les expériences réalisées, nous avons également cherché à simuler la perception visuelle restaurée par les implants au plus proche de ce que les personnes non-voyantes implantées avaient pu rapporter. Cette approche donne une plus grande confiance dans la validité des résultats que nous avons obtenus pour être appliqués à des situations réelles. Cela signifie que les améliorations d'utilisabilité constatées en adoptant une démarche par reconnaissance et localisation d'objets plutôt que par présentation des informations brutes provenant de la caméra doivent pouvoir être transférées à des neuroprothèses réelles.

Dans les expériences de détection de visages, de détection de blocs de texte et de navigation en environnement virtuel, l'approche scoreboard augmenté semble particulièrement prometteuse. Il s'agit d'ajouter aux données brutes en provenance de la scène visuelle (rendu scoreboard) des informations de haut niveau extraites par un algorithme d'intelligence artificielle selon les besoins de l'utilisateur. En présentant ces informations de manière particulière (forte luminance, clignotement, ...), on s'assure que l'utilisateur perçoit les éléments diagnostiques pour la tâche en cours sans pour autant le priver d'informations de contexte potentiellement utiles.

### Utilisabilité des neuroprothèses

Le nombre d'électrodes dans les différentes générations d'implants commerciaux qui se sont succédé depuis 30 ans n'a pas progressé drastiquement, contrairement à ce qui était attendu par la communauté ([CHADER et al., 2009](#)). Comme il y a 20 ans, le nombre de phosphènes qu'il est possible de faire percevoir à une personne avec un implant rétinien reste inférieur à 100. Nous avons montré que dans différentes tâches semi-écologiques, ce nombre de phosphènes est insuffisant pour restaurer des capacités fonctionnelles (reconnaissance d'objets, détection de visages ou de texte, navigation

dans un labyrinthe). En revanche, grâce à une approche hybride impliquant la vision par ordinateur, nous montrons dans nos travaux que les neuroprothèses visuelles deviennent utilisables dès lors que les informations présentées correspondent au résultat d'un traitement de l'image de haut niveau pour les rendre plus intelligibles.

### **Limitations de l'approche par simulation**

Aussi précise que puisse être la simulation des phosphènes générés par l'implant simulé, cette représentation virtuelle ne correspond jamais parfaitement à la réalité d'un implant. Certains paramètres sont très difficiles à contrôler, comme la stabilisation de l'image générée à une position précise de la rétine, pour correspondre à la situation d'un implant réel qui reste à la même position sur la rétine lors du déplacement de l'œil. Nous avons implémenté cette stabilisation dynamique des images pour qu'elles restent à la même position de l'espace malgré les mouvements des yeux du sujet. Cette compensation est cependant assez perturbante et désagréable (rapidement nauséuse) et ne correspond de toutes façons pas exactement à ce qu'une personne non-voyante implantée perçoit (l'asservissement ne peut pas être instantané et parfaitement ajusté). D'autres facteurs comme la dynamique temporelle de l'apparition et de la disparition des phosphènes (PÉREZ FORNOS et al., 2012) est également difficile à parfaitement prendre en compte. Ces paramètres temporels varient au fur et à mesure des stimulations et en fonction de la zone précise du champ visuel stimulé.

Au-delà de ces facteurs précis, les différences inter-individuelles sont très importantes en ce qui concerne la perception. Il est difficile de modéliser de manière fiable ces paramètres et plus encore les compensations que peuvent utiliser les patients en s'appuyant sur d'autres modalités sensorielles ou sur leurs mouvements propres pour améliorer leur vision. D'autant plus qu'une partie des sujets possède une vision résiduelle dans l'autre œil qu'il n'est également pas possible de modéliser de manière fiable.

Pour autant, l'approche par simulation de neuroprothèse permet de fixer des limites basses aux performances des systèmes implantés afin d'atteindre une récupération fonctionnelle donnée. Par exemple, il est possible de déterminer que pour reconnaître, localiser et attraper un objet, un implant avec au moins 600 électrodes indépendantes est nécessaire quand les informations sont présentées sans traitement visuel. Dans ce chapitre, nos travaux montrent qu'un système dans lequel un module de vision par machine est utilisé pour reconnaître des objets permet de simplifier considérablement la représentation visuelle et réduit fortement le nombre d'électrodes nécessaires pour effectuer la même tâche.

### **Interaction avec la neuroprothèse**

Un système utilisable doit présenter un rendu adapté au contexte de la tâche. Par exemple, nous suggérons qu'un rendu spécifique est nécessaire pour localiser des objets, ou plus généralement des points d'intérêts, mais qu'un autre rendu serait plus approprié dans un contexte de navigation par exemple. Ces différents modes de restitution impliquent la possibilité de passer d'un rendu à l'autre et donc d'interagir avec la neuroprothèse.

Dans un scénario d'utilisation possible, l'utilisateur pourrait interagir directement avec sa neuroprothèse. Le dispositif pourrait, par exemple, être couplé à un logiciel de reconnaissance vocale pour changer de mode ou charger des modèles d'objets à reconnaître par une simple commande vocale.

De même, plutôt que d’avoir à s’approcher physiquement du texte, nous pourrions également imaginer que les utilisateurs contrôlent directement le zoom de la caméra, pour atteindre et lire (par OCR) ces blocs de texte. Avec cette fonctionnalité, les personnes implantées auraient la possibilité de lire du texte éloigné, voire inaccessible (des panneaux en hauteur, le nom des magasins dans une rue, etc.).

### Application aux implants réels

Dans toutes les expériences que nous avons menées, l’approche par reconnaissance d’objets montrait des résultats supérieurs à l’approche scoreboard. L’étape suivante consiste à tester ces idées avec de vrais implants. En France, l’implant Argus II a bénéficié pendant plusieurs années du forfait Innovation qui a permis d’implanter quelques dizaines de personnes.

Le plus grand centre d’implantation en France a été l’institut de la vision à Paris. Nous avons noué des contacts avec Ryad Benosman, responsable de l’équipe « Vision et calcul bio-inspiré »<sup>5</sup> à l’institut et impliqué dans les essais cliniques. Malheureusement, à cette époque, les protocoles cliniques autour de ces implants étaient très rigides parce que nous étions encore dans une phase précoce du déploiement. Ainsi il n’a pas été possible d’intercaler notre module de reconnaissance d’objets entre la caméra du patient et son stimulateur comme nous l’aurions souhaité. De plus, l’institut de la vision mène également des projets de modification des images en entrée du système, notamment en s’appuyant sur des caméras neuromorphiques pour capturer la scène visuelle (MOSQUERON et al., 2007). Les informations visuelles renvoyées par ces caméras sont très différentes de celles des caméras classiques et les algorithmes de reconnaissance d’objets disponibles n’étaient pas adaptés pour traiter ces images. A l’heure actuelle, l’accès aux patients ne s’est malheureusement pas amélioré avec la fin des implantations depuis 2 ans à la fois chez Second Sight et chez Pixium Vision. Cependant les idées que nous proposons se diffusent dans la communauté et des travaux préparatoires pour utiliser la reconnaissance d’objets avec des implants sont en cours (LOZANO et al., 2020 ; HAN et al., 2021).

### Tableau synthétique - chapitre 2

Le tableau suivant récapitule mes contributions présentées dans le chapitre 2 :

	Objets	Visages	Texte	Navigation
Contributions scientifiques	++	+	+	+
Encadrement	Thèse Grégoire Denis + 2 M2			Thèse Victor Vergnieux
Conception / développement	++	+	+	++
Étude d’usages	+	+	+	+
Publications	G. DENIS et al., 2012, MACÉ et al., 2015	G. DENIS et al., 2013	G. DENIS et al., 2014	VERGNEUX et al., 2014, 2017

5. <https://www.institut-vision.org/fr/vision-and-natural-computation.html>



# Chapitre 3

## Projet de recherche

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Contexte</b> . . . . .	<b>76</b>
3.1.1	Pourquoi la réalité virtuelle? . . . . .	76
3.1.2	Pourquoi l'équipe Hybrid à l'IRISA . . . . .	76
<b>3.2</b>	<b>Projet scientifique</b> . . . . .	<b>77</b>
3.2.1	Études des paramètres électrophysiologiques en RV/RA . . . . .	78
3.2.2	Améliorer l'utilisabilité de la RV/RA via des ICM . . . . .	80
3.2.3	Étude du couplage d'ICM et d'interfaces haptiques . . . . .	81
<b>3.3</b>	<b>Impact scientifique et sociétal</b> . . . . .	<b>82</b>
<b>3.4</b>	<b>Conclusion</b> . . . . .	<b>83</b>

---



## 3.1 Contexte

En arrivant des neurosciences, il m'a fallu dans mes premiers temps à l'IRIT m'adapter à une nouvelle discipline scientifique. En plus d'un travail bibliographique important, un alignement des concepts et du vocabulaire a été nécessaire pour mieux se comprendre et collaborer avec les autres chercheurs de l'équipe, formés en informatique. Cette phase de collaboration avec les chercheurs issus de disciplines différentes, à l'interface entre l'informatique et les sciences cognitives, a été très enrichissante. La mobilisation de compétences en ingénierie pour la réalisation de dispositifs de tests et de preuves de concept a aussi été pour moi d'un réel d'intérêt. Après 10 ans d'exploration dans le domaine de l'IHM, je ressens la nécessité de me tourner vers un nouveau champ disciplinaire. La réalité virtuelle et la réalité augmentée sont des domaines connexes à l'IHM et comme pour l'IHM, le rapprochement entre neurosciences / sciences cognitives et RV/RA est judicieux pour mieux appréhender le comportement des humains interagissant avec ces systèmes.

### 3.1.1 Pourquoi la réalité virtuelle ?

La réalité virtuelle et la réalité augmentée sont des domaines scientifiques et technologiques en plein essor. La production scientifique dans ces disciplines a rapidement augmenté, en lien avec la mise sur le marché de solutions grand public de RV/RA, à l'instar des systèmes développés par les grands groupes informatiques tels que Facebook ([Oculus](#)), Microsoft ([Hololens](#)) ou HTC ([Vive](#)). La disponibilité de ces systèmes de RV/RA performants, accessibles à un coût bien inférieur à ce qui existait sur le marché seulement quelques années auparavant, a permis une diffusion rapide de la RV parmi le grand public et en particulier la communauté des joueurs mais aussi maintenant dans le domaine médical, la formation et le design.

Je me sens concerné par l'impact que cette diffusion rapide des systèmes de RV va avoir sur la société. Il est probable qu'à l'image d'Internet, qui a pénétré tous les aspects de notre vie quotidienne, la réalité virtuelle et peut être plus encore la Réalité Augmentée (RA), via nos smartphones, des lunettes connectées ou d'autres objets 'portables' soient rapidement omniprésents dans nos vies. Au-delà du travail sur les usages et les applications, je souhaite aussi participer à la réflexion sur l'impact sociétal et l'appropriation de ces technologies.

### 3.1.2 Pourquoi l'équipe Hybrid à l'IRISA

Avec la disparition de l'équipe Vortex à l'IRIT, qui travaillait en partie sur la réalité virtuelle, les sujets scientifiques autour de la RV qui correspondent à mes compétences et aux questions que je souhaite aborder (interaction haptique, couplage interface cerveau-machine / environnement virtuel) ne sont pas traités à l'IRIT. J'ai donc cherché un nouveau laboratoire d'accueil pour effectuer ma ré-orientation thématique.

J'avais déjà connaissance des travaux d'Anatole Lécuyer ([LÉCUYER et al., 2008](#)) et de l'équipe Hybrid et je me suis rapproché de cette équipe ainsi que d'autres équipes

de l'IRISA (Mimetic, Rainbow, Empenn et Percept) pour envisager les recherches que nous pourrions mener ensemble. L'équipe Hybrid est une référence dans le paysage de la RV et de la RA, et mon idée de conserver une approche dans laquelle neurosciences et informatique sont couplées s'inscrit bien dans leur projet. Cette équipe est en effet engagée depuis sa création dans une démarche pluridisciplinaire tournée vers les sciences cognitives. Mon parcours à l'interface entre neurosciences et IHM permettra de renforcer encore ces thématiques, par exemple sur les questions portant sur l'expérience utilisateur en Environnements Virtuels (EV), mais aussi sur les interactions tactiles en RV/RA et sur les Interface Cerveau-Machine (ICM) en réalité virtuelle.

Au-delà de l'IRISA, le contexte scientifique et technique pour réaliser des projets autour de la RV/RA et des ICM est très favorable à Rennes avec la présence de l'Institut de Recherche Technologique (IRT) [bcom.com](http://bcom.com), du Centre Hospitalo-Universitaire (CHU) de Rennes et de l'entreprise InterDigital<sup>1</sup>, déjà partenaires de l'IRISA dans plusieurs projets.

Pour que ce projet de mutation se déroule au mieux et cartographier précisément les espaces de collaboration, j'ai eu de nombreuses interactions avec Anatole Lecuyer et l'équipe Hybrid au cours de l'année 2021. Le projet scientifique présenté ci-dessous a été construit sur la base de ces interactions.

## 3.2 Projet scientifique

Pour préparer cette transition dans ma carrière, j'ai établi un programme de recherche pour les 5 ans à venir, co-construit principalement avec des chercheurs et enseignants-chercheurs de l'équipe Hybrid, ainsi qu'avec des chercheurs d'autres équipes de l'IRISA, dans le département Média et Interaction. Ce programme est élaboré en tenant compte à la fois de mes aspirations personnelles, afin de le centrer sur les questions scientifiques que je souhaite aborder, mais aussi des thématiques de recherche déjà présentes dans ces équipes et des tendances actuelles dans les domaines de la RV et de la RA.

Souhaitant rester dans une approche pluridisciplinaire, les grands objectifs de mon programme s'inscrivent à la frontière entre informatique et sciences cognitives. Je vais tout d'abord (1) chercher à mieux comprendre les mécanismes cérébraux mobilisés lors de l'exploration d'un environnement virtuel afin d'améliorer la conception de ces environnements et les interactions avec leurs utilisateurs. Je pense qu'il y a beaucoup d'informations à retirer de l'analyse des conflits entre les informations sensorielles fournies par la simulation (visuelles, mais aussi tactiles et auditives) et les informations attendues par notre modèle interne du monde lorsque nous interagissons dans ces systèmes. Mieux comprendre ces dissonances et la manière dont le cerveau résout ces conflits permet de déterminer quelles sont les paramètres de la simulation qu'il est nécessaire de mieux maîtriser pour améliorer l'expérience utilisateur dans les environnements virtuels (KILTENI et al., 2012).

Je souhaite travailler également (2) sur la conception d'interfaces cerveau-machine performantes (ICM) dans des contextes d'environnements de RV/RA. Une première problématique scientifique concerne l'usage de ces systèmes en tant que dispositifs d'interaction en entrée pour agir (ou rétro-agir) sur certains paramètres de la simulation. Ce peut être sous forme active, lorsque le sujet s'applique à maîtriser ses états mentaux

---

1. <https://www.interdigital.com/about>

pour envoyer au système des commandes qui modifient la simulation ou interagissent avec des objets virtuels. Ce peut aussi être sous forme passive quand l'analyse des signaux cérébraux vient modifier les paramètres de la simulation (pour la simplifier, par exemple). Une deuxième problématique concerne l'utilisation des ICM dans des systèmes de RV/RA pour médier du 'neurofeedback'. En RA, l'affichage en surimpression et en temps réel de ses états mentaux (informations physiologiques cérébrales) permet au sujet d'agir sur eux. Le neurofeedback peut être utilisé pour traiter différentes pathologies comme les troubles anxieux (HAMMOND, 2005), troubles du sommeil ou de l'attention (KAISER et OTHMER, 2000). Des résultats intéressants sont également obtenus en complément de rééducation psychomotrice dans le cas d'AVC (NELSON, 2007).

Enfin, un troisième volet de mon programme (3) s'apparente aux recherches que je mène actuellement sur les interfaces non-visuelles. Pour les déficients visuels, les interfaces haptiques ont une grande valeur ajoutée et nous nous sommes intéressés très tôt dans ELIPSE à cette modalité sensorielle pour transmettre des informations de nature graphique. Dans un environnement virtuel, la problématique est apparentée puisque la personne ne perçoit pas directement l'objet avec lequel elle interagit. Je souhaite explorer les questions liées à ces disparités de perception visio-tactiles en réalisant des expériences permettant de comprendre quels sont les éléments de la simulation visuelle et de la stimulation tactile qui permettent à l'utilisateur de percevoir comme cohérentes les informations visuelles et tactiles qui lui sont présentées.

Pour réaliser ces objectifs de recherche, je vais m'appuyer sur l'expertise en neurosciences et en IHM que j'apporte et acquérir auprès de mes futurs collègues à l'IRISA les compétences scientifiques (et techniques) spécifiques à la RV/RA pour concevoir et réaliser des systèmes hybrides EV - ICM. Mes connaissances en psychologie expérimentale et ma maîtrise des protocoles expérimentaux en neurosciences et en IHM me permettront d'être rapidement autonome sur ces aspects. En complément de l'aspect comportemental, mon expérience dans l'analyse des signaux cérébraux en EEG et IRMf me permettra d'ajouter ces moyens d'analyse aux expériences envisagées. Ces atouts peuvent s'appliquer de manière transversale dans les différents thèmes scientifiques sur lesquels je souhaite m'investir.

Je vais à présent détailler chacun de ces trois axes de recherche proposé.

### 3.2.1 Études des paramètres électrophysiologiques en RV/RA

Les environnements de RV/RA introduisent une dissonance cognitive en découplant la perception visuelle de celle des autres sens. Cette dissonance peut également se produire avec les signaux visuels seuls si l'on manipule le rendu d'une manière non réaliste (HOYET et al., 2016) (Figure 40). L'analyse du comportement d'un sujet plongé dans un tel environnement fournit des informations sur les processus mentaux à l'œuvre pour réduire ces dissonances et s'y adapter. En complément de ces mesures comportementales, l'enregistrement de l'activité cérébrale en EEG, IRMf ou 'Functional Near-Infrared Spectroscopy' (imagerie spectroscopique infrarouge) (fNIRS) fournira des informations objectives sur les processus mentaux sous-jacents et permettra de mieux les explorer.

Pour étudier ces conflits de représentations, il serait intéressant de se placer dans des environnements virtuels dans lesquelles les distances, les dimensions ou les règles de perspectives sont modifiées. Mon objectif sera d'isoler des marqueurs objectifs de ces dis-

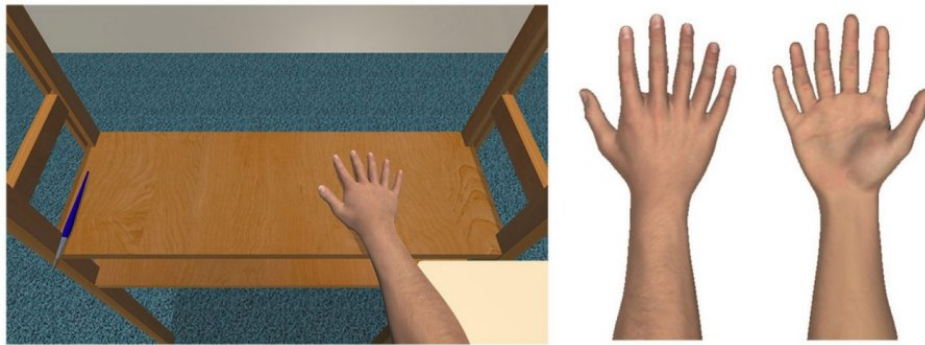


FIGURE 40 – Exemple de dissonance cognitive introduite en modifiant le schéma corporel (ajout d'un sixième doigt) dans l'environnement virtuel (Tiré de HOYET et al., 2016)

sonances dans les observations comportementales et électrophysiologiques pour mieux comprendre et caractériser ce qui est à l'œuvre dans le cerveau lorsque nous essayons de résoudre de tels conflits sensoriels. L'une des applications possibles de ces résultats pourrait être par exemple dans le secteur automobile. Il est envisageable de mesurer ces paramètres physiologiques pour évaluer les conflits de représentation qui peuvent survenir lorsque des informations d'augmentation de la conduite sont projetées sur le pare-brise des véhicules afin de les réduire. L'équipe Hybrid a d'ailleurs déjà un historique de collaboration avec l'industrie automobile qui pourrait faciliter la réalisation de ces projets. Je souhaite dès mon arrivée à l'IRISA faire de ce premier axe un élément structurant de mon activité de recherche.

En insistant sur ce facteur de dissonance cognitive, il est possible de présenter en réalité virtuelle des modifications du schéma corporel de l'utilisateur pour le faire paraître différent de ce qu'il est en réalité (cf la main à six doigts ci-dessus). Ce protocole peut être renforcé par l'utilisation d'indices tactiles, congruents avec la stimulation visuelle sur des parties du corps présentées de manière différente ou déformée. En manipulant paramétriquement l'amplitude de la déformation, il est possible d'extraire des marqueurs corrélés avec ces effets dans les signaux physiologiques enregistrés (EEG ou fNIRS) ainsi que dans les réponses comportementales du sujet (précision et vitesse pour l'exécution d'une tâche, par exemple). Avec Ludovic Hoyet, de l'équipe Mimetic, nous proposons de collaborer sur cet axe de recherche pour aborder ces questions liées à l'incarnation virtuelle. Une compréhension plus fine de la perception visio-tactile dans les EV permet d'améliorer les modèles prédictifs du comportement des humains avec comme domaine d'application possible la gestion des mouvements de foules dans diverses situations.

Pour réaliser ces expériences, la salle Immersia (Figure 41) constitue un environnement idéal. Cette plate-forme de recherche en réalité virtuelle est un des plus grands système 'Cave Automatic Virtual Environment' (environnement virtuel immersif) (CAVE) installé en Europe. La plate-forme est outillée de bras robotisés pour la stimulation haptique et de systèmes de capture de mouvements et d'enregistrement portable des EEG. Ce système est installé dans les locaux de l'IRISA et est facilement accessible pour les membres du laboratoire.



FIGURE 41 – La plate-forme de recherche en réalité virtuelle Immersia à l'IRISA est une des plus grandes salles de réalité virtuelle d'Europe

### 3.2.2 Améliorer l'utilisabilité de la RV/RA via des ICM

#### Interfaces cerveau-machine

On trouve dans la littérature de nombreuses preuves de concept d'interfaces cerveau-machine utilisées pour communiquer avec des patients atteints d'un syndrome 'locked-in' (KIIBLER et al., 2001; WOLPAW et al., 2002) ou piloter des fauteuils roulants (REBSAMEN et al., 2006) pour des personnes à la mobilité sévèrement limitée. Mais ces vingt dernières années, les progrès dans l'interfaçage non-invasif avec le cerveau, notamment par l'utilisation d'électrodes sèches actives ultrasensibles (CHEN et al., 2014) et les améliorations dans le traitement du signal permettent d'envisager une diffusion plus large de ces outils. Les dernières générations de ces systèmes s'appuient sur des algorithmes adaptatifs (de type 'deep learning') pour améliorer le taux de transfert d'informations qui s'est ainsi accru considérablement, passant pour des systèmes passifs de 25 bits par minute dans les années 2000 (WOLPAW et al., 2002) à 170 bits par minute en 2019 (NAGEL et SPÜLER, 2019). Même si ces débits restent faibles, ils sont suffisants pour sélectionner des dizaines de lettres en une minute et sont donc utilisables pour piloter des interfaces graphiques dans des situations où les mains ne sont pas disponibles (mains « sales » ou mobilisées en continu).

#### Application « mains indisponibles »

On peut donc envisager leur utilisation dans des situations hors du champ du handicap moteur, par exemple dans des dispositifs de réalité augmentée pour la maintenance lorsque les mains sont indisponibles et que l'environnement sonore est trop bruyé pour avoir recours à des commandes vocales. Les commandes reconnues par cette interface directe avec le cerveau permettraient par exemple de changer de vue ou de sélectionner un outil ou un item dans un menu.

Je propose de concevoir un système de RV couplé à une interface cerveau-machine s'appuyant sur l'état de l'art des systèmes de décodages tel que celui de Nagel et Spüler, pour mesurer la performance de sujets sains dans un système simulé de maintenance en RA lorsque les sujets doivent opérer une tâche principale mobilisant leurs deux mains et opérer un changement de vue en utilisant une ICM. Pour savoir si un tel usage est réaliste, je propose de mesurer à la fois la performance dans la tâche principale ainsi que la charge mentale associée à l'utilisation de cette interface cerveau-machine (LUONG et al., 2020).

Ces résultats pourront être transférés à d'autres domaines d'application, par exemple dans le secteur médical. Lors d'opérations en coelioscopie ou via robot-chirurgien, les mains ne sont pas forcément disponibles pour interagir avec l'interface graphique présentant les images de l'intervention. Les commandes pour diriger le changement de vue ou d'outils pourraient alors s'appuyer sur une ICM pilotée par le chirurgien. Une collaboration avec le CHU de Rennes sur ces nouvelles interfaces est également envisageable à court terme.

### Application pour le neurofeedback

Les ICM ne sont pas seulement utilisées pour agir sur un système informatique ou robotique ; elles peuvent aussi être utilisées pour présenter de manière synthétique à l'utilisateur une vue des différentes zones activées dans son cerveau. Cette présentation à l'utilisateur (ou au patient) de ses propres signaux cérébraux porte l'appellation de neurofeedback. Il est de plus en plus utilisé pour traiter des pathologies telles que les troubles anxieux, troubles neurophysiologiques (migraines, insomnies) ou les troubles de l'humeur (dépression), mais aussi à des fins d'amélioration de la performance par des sportifs de haut niveau. De grands progrès restent à faire dans la manière de représenter de manière intuitive ces signaux à l'utilisateur et toute une série d'expériences peut être envisagée sur les recommandations qu'il est nécessaire de respecter pour optimiser l'impact positif du neurofeedback. Ces protocoles de neurofeedback commencent également à être utilisés pour traiter les suites d'AVC ou de traumatismes crâniens. C'est d'ailleurs une thématique déjà en partie abordée dans l'équipe Hybrid, en collaboration avec l'équipe Empenn au sein du projet HEMISFER<sup>2</sup> dans lequel du neurofeedback s'appuyant sur l'utilisation conjointe de signaux EEG et IRMf est utilisé pour le traitement de troubles psychiatriques et favoriser la récupération fonctionnelle en cas d'AVC (LIOI et al., 2020).

Comme ce sont des questions qui m'intéressent, je compte investir une partie de mon temps pour collaborer avec Salomé Le Franc (médecin doctorante entre les équipes Empenn et Hybrid) et Mélanie Cogné (médecin dans le service de médecine physique et réadaptation et chercheuse chez Hybrid) sur des questions liées au traitement des EEG dans des expériences de neurofeedback.

### 3.2.3 Étude du couplage d'ICM et d'interfaces haptiques

En environnement virtuel, le rendu visuel est maintenant de très haute qualité. Le suivi de la tête et la vitesse de rafraîchissement permettent de créer une illusion visuelle convaincante. Il en est de même pour la génération des sons spatialisés qui illusionnent facilement nos oreilles. Le retour haptique et la perception de surfaces en environnement virtuel sont encore loin d'atteindre le même niveau de réalisme. Il existe déjà dans l'équipe Hybrid des projets ambitieux pour concevoir et étudier des dispositifs de stimulation tactiles innovants, par exemple dans le projet Tactility<sup>3</sup> où le but est d'améliorer le réalisme des interactions tactiles en environnement virtuels. Ce réalisme peut être apporté par des systèmes asservis aux mouvements de l'utilisateur, comme dans les systèmes dit de 'Encountered-Type Haptic Interface' (projet Lobbybot, figure 42) dans lesquels un bras robotisé anticipe les mouvements de l'utilisateur

---

2. <https://team.inria.fr/empenn/research/scientific-activities/hemisfer-projects>

3. <https://tactility-h2020.eu>

pour lui opposer au bon emplacement et avec le bon angle une surface présente dans l'environnement virtuel.



FIGURE 42 – Le projet Lobby-Bot, dans lequel un bras robotisé vient positionner une surface congruente en position, orientation et texture avec une surface présente dans l'environnement virtuel

Les interfaces tactiles avancées peuvent aussi s'appuyer sur des dispositifs permettant d'induire des perceptions tactiles sans support physique, comme le système PUMAH (HOWARD et al., 2020) dans lequel des ultrasons sont focalisés sur une partie du corps de l'utilisateur grâce à une matrice de générateurs piézo-électriques modulés en commande de phase et montés sur une plate-forme mobile deux axes asservie aux mouvements de l'utilisateur. Claudio Pacchierotti, dans l'équipe Rainbow, effectue ses recherches principalement sur ces aspects de la perception tactile en EV. Nous prévoyons de collaborer sur l'amélioration de la conception de ces systèmes. Nous pourrions nous appuyer sur mon expérience en psychologie expé-

riimentale et en IHM avec des systèmes de stimulation haptique, pour concevoir des dispositifs de stimulation tactile avancés qui prennent mieux en compte les facteurs humains. Avec Claudio Pacchierotti et Ferran Argelaguet, qui travaille également sur la stimulation haptique chez Hybrid, nous proposons de réaliser des expériences en EV visio-tactiles pour extraire des règles génériques à respecter afin que cette stimulation tactile soit la plus réaliste possible. L'amélioration de ces aspects de la simulation améliorera d'autant plus l'immersion dans l'environnement virtuel.

### 3.3 Impact scientifique et sociétal

Le programme de recherche que je propose de réaliser en intégrant l'IRISA mobilise des connaissances et des compétences dans plusieurs champs disciplinaires. Mes expériences antérieures sur des sujets pluridisciplinaires et le contexte très favorable à la réalisation de ce type de projets dans l'équipe Hybrid à l'IRISA le rendent possible. Les résultats envisagés en sciences cognitives sur la manière dont le cerveau se représente ces espaces virtuels et les intègre aux représentations internes permettra d'émettre des recommandations pour mieux concevoir ces environnements virtuels. L'utilisation conjointe d'ICM et d'environnements virtuels, notamment dans des systèmes de neurofeedback permettra d'améliorer la prise en charge de différentes pathologies, dont les suites d'AVC ou de traumatismes cérébraux.

Les systèmes de réalité virtuelle et de réalité augmentée sont de plus en plus répandus. Leur prix a fortement diminué et dans le même temps leurs performances se sont considérablement améliorées. Tous comme les smartphones sont passés d'une rareté il y a 10 ans à un objet ubiquitaire aujourd'hui, la diffusion des systèmes de réalité virtuelle ou augmentée pourrait être rapide dans les 10 ans à venir. En plus des applications bien établies dans des domaines comme le jeu ou le maquettage virtuel, de nombreuses applications commencent à émerger en architecture, en médecine, en formation, etc. En étant plus largement utilisés, les systèmes de RV/RA auront un impact sociétal

important et il me paraît important de participer à la conception de ces dispositifs pour accompagner leur diffusion.

### 3.4 Conclusion

Après une formation en biologie et des postdoctorats en informatique, j'ai été recruté dans une section interdisciplinaire du CNRS pour effectuer des recherches sur la simulation de neuroprothèses visuelles, à l'interface entre les neurosciences et l'informatique. En parallèle, j'ai démarré des travaux pour mieux comprendre les représentations spatiales chez les personnes déficientes visuelles et appliquer ces résultats dans des dispositifs interactifs facilitant la compréhension des cartes et des schémas.

Après 10 ans sur cette thématique, j'effectue une réorientation en appliquant mes connaissances en sciences cognitives et en IHM au domaine de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée. C'est un domaine connexe à l'IHM dont le développement très rapide offre de multiples possibilités. Je souhaite en premier lieu mener des recherches portant sur la compréhension des représentations mentales de l'utilisateur plongé dans ces environnements de RV/RA afin d'améliorer leur utilisabilité. Il s'agira également d'utiliser des signaux neurophysiologiques (EEG/IRMf/fNIRS) afin d'interagir plus efficacement avec les environnements virtuels et améliorer ainsi l'expérience utilisateur dans des situations spécifiques ou en cas de handicap moteur. Enfin, l'une des limitations actuelles des environnements virtuels concerne le rendu haptique. En m'appuyant sur les récents développements dans ce domaine, je pourrai m'investir dans la recherche de nouvelles interactions haptiques afin de renforcer l'immersion et le sentiment de présence dans les environnements virtuels.

Dans cette présentation de mon projet de recherche, j'ai exposé brièvement le programme que je vais mener dans les cinq prochaines années au sein de l'équipe Hybrid et avec d'autres équipes du département Média et Interaction à l'IRISA. Cette proposition sera affinée en fonction de l'évolution de mes connaissances dans les domaines qui me sont nouveaux. Les expériences que je vais précisément réaliser dépendront aussi des outils et des plates-formes disponibles ainsi que mes interactions avec des chercheurs d'autres équipes du département abordant des sujets connexes (dans les équipes Mimetic, Rainbow et Percept, par exemple).

Les échanges que j'ai pu avoir avec Anatole Lécuyer, avec les autres membres d'Hybrid et d'autres chercheurs de l'IRISA me permettent d'être optimiste sur les chances de mener à bien ce programme de recherche.







# Bibliographie

- ALVES, C., J. G. BOAL et L. DICKEL (2007). « Short-distance navigation in cephalopods : a review and synthesis ». In : *Cognitive processing* 9.4, p. 239-247 (cf. p. 18).
- ARNO, P., A. VANLIERDE, E. STREEL, M. C. WANET-DEFALQUE, S. SANABRIA-BOHORQUEZ et C. VERAART. (2001). « Auditory substitution of vision : pattern recognition by the blind ». In : *Applied cognitive psychology* 15, p. 509-519 (cf. p. 53).
- AUVRAY, M., S. HANNETON et J. O'REGAN (2007). « Learning to perceive with a visuo-auditory substitution system : Localisation and object recognition with The vOICe' ». In : *Perception* 36.3, p. 416-430 (cf. p. 54).
- BACH-Y-RITA, P. (1983). « Tactile vision substitution : past and future ». In : *International Journal of Neuroscience* 19, p. 29-36 (cf. p. 53).
- BACH-Y-RITA, P., C. C. COLLINS, F. A. SAUNDERS, B. WHITE et L. SCADDEN. (1969). « Vision substitution by tactile image projection ». In : *Nature* 221.5184, p. 963-964 (cf. p. 53).
- BACH-Y-RITA, P., K. A. KACZMAREK, M. E. TYLER et J. GARCIA-LARA (1998). « Form perception with a 49-point electrotactile stimulus array on the tongue : a technical note ». In : *Journal of rehabilitation research & development* 35, p. 427-430 (cf. p. 53).
- BANGOR, A., P. KORTUM et J. MILLER (2008). « An empirical evaluation of the System Usability Scale (SUS) ». In : *International journal of Human-Computer Interaction* 24, p. 574-594 (cf. p. 29).
- BARRY, M. P. et G. DAGNELIE (2011). « Simulations of Prosthetic Vision ». In : *Visual prosthetics*. Springer. Chap. 16, p. 319-341 (cf. p. 60).
- BEAUCHAMP, M. S., D. OSWALT, P. SUN, B. L. FOSTER, J. F. MAGNOTTI, S. NIKETEGHAD, N. POURATIAN, W. H. BOSKING et D. YOSHOR (2020). « Dynamic stimulation of visual cortex produces form Vision in sighted and blind humans ». In : *Cell* 181.4, 774-783.e5 (cf. p. 55).
- BEAUDOUIN-LAFON, M. (2000). « Instrumental interaction : an interaction model for designing post-WIMP User Interfaces ». In : *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI'00*. ACM, p. 446-453 (cf. p. 31).

- BERGÉ, L.-P., G. PERELMAN, A. HAMELIN, M. RAYNAL, C. SANZA, M. HOURLY-PANCHETTI, R. CABANAC et E. DUBOIS (2014). « Smartphone based 3D navigation techniques in an astronomical observatory context : implementation and evaluation in a software platform ». In : *International journal on advances in software* 7.3&4, p. 551-566 (cf. p. 4).
- BERTHOZ, A. (1991). « Reference frames for the perception and control of movement ». In : *Brain and space*. Sous la dir. de J. PAILLARD. Oxford University Press, p. 81-111 (cf. p. 19).
- BERTRAND, E., D. SAUZIN, F. VELLA, N. DUBUS et N. VIGOUROUX (2016). « Handi-MathKey : Mathematical keyboard for disabled person ». In : *Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs - ICCHP'16. Lecture Notes in Computer Science*. T. 9759 LNCS. Springer Verlag, p. 487-494 (cf. p. 4).
- BRELÉN, M. E., F. DURET, B. GÉRARD, J. DELBEKE et C. VERAART (2005). « Creating a meaningful visual perception in blind volunteers by optic nerve stimulation. » In : *Journal of neural engineering* 2.1, S22-8 (cf. p. 54).
- BRINDLEY, G. S. et W. S. LEWIN (1968). « The sensations produced by electrical stimulation of the visual cortex ». In : *The journal of physiology* 196.2, p. 479-493 (cf. p. 54).
- BRIS, M. (2004). *Recommandations pour la transcription de document , documentation du service des documents adaptés pour les déficients visuels*. Rapp. tech. INSHEA, p. 1-25 (cf. p. 22).
- BROCK, A., S. DE, S. SMITH et K. SIMONYAN (2021). « High-performance large-scale image recognition without normalization ». In : *Proceedings of the International Conference on Machine Learning - ICML'21*, p. 1-22 (cf. p. 14).
- BROCK, A. (2013). « Interactive maps for visually impaired people : design, usability and spatial cognition ». Thèse de doctorat. Toulouse, p. 1-360 (cf. p. 27).
- BROCK, A., P. TRUILLET, B. ORIOLA, D. PICARD et C. JOUFFRAIS (2012). « Design and user satisfaction of interactive maps for visually impaired people ». In : *Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs - ICCHP'12. Lecture Notes in Computer Science*. T. 7383. Springer, p. 544-551 (cf. p. 27, 29).
- BROCK, A., P. TRUILLET, B. ORIOLA, D. PICARD et C. JOUFFRAIS (2015). « Interactivity improves usability of geographic maps for visually impaired people ». In : *Human-Computer Interaction* 30, p. 156-194 (cf. p. 29, 31).
- BRULÉ, E., G. BAILLY, A. BROCK, F. VALENTIN, G. DENIS et C. JOUFFRAIS (2016). « MapSense : Multi-sensory interactive maps for children living with visual impairments ». In : *Proceedings of the International Conference on Human Factors in*

- Computing Systems - CHI'16*. Association for Computing Machinery, p. 445-457 (cf. p. 31).
- BUAUD, A., H. SVENSSON, D. ARCHAMBAULT et D. BURGER (2002). « Multimedia games for visually impaired children ». In : *Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs - ICCHP'02. Lecture Notes in Computer Science*. T. 2398 (cf. p. 35).
- BUCHS, G., B. HAIMLER, M. KEREM, S. MAIDENBAUM, L. BRAUN et A. AMEDI (2021). « A self-training program for sensory substitution devices ». In : *PloS one* 16.4, e0250281 (cf. p. 54).
- CABRIC, F., E. DUBOIS, P. IRANI et M. SERRANO (2019). « TouchGlass : Raycasting from a glass surface to point at physical objects in public exhibits ». In : *Proceedings of the IFIP Conference on Human-Computer Interaction - INTERACT'19*. T. 11748 LNCS. Springer Verlag, p. 249-269 (cf. p. 4).
- CAMBERLEIN, P. (2011). *Politiques et dispositifs du handicap en France*. 2e édition. Maxi fiches action sociale. Paris : Dunod, p. 1-160 (cf. p. 8).
- CASEY, S. M. (1978). « Cognitive mapping by the blind ». In : *Journal of visual impairment & blindness* 72, p. 297-301 (cf. p. 21).
- CASTAGNOLA, V., E. DESCAMPS, A. LECESTRE, L. DAHAN, J. REMAUD, L. G. NOWAK et C. BERGAUD (2015). « Parylene-based flexible neural probes with PEDOT coated surface for brain stimulation and recording ». In : *Biosensors and bioelectronics* 67, p. 450-457 (cf. p. 58).
- CHA, K., K. W. HORCH et R. A. NORMANN (1992). « Simulation of a phosphene-based visual field : visual acuity in a pixelized vision system. » In : *Annals of biomedical engineering* 20.4, p. 439-449 (cf. p. 60).
- CHA, K., K. W. HORCH, R. A. NORMANN et D. K. BOMAN (1992). « Reading speed with a pixelized vision system ». In : *Journal of the optical society of America A* 9.5, p. 673-677 (cf. p. 60).
- CHA, K., K. HORCH et R. NORMANN (1992). « Mobility performance with a pixelized vision system ». In : *Vision research* 32.7, p. 1367-1372 (cf. p. 60).
- CHADER, G. J., J. WEILAND et M. S. HUMAYUN (2009). « Artificial vision : needs, functioning, and testing of a retinal electronic prosthesis ». In : *Progress in brain research* 175, p. 317-332 (cf. p. 56-58, 71).
- CHEN, Y.-H., M. de BEECK, L. VANDERHEYDEN, E. CARRETTE, V. MIHAJLOVIĆ, K. VANSTREELS, B. GRUNDLEHNER, S. GADEYNE, P. BOON et C. VAN HOOF (2014). « Soft, comfortable polymer dry electrodes for high quality ECG and EEG recording ». In : *Sensors* 14.12, p. 23758-23780 (cf. p. 80).

- CHIBAUDEL, Q., W. JOHAL, B. ORIOLA, M. MACÉ, P. DILLENBOURG, V. TARTAS et C. JOUFFRAIS (2020). « "If you've gone straight, now, you must turn left" - Exploring the use of a tangible interface in a collaborative treasure hunt for people with visual impairments ». In : *Proceedings of the International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility - ASSETS'20*, p. 1-10 (cf. p. 44).
- CHOI, S. H. et B. N. WALKER (2010). « Digitizer auditory graph : making graphs accessible to the visually impaired ». In : *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems, Extended Abstracts - CHI'10*. ACM Press, p. 3445-3450 (cf. p. 32).
- CLAY, A., N. COUTURE, E. DECARSIN, M. DESAINTE-CATHERINE, P.-H. VULLIARD et J. LARRALDE (2012). « Movement to emotions to music : using whole body emotional expression as an interaction for electronic music generation ». In : *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression* (cf. p. 31).
- DASCHNER, R., U. GREPPMAIER, M. KOKELMANN, S. RUDORF, R. RUDORF, S. SCHLEEHAUF et W. WROBEL (2017). « Laboratory and clinical reliability of conformally coated subretinal implants ». In : *Biomedical microdevices* 19.7, p. 1-8 (cf. p. 56).
- DEGHANI, M., S. GOUWS, O. VINYALS, J. USZKOREIT et Ł. KAISER (2019). « Universal Transformers ». In : *Proceedings of the International Conference on Learning Representations - ICLR'19*, p. 1-23 (cf. p. 14).
- DENIS, G. (2014). « Apport de la vision par ordinateur dans l'utilisabilité des neuroprothèses visuelles ». Thèse de doctorat. Toulouse, p. 1-177 (cf. p. 52, 60, 66).
- DENIS, G., C. JOUFFRAIS, C. MAILHES et M. MACÉ (2014). « Simulated Prosthetic Vision : Improving text accessibility with retinal prostheses ». In : *Proceedings of the International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society - EMBS'14*, p. 1719-1722 (cf. p. 69, 73).
- DENIS, G., C. JOUFFRAIS, V. VERGNIEUX et M. MACÉ (2013). « Human faces detection and localization with simulated prosthetic vision ». In : *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems - WIP - CHI'13*, p. 61-66 (cf. p. 67, 73).
- DENIS, G., M. MACÉ et C. JOUFFRAIS (2012). « Simulated prosthetic vision : object recognition and localization approach ». In : *Proceedings of the International Conference on Neuroprosthetic Devices - ICNPD'12*, p. 40-41 (cf. p. 73).
- DENIS, M. (1996). « Imagery and the description of spatial configurations ». In : *Models of visuospatial cognition*. Sous la dir. de M. DE VEGA, M. INTONS-PETERSON, . PJOHNSON-LAIRD, M. DENIS et M. MARSCHARK. New York : Oxford University Press. Chap. 4, p. 128-197 (cf. p. 19).
- DENIS, M. (1997). « The description of routes : A cognitive approach to the production of spatial discourse ». In : *Current psychology of cognition* 16, p. 409-458 (cf. p. 18).

- DENIS, M. (2012). « La cognition spatiale ». In : *La psychologie cognitive*. Éditions de la Maison des sciences de l'homme. Chap. 3, p. 101-142 (cf. p. 18, 64).
- DOBELLE, W. H. et M. G. MLADJEVSKY (1974). « Phosphenes produced by electrical stimulation of human occipital cortex, and their application to the development of a prosthesis for the blind ». In : *The journal of physiology* 243.2, p. 553-576 (cf. p. 54).
- DODDS, A., C. HOWARTH et D. CARTER (1982). « The mental maps of the blind : The role of previous visual experience ». In : *Journal of visual impairment & blindness* 76, p. 5-12 (cf. p. 21).
- DUCASSE, J. (2017). « Tabletop tangible maps and diagrams for visually impaired users ». Thèse de doctorat. Toulouse, p. 1-326 (cf. p. 26).
- DUCASSE, J., M. MACÉ, B. ORIOLA et C. JOUFFRAIS (2018). « BotMap : Non-Visual Panning and Zooming with an Actuated Tabletop Tangible Interface ». In : *Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)* 25.4, p. 1-42 (cf. p. 41, 49).
- DUCASSE, J., M. MACÉ, M. SERRANO et C. JOUFFRAIS (2016). « Tangible Reels : Construction and Exploration of Tangible Maps by Visually Impaired Users ». In : *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI'16*. New York : ACM Press, p. 2186-2197 (cf. p. 40, 49).
- FARCY, R. et R. M. DAMASCHINI (2001). « Guidance-assist system for the blind ». In : *Proceedings of the Biomonitoring and Endoscopy Technologies*. T. 4158. SPIE, p. 209-214 (cf. p. 52).
- FARNUM, A. et G. PELLÉD (2020). « New vision for visual prostheses ». In : *Frontiers in neuroscience* 14.36, p. 1-11 (cf. p. 55).
- FITZMAURICE, G., H. ISHII et W. BUXTON (1995). « Bricks : Laying the foundations for graspable user interfaces ». In : *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI'95*, p. 442-449 (cf. p. 31).
- FOUGEYROLLAS, P., H. BERGERON, R. CLOUTIER, J. CÔTÉ et G. ST-MICHEL (1998). *Classification québécoise : Processus de production du handicap*. Québec : Réseau international sur le processus de production du handicap (cf. p. 9).
- FUSCO, G. et V. S. MORASH (2015). « The Tactile Graphics Helper : Providing audio clarification for tactile graphics using machine vision ». In : *Proceedings of the International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility - ASSETS'15*. ACM Press, p. 97-106 (cf. p. 27).
- GALIANO, A.-R. (2013). *Psychologie cognitive et clinique du handicap visuel*. De Boeck, p. 1-255 (cf. p. 5).
- GIRAUD, S., A. BROCK, M. MACÉ et C. JOUFFRAIS (2017). « Map learning with a 3D printed interactive small-scale model : Improvement of space and text memorization

- in visually impaired students ». In : *Frontiers in psychology* 8.930, p. 1-10 (cf. p. [4](#), [37](#), [49](#)).
- GOLLEDGE, R. G. (2004). « Spatial cognition ». In : *Encyclopedia of applied psychology*. Amsterdam : Elsevier, p. 443-452 (cf. p. [19](#)).
- GÖTZELMANN, T. (2014). « Interactive tactile maps for blind people using smartphones' integrated cameras ». In : *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces - ITS '14*. ACM Press, p. 381-385 (cf. p. [27](#)).
- GÖTZELMANN, T. (2016). « LucentMaps : 3D printed audiovisual tactile maps for blind and visually impaired people ». In : *Proceedings of the International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility - ASSETS'16*. Association for Computing Machinery, Inc, p. 81-90 (cf. p. [27](#)).
- GULATI, A., C.-C. CHIU, J. QIN, J. YU, N. PARMAR, R. PANG, S. WANG, W. HAN, Y. WU, Y. ZHANG et al. (2020). « Conformer : Convolution-augmented Transformer for speech recognition ». In : *Arxiv*, p. 1-5 (cf. p. [4](#), [15](#)).
- HAMMOND, D. C. (2005). « Neurofeedback treatment of depression and anxiety ». In : *Journal of adult development* 12.2-3, p. 131-137 (cf. p. [78](#)).
- HAN, N., S. SRIVASTAVA, A. XU, D. KLEIN et M. BEYELER (2021). « Deep learning-based scene simplification for bionic vision ». In : *ArXiv*, p. 1-10 (cf. p. [73](#)).
- HARTLAGE, L. C. (1969). « Verbal tests of spatial conceptualization ». In : *Journal of experimental psychology* 80.1, p. 180-182 (cf. p. [21](#)).
- HE, K., X. ZHANG, S. REN et J. SUN (2015). « Deep residual learning for image recognition ». In : *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - CVPR'15*. IEEE Computer Society, p. 770-778 (cf. p. [14](#)).
- HEITGER, M., M. MACÉ, J. JASTORFF, S. SWINNEN et G. ORBAN (2012). « Cortical regions involved in the observation of bimanual actions ». In : *Journal of neurophysiology* 108.9, p. 2594-2611 (cf. p. [3](#)).
- HOLLINS, M. et E. KELLEY (1988). « Spatial updating in blind and sighted people ». In : *Attention, perception & psychophysics* 43, p. 380-388 (cf. p. [21](#)).
- HOWARD, T., M. MARCHAL, A. LÉCUYER et C. PACCHIEROTTI (2020). « PUMAH : Pan-Tilt Ultrasound Mid-Air Haptics for larger interaction workspace in virtual reality ». In : *IEEE Transactions on haptics* 13.1, p. 38-44 (cf. p. [82](#)).
- HOYET, L., F. ARGELAGUET, C. NICOLE et A. LÉCUYER (2016). « "Wow! I have six fingers!" : Would you accept structural changes of your hand in VR ? » In : *Frontiers robotics AI* 3.27, p. 1-12 (cf. p. [78](#), [79](#)).
- HUMAYUN, M. S., J. D. DORN, L. da CRUZ, G. DAGNELIE, J.-A. SAHEL, P. E. STANGA, A. V. CIDECIYAN, J. L. DUNCAN, D. ELIOTT, E. FILLEY et al. (2012). « Interim



- results from the international trial of Second Sight's visual prosthesis ». In : *Ophthalmology* 119.4, p. 779-788 (cf. p. [55](#), [60](#)).
- HUMAYUN, M. S., E. de JUAN, G. DAGNELIE, R. J. GREENBERG, R. H. PROPST et D. H. PHILLIPS (1996). « Visual perception elicited by electrical stimulation of retina in blind humans ». In : *Archives of ophthalmology* 114.1, p. 40-46 (cf. p. [54](#), [55](#)).
- ISHII, H. et B. ULLMER (1997). « Tangible bits : towards seamless interfaces between people, bits and atoms ». In : *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI'97*. ACM, p. 234-241 (cf. p. [31](#)).
- JACOB, R. J. K., A. GIROUARD, L. M. HIRSHFIELD, M. S. HORN, O. SHAER, E. T. SOLOVEY et J. ZIGELBAUM (2008). « Reality-based interaction : a framework for post-WIMP interfaces ». In : *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI'08*, p. 201-210 (cf. p. [31](#)).
- JOHNSON-LAIRD, P. N. (2004). « The history of mental models ». In : *Psychology of reasoning : theoretical and historical perspectives*. Sous la dir. de K. I. MANKTELOW et M. C. CHUNG. Psychology Press, p. 179-212 (cf. p. [18](#)).
- JUURMAA, J. (1973). « Transportation in mental spatial manipulation : A theoretical analysis ». In : *American foundation for the Blind research bulletin* 26, p. 87-143 (cf. p. [21](#)).
- KAISER, D. A. et S. OTHMER (2000). « Effect of neurofeedback on variables of attention in a large multi-center trial ». In : *Journal of neurotherapy* 4.1, p. 5-15 (cf. p. [78](#)).
- KAMMOUN, S., C. JOUFFRAIS, T. GUERREIRO, H. NICOLAU et J. JORGE (2012). « Guiding blind people with haptic feedback ». In : *Proceedings of the International Workshop on Frontiers in Accessibility for Pervasive Computing - Pervasive'12*. Newcastle, UK, p. 1-3 (cf. p. [4](#)).
- KAMMOUN, S., M. MACÉ, B. ORIOLA et C. JOUFFRAIS (2012). « Towards a geographic information system facilitating navigation of visually impaired users ». In : *Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs - ICCHP'12. Lecture Notes in Computer Science*. Linz : Springer-Verlag, p. 521-528 (cf. p. [22](#), [27](#)).
- KAMMOUN, S., G. PARSEIHIAN, O. GUTIERREZ, A. BRILHAULT, A. SERPA, M. RAYNAL, B. ORIOLA, M. MACÉ, M. AUVRAY, M. DENIS et al. (2012). « Navigation and space perception assistance for the visually impaired : The NAVIG project ». In : *BioMedical engineering and research* 33.2, p. 182-189 (cf. p. [27](#)).
- KAY, L. (1974). « A sonar aid to enhance spatial perception of the blind : Engineering design and evaluation ». In : *Radio and electronic engineer* 44.11, p. 605-627 (cf. p. [52](#)).
- KELLY, J. W. et T. P. MCNAMARA (2010). « Reference frames during the acquisition and development of spatial memories ». In : *Cognition* 116.3, p. 409-420 (cf. p. [19](#)).

- KERROUMI, B., A.-C. STROMENGER et N. HERACLIDE (2021). *Rapport sur les personnes déficientes visuelles face aux évolutions du numérique dans la formation et l'emploi en Europe*. Rapp. tech. Association Paul Guinot (cf. p. [14](#)).
- KIIBLER, A., B. KOTCHOUBEY, J. KAISER, J. R. WOLPAW et N. BIRBAUMER (2001). « Brain-Computer communication : Unlocking the Locked In ». In : *Psychological bulletin* 127.3, p. 358-375 (cf. p. [80](#)).
- KILTENI, K., J.-M. NORMAND, M. V. SANCHEZ-VIVES et M. SLATER (2012). « Extending body space in immersive virtual reality : A very long arm illusion ». In : *PLoS ONE* 7.7, e40867 (cf. p. [77](#)).
- KLATZKY, R., N. GIUDICE, C. BENNETT et J. LOOMIS (2014). « Touch-screen technology for the dynamic display of -2D spatial information without vision : promise and progress ». In : *Multisensory research* 27.5-6, p. 359-378 (cf. p. [22](#)).
- KLATZKY, R. L. (1998). « Allocentric and egocentric spatial representations : Definitions, distinctions, and interconnections ». In : *Spatial cognition*, p. 1-17 (cf. p. [19](#)).
- KOSSLYN, S. M., H. L. PICK et G. R. FARIELLO (1974). « Cognitive maps in children and men ». In : *Child development* 45, p. 707-716 (cf. p. [19](#)).
- KOZAI, T., A. JAQUINS-GERSTL, A. VAZQUEZ, A. MICHAEL et X. CUI (2015). « Brain tissue responses to neural implants impact signal sensitivity and intervention strategies ». In : *ACS Chemical neuroscience* 6.1, p. 48-67 (cf. p. [59](#)).
- KRIZHEVSKY, A., I. SUTSKEVER et G. E. HINTON (2012). « ImageNet classification with deep convolutional neural networks ». In : *Proceedings of the Advances in neural information processing systems - NeurIPS'12*. T. 25. Association for Computing Machinery, p. 1097-1105 (cf. p. [14](#), [15](#)).
- KUBICKI, S., M. WOLFF, S. LEPREUX et C. KOLSKI (2015). « RFID interactive tabletop application with tangible objects : Exploratory study to observe young children' behaviors ». In : *Personal and ubiquitous computing* 19.8, p. 1259-1274 (cf. p. [37](#)).
- LAMOTTE, R. et J. WHITEHOUSE (1986). « Tactile detection of a dot on a smooth surface : peripheral neural events ». In : *Journal of neurophysiology* 56.4, p. 1109-1128 (cf. p. [22](#)).
- LANDAU, B. (2002). « Spatial cognition ». In : *Encyclopedia of the human brain*. Sous la dir. de V. RAMACHANDRAN. Academic Press, p. 395-418 (cf. p. [18](#)).
- LANDAU, S. et K. GOURGEY (2001). « Development of a talking tactile tablet ». In : *Information technology and disabilities* 7.2 (cf. p. [26](#)).
- LANE, N. D., S. BHATTACHARYA, A. MATHUR, P. GEORGIEV, C. FORLIVESI et F. KAWSAR (2017). « Squeezing deep learning into mobile and embedded devices ». In : *Pervasive computing* 16.3, p. 82-88 (cf. p. [14](#), [61](#)).

- LE GOC, M., L. KIM, A. PARSAEI, J.-D. FEKETE, P. DRAGICEVIC et S. FOLLMER (2016). « Zooids : Building blocks for swarm user interfaces ». In : *Proceedings of the Symposium on User Interface Software and Technology - UIST'16*, p. 1-13 (cf. p. 41).
- LEBAT, C. (2018). « Les personnes en situation de handicap sensoriel dans les musées : réalités d'accueil, expériences de visite et trajectoires identitaires ». Thèse de doctorat. Paris, p. 1-512 (cf. p. 11).
- LÉCUYER, A., F. LOTTE, R. B. REILLY, R. LEEB, M. HIROSE et M. SLATER (2008). « Brain-computer interfaces, virtual reality, and videogames ». In : *Computer* 41.10, p. 66-72 (cf. p. 76).
- LEPREUX, S., J. CASTET, N. COUTURE, E. DUBOIS, C. KOLSKI, S. KUBICKI, V. MAQUIL et G. RIVIERE (2016). « Interaction tangible sur table, définitions et modèles ». In : *Journal d'Interaction Personne-Système* 5.1, p. 1-21 (cf. p. 31).
- LESPINET-NAJIB, V. et C. BELIO (2013). « Classification des handicaps : enjeux et controverses ». In : *Hermès* 66.2, p. 104-110 (cf. p. 9, 10).
- LIOI, G., S. BUTET, M. FLEURY, E. BANNIER, A. LÉCUYER, I. BONAN et C. BARILLOT (2020). « A multi-target motor imagery training using bimodal EEG-fMRI neurofeedback : A pilot study in chronic stroke patients ». In : *Frontiers in human neuroscience* 14, p. 1-13 (cf. p. 81).
- LIU, S., G. TIAN et Y. XU (2019). « A novel scene classification model combining ResNet based transfer learning and data augmentation with a filter ». In : *Neurocomputing* 338, p. 191-206 (cf. p. 15).
- LIU, Y. et L. JIN (2017). « Deep matching prior network : toward tighter multi-oriented text detection ». In : *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - CVPR'17*, p. 3454-3461 (cf. p. 15).
- LOOMIS, J. M., R. G. GOLLEDGE, R. L. KLATZKY, J. M. SPEIGLE et J. TIETZ (1994). « Personal guidance system for the visually impaired ». In : *Proceedings of the International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility - ASSETS'94*, p. 85-91 (cf. p. 52).
- LOZANO, A., J. SUÁREZ, C. SOTO-SÁNCHEZ, J. GARRIGÓS, J. MARTÍNEZ-ÁLVAREZ, J. FERRÁNDEZ et E. FERNÁNDEZ (2020). « Neurolight : A deep learning neural interface for cortical visual prostheses ». In : *International journal of neural systems* 30.9 (cf. p. 73).
- LUONG, T., N. MARTIN, A. RAISON, F. ARGELAGUET, J.-M. DIVERREZ et A. LÉCUYER (2020). « Towards real-time recognition of users' mental workload using integrated physiological sensors into a VR HMD ». In : *Proceedings of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality - ISMAR'20*, p. 1-13 (cf. p. 80).
- MACÉ, M., S. BARDOT, A. BROCK, E. BRULÉ, J. DUCASSE, S. GIRAUD, B. ORIOLA, M. SERRANO, G. DENIS et C. JOUFFRAIS (2019). « New technologies for spatial

- learning in visually impaired people ». In : *ANAE - Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant* 31.159 (cf. p. 49).
- MACÉ, M., A. DELORME, G. RICHARD et M. FABRE-THORPE (2010). « Spotting animals in natural scenes : Efficiency of humans and monkeys at very low contrasts. » In : *Animal cognition* 13.3, p. 405-418 (cf. p. 3).
- MACÉ, M., V. GUIVARCH, G. DENIS et C. JOUFFRAIS (2015). « Simulated Prosthetic Vision : The benefits of computer-based object recognition and localization ». In : *Artificial organs* 39.7, E102-E113 (cf. p. 64, 73).
- MACÉ, M., O. LEVIN, K. ALAERTS, J. ROTHWELL et S. SWINNEN (2008). « Corticospinal facilitation following prolonged proprioceptive stimulation by means of passive wrist movement. » In : *Journal of clinical neurophysiology* 25.4, p. 202-209 (cf. p. 3).
- MACÉ, M., G. RICHARD, A. DELORME et M. FABRE-THORPE (2005). « Rapid categorization of natural scenes in monkeys : target predictability and processing speed. » In : *Neuroreport* 16.4, p. 349-354 (cf. p. 3).
- MACÉ, M., S. J. THORPE et M. FABRE-THORPE (2005). « Rapid categorization of achromatic natural scenes : how robust at very low contrasts? » In : *The European journal of neuroscience* 21.7, p. 2007-2018 (cf. p. 3).
- MANSHAD, M. S., E. PONTELLI et S. J. MANSHAD (2012). « Trackable Interactive Multimodal Manipulatives : Towards a tangible user environment for the Blind ». In : *Proceedings of the International Conference on Computers Helping People with Special Needs - ICCHP'12. Lecture Notes in Computer Science* (cf. p. 32).
- MAZEREAU, P. (2006). « Les figures historiques de la « déviance » scolaire entre discours professionnels et savants ». In : *Le français aujourd'hui* 152.1, p. 9-18 (cf. p. 13).
- MCGOOKIN, D., E. ROBERTSON et S. S. BREWSTER (2010). « Clutching at straws : Using tangible interaction to provide non visual access to graphs ». In : *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI'10*. ACM Press, p. 1715-1724 (cf. p. 32).
- MEIJER, P. B. (1992). « An experimental system for auditory image representations ». In : *IEEE Transactions on biomedical engineering* 39, p. 112-121 (cf. p. 53).
- MEILINGER, T. et G. VOSGERAU (2010). « Putting egocentric and allocentric into perspective ». In : *Spatial Cognition'10. Lecture Notes in Computer Science*. T. 6222 LNCS. Springer, p. 207-221 (cf. p. 19).
- MERABET, L. B., L. BATTELLI, S. OBRETEANOVA, S. MAGUIRE, P. MEIJER et A. PASCUAL-LEONE. (2009). « Functional recruitment of visual cortex for sound encoded object identification in the blind ». In : *Neuroreport* 20, p. 132-138 (cf. p. 54).

- MIELE, J. A., S. LANDAU et D. GILDEN (2006). « Talking TMAP : Automated generation of audio-tactile maps using Smith-Kettlewell's TMAP software ». In : *British journal of visual impairment* 24.2, p. 93-100 (cf. p. 26).
- MILLAR, S. (1994). *Understanding and representing space : theory and evidence from studies with blind and sighted children*. Oxford : Oxford University Press (cf. p. 21).
- MIYAOKA, T., T. MANO et M. OHKA (1999). « Mechanisms of fine-surface-texture discrimination in human tactile sensation ». In : *The Journal of the acoustical society of America* 105.4, p. 2485-2492 (cf. p. 22).
- MONTAGNIÉ, G. (2007). *L'inclusion des personnes aveugles et malvoyantes dans le monde d'aujourd'hui*. Rapp. tech. Sénat, p. 1-143 (cf. p. 13, 14).
- MONTELLO, R. (1998). « A new framework for understanding the acquisition of spatial knowledge in large-scale environments ». In : *Spatial and temporal reasoning in Geographic Information System*. Sous la dir. de J. EGENHOFER et G. GOLLEDGE. New York : Oxford University Press, p. 143-154 (cf. p. 20).
- MORASH, V. S., A. E. CONNELL PENSKEY, S. T. W. TSENG et J. A. MIELE (2014). « Effects of using multiple hands and fingers on haptic performance in individuals who are blind ». In : *Perception* 43.6, p. 569-588 (cf. p. 23).
- MOSQUERON, R., J. DUBOIS et M. PAINDAVOINE (2007). « High-speed smart camera with high resolution ». In : *EURASIP Journal on Embedded Systems*, p. 1-16 (cf. p. 73).
- MULET, J., L. DIMITROV, J. DUCASSE, M. MACÉ, M. RAYNAL, B. ORIOLA, V. TARTAS, J. LEMARIÉ et C. JOUFFRAIS (2020). « Evaluation d'un dispositif audio-tangible pour l'apprentissage spatial chez les enfants déficients visuels ». In : *Actes de la 11ème conférence handicap (HANDICAP 2020)*, p. 1-6 (cf. p. 36, 49).
- NAGEL, S. et M. SPÜLER (2019). « World's fastest brain-computer interface : Combining EEG2Code with deep learning ». In : *PLoS ONE* 14.9, e0221909 (cf. p. 80).
- NAUMANN, J. (2012). *Search for paradise : A patient's account of the artificial vision experiment*. Xlibris, p. 1-580 (cf. p. 54).
- NELSON, L. A. (2007). « The role of biofeedback in stroke rehabilitation : Past and future directions ». In : *Topics in stroke rehabilitation* 14.4, p. 59-66 (cf. p. 78).
- NORMANN, R. A., E. M. MAYNARD, P. J. ROUSCHE et D. J. WARREN (1999). « A neural interface for a cortical vision prosthesis ». In : *Vision research* 39.15, p. 2577-2587 (cf. p. 55).
- O'MODHRAIN, S., N. A. GIUDICE, J. A. GARDNER et G. E. LEGGE (2015). « Designing media for visually-impaired users of refreshable touch displays : Possibilities and pitfalls ». In : *IEEE transactions on haptics* 8.3, p. 248-257 (cf. p. 23).

- OMS (2001). *Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé (CIH)*. Rapp. tech. Genève : OMS, p. 1-304 (cf. p. 9).
- OMS (2020). *Rapport mondial sur la vision*. Rapp. tech. Genève : OMS, p. 1-192 (cf. p. 5, 6).
- OTTINK, L., M. HOOGENDONK, C. F. DOELLER, T. M. VAN DER GEEST et R. J. A. VAN WEZEL (2021). « Cognitive map formation through haptic and visual exploration of tactile city-like maps ». In : *Scientific reports* 11.1, p. 1-12 (cf. p. 21).
- PALANKER, D., Y. LE MER, S. MOHAND-SAID, M. MUQIT et J. A. SAHEL (2020). « Photovoltaic restoration of central vision in atrophic age-related macular degeneration ». In : *Ophthalmology* 127.8, p. 1097-1104 (cf. p. 57).
- PANETSOS, F., A. SANCHEZ-JIMENEZ, E. D.-d. CERIO, I. DIAZ-GUEMES et F. M. SANCHEZ (2011). « Consistent phosphenes generated by electrical microstimulation of the visual thalamus. An experimental approach for thalamic visual neuroprostheses. » In : *Frontiers in neuroscience* 5, p. 84 (cf. p. 54).
- PARKES, D. (1988). « “NOMAD” : An audio-tactile tool for the acquisition, use and management of spatially distributed information by partially sighted and blind persons ». In : *Proceedings of the International Conference on Maps and Graphics for Visually Disabled People*, p. 24-29 (cf. p. 26).
- PASSINI, R., G. PROULX et C. RAINVILLE (1990). « The spatio-cognitive abilities of the visually impaired population ». In : *Environment and behavior* 22, p. 91-118 (cf. p. 21).
- PECCHIOLI, M., E. DUBOIS, P. IRANI et M. SERRANO (2019). « Investigating screen reachability on an articulated dual-display smartphone ». In : *Proceedings of the IFIP Conference on Human-Computer Interaction - INTERACT'19*. T. 11748 LNCS. Springer Verlag, p. 476-485 (cf. p. 4).
- PERELMAN, G., M. SERRANO, C. BORTOLASO, C. PICARD, M. DERRAS et E. DUBOIS (2019). « Combining tablets with smartphones for data analytics ». In : *Proceedings of the IFIP Conference on Human-Computer Interaction - INTERACT'19*. T. 11749 LNCS. Springer Verlag, p. 439-460 (cf. p. 4).
- PÉREZ FORNOS, A., J. SOMMERHALDER, L. da CRUZ, J. A. SAHEL, S. MOHAND-SAID, F. HAFEZI et M. PELIZZONE (2012). « Temporal properties of visual perception on electrical stimulation of the retina. » In : *Investigative ophthalmology & visual science* 53.6, p. 2720-2731 (cf. p. 59, 72).
- PFEFFER, S. et H. WOLF (2020). « Arthropod spatial cognition ». In : *Animal cognition* 23.6, p. 1041-1049 (cf. p. 18).
- PIAGET, J. (1977). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant (9ème édition)*. Paris : Delachaux et Nieslé, p. 1-370 (cf. p. 19).

- PICINALI, L., A. AFONSO, M. DENIS et B. KATZ (2014). « Exploration of architectural spaces by blind people using auditory virtual reality for the construction of spatial knowledge ». In : *International journal of Human-Computer studies* 72.4, p. 393-407 (cf. p. 21).
- QUESNOT, T. et S. ROCHE (2014). « Measure of landmark semantic salience through geosocial data streams ». In : *ISPRS International journal of geographic information* 4, p. 1-31 (cf. p. 20).
- RAN, L., S. HELAL et S. MOORE (2004). « Drishti : an integrated indoor/outdoor blind navigation system and service ». In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications - PerCom'04*, p. 23-30 (cf. p. 52).
- REBSAMEN, B., E. BURDET, C. GUAN, H. ZHANG, C. L. TEO, Q. ZENG, M. ANG et C. LAUGIER (2006). « A brain-controlled wheelchair based on P300 and path guidance ». In : *Proceedings of the IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics - BioRob'06*. T. 2006, p. 1101-1106 (cf. p. 80).
- REN, S., K. HE, R. GIRSHICK et J. SUN (2017). « Faster R-CNN : Towards real-time object detection with region proposal networks ». In : *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 39.6, p. 1137-1149 (cf. p. 15).
- RIESER, J. J., D. A. GUTH et E. W. HILL (1982). « Mental processes mediating independent travel : Implications for orientation and mobility ». In : *Journal of visual impairment & blindness* 76, p. 213-218 (cf. p. 21).
- RIESER, J. J., D. A. GUTH et E. W. HILL (1986). « Sensitivity to perspective structure while walking without vision ». In : *Perception* 15, p. 173-88 (cf. p. 21).
- ROBERT, P.-Y. (2017). *Déficiences visuelles*. Elsevier-Masson, p. 1-260 (cf. p. 5).
- ROSENFELD, J. V., Y. T. WONG, E. YAN, J. SZLAWSKI, A. MOHAN, J. C. CLARK, M. ROSA et A. LOWERY (2020). « Tissue response to a chronically implantable wireless intracortical visual prosthesis (Gennaris array) ». In : *Journal of neural engineering* 17.4, p. 46001 (cf. p. 55).
- SAIDI, H., M. SERRANO, P. IRANI et E. DUBOIS (2017). « TDome : A touch-enabled 6DOF interactive device for multi-display environments ». In : *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI'17*. Association for Computing Machinery, p. 5892-5904 (cf. p. 4).
- SAIDI, H., M. SERRANO, P. IRANI, C. HURTER et E. DUBOIS (2019). « On-Body tangible interaction : Using the body to support tangible manipulations for immersive environments ». In : *Proceedings of the IFIP Conference on Human-Computer Interaction - INTERACT'19*. T. 11749 LNCS. Springer Verlag, p. 471-492 (cf. p. 4).

- SANCHEZ, J. (2005). « Évaluation et compensation du handicap en France ». In : *Santé, société et solidarité* 4.2, p. 95-104 (cf. p. 9).
- SANDER, M.-S., M.-C. BOURNOT, F. LELIÈVRE et A. TALLEC (2005). *La population en situation de handicap visuel en France*. Rapp. tech. Observatoire régional de la santé des Pays de la Loire, p. 1-166 (cf. p. 11, 69).
- SAUNIER, V., E. FLAHAUT, M. C. BLATCHÉ, C. BERGAUD et A. MAZIZ (2020). « Carbon nanofiber-PEDOT composite films as novel microelectrode for neural interfaces and biosensing ». In : *Biosensors and bioelectronics* 165, p. 112413 (cf. p. 58).
- SAUZIN, D., N. VIGOUROUX et F. VELLA (2017). « Usability of JACO arm interfaces designed with a user-centred design method ». In : *Studies in health technology and informatics* 242, p. 573-582 (cf. p. 4).
- SCHMIDT, E. M., M. J. BAK, F. T. HAMBRECHT, C. V. KUFTA, D. K. O'ROURKE et P. VALLABHANATH (1996). « Feasibility of a visual prosthesis for the blind based on intracortical microstimulation of the visual cortex ». In : *Brain* 119 ( Part, p. 507-522 (cf. p. 55).
- SCHNEIDER, J. et T. STROTHOTTE (2000). « Constructive exploration of spatial information by blind users ». In : *Proceedings of the International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility - ASSETS'00*. ACM Press, p. 188-192 (cf. p. 32).
- SHAER, O. et E. HORNECKER (2009). « Tangible User Interfaces : Past, Present, and Future Directions ». In : *Foundations and trends in Human-Computer Interaction* 3.1-2, p. 1-137 (cf. p. 31).
- SHAER, O., N. LELAND, E. H. CALVILLO-GAMEZ et R. J. K. JACOB (2004). « The TAC paradigm : specifying tangible user interfaces ». In : *Personal and ubiquitous computing* 8.5, p. 359-369 (cf. p. 31).
- SHAMS, L. et SEITZ A. (2008). « Benefits of multisensory learning ». In : *Trends in cognitive sciences* 12.11, p. 411-417 (cf. p. 47).
- SHARLIN, E., B. WATSON, Y. KITAMURA, D. RORABECK, R. LEDERER, S. SUTPHEN, M. TAKIMOTO et F. KISHINO (2004). « The Tangible Pathfinder : design of a way-finding trainer for the visually impaired ». In : *Proceedings of Graphics Interface*, p. 2-3 (cf. p. 32).
- SIEGEL, A. et S. WHITE (1975). « The development of spatial representations of large-scale environments ». In : *Advances in child development and behavior* 10.C, p. 9-55 (cf. p. 20).
- SIEGLER, R. (2000). *Enfant et raisonnement. Le développement cognitif de l'enfant*. Bruxelles : De Boeck, p. 1-444 (cf. p. 19).



- SIMON, F., A. ROUDAUT, P. IRANI et M. SERRANO (2019). « Finding information on non-rectangular interfaces ». In : *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI'19*. T. 102. Association for Computing Machinery, p. 1-8 (cf. p. 4).
- STRIEM-AMIT, E., O. DAKWAR KAWAR, U. HERTZ, P. MEIJER, W. M. STERN, A. PASCUAL-LEONE et A. AMEDI (2016). « The plasticity of neural network sensory-substitution object shape recognition ». In : p. 229-236 (cf. p. 54).
- STRONKS, H. C. et G. DAGNELIE (2014). « The functional performance of the Argus II retinal prosthesis ». In : *Expert review of medical devices* 11.1, p. 23-30 (cf. p. 57).
- TAN, M. et Q. V. LE (2019). « EfficientNet : Rethinking model scaling for convolutional neural networks ». In : *Proceedings of the International Conference on Machine Learning - ICML'19*, p. 10691-10700 (cf. p. 15).
- TAYLOR, B., A. DEY, D. SIEWIOREK et A. SMILAGIC (2016). « Customizable 3D printed tactile maps as interactive overlays ». In : *Proceedings of the International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility - ASSETS'16*. Association for Computing Machinery, Inc, p. 71-79 (cf. p. 27).
- THINUS-BLANC, C. et F. GAUNET (1997). « Representation of space in blind persons : vision as a spatial sense ? » In : *Psychological bulletin* 121, p. 20-42 (cf. p. 21).
- THUERING, M. et S. MAHLKE (2007). « Usability, aesthetics and emotions in human-technology interaction ». In : *International journal of psychology* 42.4, p. 253-264 (cf. p. 42).
- TOLMAN, E. C. (1948). « Cognitive maps in rats and men ». In : *Psychological review* 55.4, p. 189-208 (cf. p. 18).
- TROYK, P. R. (2017). « The intracortical visual prosthesis project ». In : *Artificial vision*, p. 203-214 (cf. p. 55).
- ULLMER, B. et H. ISHII (2001). « Emerging frameworks for tangible user interfaces ». In : *IBM Systems Journal* 39.3.4, p. 915-931 (cf. p. 31).
- UNGAR, S., M. BLADES et C. SPENCE (1995). « Visually impaired children's strategies for memorising a map ». In : *British journal of visual impairment* 13.1, p. 27-32 (cf. p. 21).
- VAN GEERT, P. (1998). « A dynamic systems model of basic developmental mechanisms : Piaget, Vygotsky, and beyond ». In : *Psychological review* 105.4, p. 634-677 (cf. p. 20).
- VERGNIEUX, V. (2015). « Naviguer en vision prothétique simulée : apport de la vision par ordinateur pour augmenter les rendus prothétiques de basse résolution ». Thèse de doctorat. Toulouse, p. 1-216 (cf. p. 52, 69).

- VERGNIEUX, V., M. MACÉ et C. JOUFFRAIS (2014). « Wayfinding with Simulated Prosthetic Vision : Performance comparison with regular and structure-enhanced renderings ». In : *Proceedings of the International conference on Engineering in Medicine and Biology Society - EMBC'14*, p. 2585-2588 (cf. p. 70, 73).
- VERGNIEUX, V., M. MACÉ et C. JOUFFRAIS (2017). « Simplification of visual rendering in simulated prosthetic vision facilitates navigation ». In : *Artificial organs* 41.9, p. 852-861 (cf. p. 71, 73).
- VON SENDEN, M. (1962). « Space and sight : The perception of space and shape in the congenitally Blind before and after operation ». In : *Philosophy*. T. 37. 139. Cambridge University Press, p. 348 (cf. p. 21).
- WEISEN, M. (2015). *L'accessibilité culturelle et la question du droit des publics aveugles des musées de toucher des œuvres authentiques*. Rapp. tech. Mémoire M2 - Situation de Handicap Éducation Inclusive, Université Lumière Lyon 2 (cf. p. 10).
- WEYGAND, Z. (2003). *Vivre sans voir. Les aveugles dans la société française, du Moyen Âge au siècle de Louis Braille*. Paris : Créaphis, p. 1-375 (cf. p. 5).
- WITTENBORN, J., X. ZHANG, C. FEAGAN, W. CROUSE, S. SHRESTHA, A. KEMPER, T. HOERGER et J. SAADDINE (2013). « The economic burden of vision loss and eye disorders among the United States population younger than 40 years ». In : *Ophthalmology* 120.9, p. 1728-1735 (cf. p. 12).
- WOLPAW, J. R., N. BIRBAUMER, D. J. MCFARLAND, G. PFURTSCHELLER et T. M. VAUGHAN (2002). « Brain-computer interfaces for communication and control ». In : *Clinical neurophysiology* 113.6, p. 767-791 (cf. p. 80).
- YE, J., Z. CHEN, J. LIU et B. DU (2020). « TextFuseNet : Scene text detection with richer fused features ». In : *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence - IJCAI'20*. International Joint Conferences on Artificial Intelligence, p. 516-522 (cf. p. 15).
- ZHANG, Y., J. QIN, D. S. PARK, W. HAN, C.-C. CHIU, R. PANG, Q. V. LE et Y. WU (2020). « Pushing the limits of semi-supervised learning for automatic speech recognition ». In : *Arxiv*, p. 1-11 (cf. p. 15).
- ZHOU, B., A. LAPEDRIZA, J. XIAO, A. TORRALBA et A. OLIVA (2014). « Learning deep features for scene recognition using places database ». In : *Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems - NIPS'14* 27 (cf. p. 15).

# Curriculum Vitæ

## Marc Macé

Chercheur CNRS CR1

Affiliation : IRIT (UMR 5505) - ELIPSE | CNRS - UPS

118, route de Narbonne | 31062 Toulouse Cedex 9 | France

Né le 28 septembre 1977 (44 ans)

🌐 [www.irit.fr/~Marc.Mace](http://www.irit.fr/~Marc.Mace) ✉ [Marc.Mace@irit.fr](mailto:Marc.Mace@irit.fr) ☎ 05 61 55 63 05

Ecole doctorale de rattachement :  
Mathématiques Informatique Télécommunications (MITT)

Doctorat obtenu le 3 mai 2006 à Toulouse

## 1 Parcours universitaire

---

Sept. 2001 - mai 2006 :

Thèse de neurosciences au CerCo à l'UPS, Toulouse

Sept. 2000 - juil. 2001 :

Major du DEA NCC à l'UPS, Toulouse, mention très bien

Sept. 1999 - juil. 2000 :

Maîtrise de biologie, option neurosciences à l'UPS, Toulouse, mention bien

Janv. 1998 - juin 1999 :

Licence\* de biologie et physiologie à l'UPS, Toulouse, mention assez bien

\*(un semestre à l'"University of North Carolina", Chapel Hill (États-Unis))

Sept. 1995 - déc. 1997 :

DEUG de biologie générale à l'UPS

## 2 Parcours professionnel

---

Depuis oct. 2010 :

Chercheur (CR1) dans l'équipe ELIPSE (IHM) à l'IRIT à Toulouse.

Thématiques de recherche : conception, optimisation et évaluation de technologies de suppléance et d'assistance pour les personnes déficientes visuelles.

### 3. ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT ET ENCADREMENT

---

Déc. 2009 - Sept. 2010 :

Post-doctorat dans l'équipe IHCS à l'IRIT sur le développement d'un bracelet électronique d'assistance à l'autonomie chez les personnes âgées dépendantes.

Déc. 2008 - Nov. 2009 :

Post-doctorat dans l'équipe IHCS à l'IRIT sur la simulation de neuroprothèses visuelles pour les personnes non-voyantes.

Avril 2006 - Nov. 2008 :

Postdoctorat au "Motor Control Lab" à l'université KULeuven en Belgique sur la coordination bi-manuelle, l'apprentissage moteur et la perception de mouvements.

Sept. 2001 - Avril 2006 :

Thèse au CerCo à Toulouse sur la catégorisation visuelle chez l'homme et le singe.

### Formations suivies

- 2014 - Encadrement de thèse - 2 jours
- 2015 - Répondre à un appel à projet - 2 jours
- 2015 - Formation à R : initiation - 2 jours
- 2016 - Formation à R : application en statistiques - 2 jours
- 2020 - Intégrité scientifique et médiation des savoirs

## 3 Activités d'enseignement et encadrement

---

- 2012-2017 : Cours sur les neuroprothèses et TP dans le master NCC, UPS
- 2012-2013 : Conférencier invité dans le master de neuropsychologie, UPS
- 2003-2005 : Cours de psychophysologie en 1<sup>ère</sup> année d'orthoptie, UPS-Médecine

### • 3 co-encadrements de doctorats soutenus :

Julie Ducasse en Informatique (IHM) : 2014-2017

Cartes et graphiques sur tables interactives pour les utilisateurs déficients visuels  
Co-encadrement : Macé (50 %) | C. Jouffrais (HDR - 50 %)

Victor Vergnien en Informatique (IHM) : 2012-2015

Navigation en vision prothétique simulée  
Co-encadrement : Macé (50 %) | C. Jouffrais (HDR - 50 %)

Grégoire Denis en Informatique (IHM) : 2011-2014

Apport de la vision par ordinateur dans l'utilisabilité des neuroprothèses visuelles  
Co-encadrement : Macé (50 %) | C. Mailhes (HDR - 25 %) | C. Jouffrais (25 %)

- 11 encadrements de stage de Master 2 :

Nom	Discipline	Intitulé formation	Année
Elen Sargsyan	Sciences cognitives	M2 Sciences cognitives (Bordeaux)	2021
Mathilde Cazes	Sciences cognitives	M2 Sciences cognitives (Bordeaux)	2021
Julien Rivière	Psycho-ergonomie	M2 ECIT-FH	2018
Thomas Bonnier	Psycho-ergonomie	M2 ECIT-FH (Toulouse)	2017
Célia Pieruccioni	Psycho-ergonomie	M2 ECIT-FH (Toulouse)	2016
Adrien Dax	Informatique	M2 IHM (Toulouse)	2015
Julie Ducasse	Informatique	M2 IHM (Toulouse)	2014
Romain Lechien	Informatique	M2 IHM (Toulouse)	2014
Victor Vergnieux	Sciences cognitives	M2 Sciences cognitives (Bordeaux)	2012
Valérian Guivarch	Informatique	M2R ICSC (Toulouse)	2010
Yannick Adélise	Neurosciences	M2R Neurosciences (Bordeaux)	2009

- 9 encadrements de stage de Master 1 :

Nom	Discipline	Intitulé formation	Année
Clara Sorita	Sciences cognitives	M1 Sciences cognitives (Bordeaux)	2020
Pauline Maurette	Sciences cognitives	M1 Cognitive Science (Bordeaux)	2020
Nina Docteur	Sciences cognitives	M1 Cognitive Science (Bordeaux)	2018
Richard Dautriche	Psycho-ergonomie	M1 ECIT-FH (Toulouse)	2018
Ludovic Lesur	Ingénierie	INSA Toulouse	2016
Paul Mesnilgrete	Ingénierie	M1 SRI (Upsitech Toulouse)	2016
Julie Ducasse	Informatique	M1 IHM (Toulouse)	2013
Rémi Marquerie	Informatique	M1 Syst. Intelligents (Toulouse)	2012
Geoffrey Pousse	Informatique	M1 Syst. Intelligents (Toulouse)	2011

- 2 encadrements de stage en IUT :

Nom	Discipline	Intitulé formation	Année
Nicolas Billiote	Mécanique	IUT Génie Mécanique (Toulouse)	2017
Rudy Cazeneuve	Mécanique	IUT Génie Mécanique (Toulouse)	2016

## 4 Activités de recherche

### Animation de la recherche

- Co-animateur de l'axe stratégique « santé et autonomie » de l'IRIT (2017-2018)
- Vice-président du comité d'éthique de l'université de Toulouse (COMUE) (2016-2018)
- Cofondateur puis président du comité d'éthique de l'IRIT (CLERIT) (2015-2018)
- Traduction d'un livre de vulgarisation sur les nanotechnologies :  
« Engins de création » d'Éric Drexler (Vuibert, 2005)

### Organisation de conférences

- Membre du comité scientifique, du comité d'organisation et édition des actes à IHM'2015 (Interaction Humain-Machine, Toulouse)
- Membre fondateur du GT affilié à l'AFIHM, INTERCO3D pour la conception et l'utilisation de techniques d'interactions 3D (2013-2016)
- Membre du comité d'organisation à INS'2012 (International Neuropsychological Society, Bonifacio)
- Membre du comité scientifique et du comité d'organisation à ECVP'2011 (European Conference on Vision Processing, Toulouse)

### Expertises

- Rapporteur pour des revues en neurosciences et IHM : Artificial Organs, JASIST, Sensors, TAccess, Frontiers in neuroscience, Journal of Neuropsychology, JEP:HPP,...
- Rapporteur pour des conférences en IHM : CHI, IHM, Eurohaptics , ICRA, Handicap, ITS/ISS, Mobile HCI, VR,...

### Contrats de recherche

- Projet ANR : ActivMap (2020-2024)  
48 mois - 800 k€ (258 k€ IRIT) - Partenaire scientifique  
Assistance à la Conception de cartes pour déficients Visuels  
Partenaires : IRIT, LIMOS, IGN & FeelObject.  
<https://activmap.limos.fr/>
- Projet ANR : AccessiMap (2014-2018)  
48 mois - 750 k€ (348 k€ IRIT) - Responsable de lot  
Cartographie interactive, collaborative et accessible pour les personnes déficientes visuelles  
Partenaires : IRIT, Télécom ParisTech, IJA & Makina Corpus  
<https://www.irit.fr/accessimap>
- Projet PEPS-INS2I : SIMUNANO (2013-2014)  
24 mois - 16 k€ - Porteur  
Simulation de neuroprothèses visuelles en lien avec la mise au point de microélectrodes souples nanostructurées  
Partenaires : IRIT & LAAS
- Projet Bonus-Qualité-Recherche (BQR) UPS : AMUSE-NV (2012)  
12 mois - 10 k€ - Porteur  
Accessibilité des musées aux personnes non-voyantes
- Projet UPS NANOSTIM (2011-2012)  
24 mois - 2 thèses + 22 k€ - Responsable scientifique  
Microélectrodes implantables souples nanostructurées pour la stimulation et l'enregistrement de l'activité cérébrale  
Partenaires : IRIT & LAAS

- **Projet FUI BéA (2009-20010)**  
24 mois - 970 k€ (120 k€ IRIT) - Postdoctorant  
Bracelet électronique d'assistance pour personne âgée dépendante  
Partenaires : IRIT & Atos Origin
- **Projet ANR TecSan NAVIG (2008-2012)**  
36 mois - 1,3 M€ (314 k€ IRIT) - Partenaire scientifique  
Système d'aide à la navigation pour les déficients visuels  
Partenaires : IRIT, LIMSI, CerCo, IJA, Spikenet technology, Navocap & Grand Toulouse  
<http://navig.irit.fr>
- **Bourse de la Fondation pour la Recherche Médicale (FRM)**  
24 mois - 48 k€ - Postdoctorat  
Financement d'un postdoctorat à l'université KULeuven (Belgique) sur la rééducation motrice
- **Bourse de la Fédération des FAF**  
6 mois - 7,5 k€ - Thèse  
Financement de fin de thèse sur la catégorisation visuelle
- **Bourse de la FRM**  
6 mois - 7,5 k€ - Thèse  
Financement de fin de thèse sur la catégorisation visuelle

## Collaborations actives

- **IJA (Toulouse) - 2010-présent - Centre d'éducation spécialisée pour déficients visuels**  
- Multiples projets + Laboratoire commun « Cherchons Pour Voir »
- **UMR LIMOS (Clermont-Ferrand) - 2018-présent - Jean-Marie Favreau (équipe données, services, intelligence) - Analyse d'informations géographiques - Projet ActivMap**
- **UMR LASTIG (IGN - Paris) - 2018-présent - Guillaume Touya & Sidonie Christophe (équipe GéoVis) - Géographie algorithmique - Projet ActivMap**
- **Entreprise FeelObject (Clermont-Ferrand) - 2014-présent - TPE spécialisée dans la cartographie pour personne déficiente visuelle - Développement d'une solution de cartographie tactile interactive portable - Projet ActivMap**
- **UMR IRIT (Toulouse) - 2019-présent - Vincent Charvillat & Axel Carlier (équipe REVA) - Apprentissage machine hybride de type 'deep learning' avec humain dans la boucle - Projet INCA (simulation de neuroprothèse visuelles & IA)**
- **UMR CerCo (Toulouse) - 2019-présent - Benoît Cottureau (équipe vision spatiale chez l'homme, le singe et la machine) - Projet INCA**

## Collaborations passées

- **UPR LAAS (Toulouse) - 2012-2017 - Christian Bergaud & Émeline Descamps - Microélectrodes implantables souples nanostructurées - Divers projets**
- **INJA (Paris) - 2016-2017 - Julien Berthier - Conception participative d'un puzzle interactif tangible - Collaboration informelle (postdoctorat Stéphanie Giraud)**

#### 4. ACTIVITÉS DE RECHERCHE

---

- UMR CRCA (Toulouse) - 2015-2017 - Lionel Dahan - Enregistrements de l'activité cérébrale chez le rat via des microélectrodes souples - Divers projets
- École Télécom ParisTech (Paris) - 2014-2018 - Gilles Bailly & Annie Gentès - Design d'interactions - Projet AccessiMap
- Makina Corpus (Toulouse) - 2014-2018 - PME toulousaine spécialisée dans le logiciel libre dans le domaine de la cartographie - Éditeur en ligne de cartes et d'interactions sonores - Projet AccessiMap
- Atos Origin (Toulouse) - 2009-2011 - Groupe international dans le secteur du logiciel - Intégration logicielle du bracelet - Projet BéA : bracelet électronique pour l'autonomie de personnes âgées dépendantes
- Spikenet Technology (Toulouse) - 2008-2012 - Entreprise développant une solution de vision par machine - Détection de cibles visuelles pour l'amélioration du positionnement géographique d'un piéton non-voyant - Projet NAVIG
- UPR LIMSI (Orsay-Saclay) - 2008-2012 - Brian Katz & Gaëtan Parseihian - Génération de sons spatialisés pour le guidage de personnes non-voyantes - Projet NAVIG
- Navocap (Toulouse) - 2008-2012 - Entreprise spécialisée dans les solutions de mobilité - Système autonome de guidage pour piétons non-voyants - Projet NAVIG



## 5 Chronologie

Années	Parcours professionnel	Projets		Encadrement thèses	
		ANR	Autres		
2006	Fin de thèse		FAF		
2007	Postdoctorat à Leuven		NAVIG		FRM
2008					
2009	Postdoctorats à Toulouse	NAVIG			
2010			Béa		
2011					
2012	Chercheur CNRS (CR2) IRIT		SIMUNANO NANOSTIM		Grégoire Denis (SPV)
2013					
2014					
2015	Chercheur CNRS (CR1) IRIT	AccessiMap			Julie Ducasse (Interac. tangibles)
2016					
2017					
2018	Mise en disponibilité				
2019					
2020	Chercheur CNRS (CR1) IRIT	ActiviMap			
2021					
2022 et +	Chercheur CNRS (CR1) IRISA				

FIGURE 43 – Quelques repères temporels dans ma carrière

## 6 Liste complète des publications

---

Les étudiants que j'encadrerais pour ces travaux de recherche figurent en *souligné italique*

### Articles de revues internationales (19)

Ducasse J., **Macé M. J.-M.**, Oriola B. et Jouffrais C. (2018). BotMap: Non-Visual Panning and Zooming with an Actuated Tabletop Tangible Interface. *Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 25 (4), 24.

Giraud S., Brock A., **Macé M. J.-M.** et Jouffrais C. (2017). Map learning with a 3D printed interactive small-scale model: Improvement of space and text memorization in visually impaired students. *Frontiers in Psychology*, 1, 930.

Vergnieux V., **Macé M. J.-M.**, Denis G. et Jouffrais C. (2017). Simplification of visual rendering in Simulated Prosthetic Vision facilitates navigation. *Artificial Organs*, 41 (9), 852–961.

**Macé M. J.-M.**, Denis G. et Jouffrais C. (2015). Simulated prosthetic vision: The benefits from computer-based object recognition and localization. *Artificial Organs*, 39 (7), E102–E113.

Heitger M. H., **Macé M. J.-M.**, Jastorff J., Swinnen S. et Orban G. A. (2012). Cortical regions involved in the observation of bimanual actions. *J. Neurophysiol.*, 108 (9), 2594–2611.

Kammoun S., Parseihian G., Gutierrez O., Brillhault A., Serpa A., Raynal M., Oriola B., **Macé M. J.-M.**, Auvray M., Denis M., Thorpe S.J., Truillet P., Katz B.F. et Jouffrais C. (2012). Navigation and space perception assistance for the Visually Impaired: The NAVIG project. *IRBM*, 33(2), 182-189.

Beets I., **Macé M. J.-M.**, Meesen R., Cuypers K., Levin O. et Swinnen S. (2012). Active versus passive training of a complex bimanual task: Is prescriptive proprioceptive information sufficient for inducing motor learning? *PloS One*, 7(5), e37687.

**Macé M. J.-M.**, Delorme A., Richard G. et Fabre-Thorpe M. (2010). Spotting animals in natural scenes: efficiency of humans and monkeys at very low contrasts. *Anim Cogn*, 13(3), 405-418.

**Macé M. J.-M.**, Joubert O. R., Nespoulous J. L. et Fabre-Thorpe M. (2009). The time-course of visual categorizations: you spot the animal faster than the bird. *PLoS One*, 4(6), e5927.

**Macé M. J.-M.**, Levin O., Alaerts K., Rothwell J.C. et Swinnen S.P. (2008). Corticospinal facilitation following prolonged proprioceptive stimulation by means of passive wrist movement. *J Clin Neurophysiol*, 25(4), 202-209.

Rousselet G. A., **Macé M. J.-M.**, Thorpe S. J. et Fabre-Thorpe M. (2007). Limits of event-related potential differences in tracking object processing speed. *J Cogn Neurosci.*, 19(8), 1241-1258.

**Macé M. J.-M.**, Thorpe S. J. et Fabre-Thorpe M. (2005). Rapid categorization of achromatic natural scenes: how robust at very low contrasts? *Eur J Neurosci.*, 21(7), 2007-2018.

**Macé M. J.-M.**, Richard G., Delorme A. et Fabre-Thorpe M. (2005). Rapid categorization of natural scenes in monkeys: Target predictability and processing speed. *Neuroreport*, 16(4), 349-354.

Bacon-Macé N., **Macé M. J.-M.**, Fabre-Thorpe M. et Thorpe S. J. (2005). The time course of visual processing: Backward masking and natural scene categorization. *Vis Res*, 45(11), 1459-1469.

Rousselet G. A., **Macé M. J.-M.** et Fabre-Thorpe M. (2004). Spatiotemporal analyses of the N170 for human faces, animal faces and objects in natural scenes. *NeuroReport*, 15(17), 2607-2611.

Rousselet G. A., **Macé M. J.-M.** et Fabre-Thorpe M. (2004). Comparing animal and face processing in the context of natural scenes using a fast categorization task. *Neurocomputing*, 58-60, 783-791.

Delorme A., Rousselet G. A., **Macé M. J.-M.** et Fabre-Thorpe M. (2004). "Interaction of top-down and bottom-up processing in the fast visual analysis of natural scenes". *Cog Brain Res*, 19 (2), 103-113.

Rousselet G. A., **Macé M. J.-M.** et Fabre-Thorpe M. (2004). "Animals and Humans in natural scenes: N170 ERP component". *J Vis*, 4(1),13-21.

Rousselet G. A., **Macé M. J.-M.** et Fabre-Thorpe M. (2003). "Is it an animal? Is it a human face? Fast processing in upright and inverted natural scenes". *J Vis*, 3(6), 440-455.

## Articles de conférences internationales à comité de lecture (14)

Chibaudel Q., Johal W., Oriola B., **Macé M. J.-M.**, Serrano M., Dillenbourg P., Tartas V. et Jouffrais C. (2020). "If you've gone straight, now, you must turn left" - Exploring the use of a tangible interface in a collaborative treasure hunt for people with visual impairments. *Proceedings of the ASSETS 2020 conference (ASSETS 2020)*, 1-10.

*Ducasse J.*, **Macé M. J.-M.**, Serrano M. et Jouffrais C. (2016). Tangible Maps for Visually Impaired Users: Shape-Changing Perspectives (short paper). *Conference on Human Factors in Computing Systems - Workshop on Shape Changing UI (ACM CHI 2016)*, 1-5.

- Ducasse J., **Macé M. J.-M.**, Serrano M. et Jouffrais C. (2016). Tangible Reels: Construction and Exploration of Tangible Maps by Visually Impaired Users. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Special Interest Group on Computer-Human Interaction (CHI - SIGCHI 2016)*, 2186-2197.
- Ducasse J., **Macé M. J.-M.** et Jouffrais C. (2015). From open geographical data to tangible maps: improving the accessibility of maps for visually impaired people. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Geovis 2015)*, 517-523.
- Denis G., Jouffrais C., Mailhes C. et **Macé M. J.-M.** (2014). Simulated Prosthetic Vision: Improving text accessibility with retinal prostheses. *Proceedings of the 36<sup>th</sup> International conference on Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2014)*, 1719-1722.
- Vergnieux V., **Macé M. J.-M.** et Jouffrais C. (2014). Wayfinding with Simulated Prosthetic Vision: Performance comparison with regular and structure-enhanced renderings (Poster). *Proceedings of the 36<sup>th</sup> International conference on Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2014)*, 2585-2588.
- Kammoun S., **Macé M. J.-M.** et Jouffrais C. (2014). Waypoint validation strategies in assisted navigation for visually impaired pedestrian. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP 2014) - LNCS*, 8548, 92-95.
- Denis G., Jouffrais C. Vergnieux V. et **Macé M. J.-M.** (2013). Human faces detection and localization with simulated prosthetic vision (WIP). *Proceedings of the 31<sup>th</sup> international Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2013)*, 61-66.
- Kammoun S., **Macé M. J.-M.** et Jouffrais C. (2012). Multimodal virtual environment subserving the design of electronic orientation aids for the Blind (Poster). *Proceedings of the 18<sup>th</sup> ACM symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST 2012)*, 189-190.
- Denis G., **Macé M. J.-M.** et Jouffrais C. (2012). Simulated prosthetic vision: object recognition and localization approach (Poster). *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Neuroprosthetic Devices (ICNPD 2012)*, 40-41.
- Macé M. J.-M.**, Dramas F. et Jouffrais C. (2012). Reaching to sound accuracy in the peri-personal space of blind and sighted humans. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP 2012) - LNCS*, 7383, 636-643.
- Kammoun S., **Macé M. J.-M.**, Oriola B. et Jouffrais C. (2012). Towards a geographic information system facilitating navigation of visually impaired users. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP 2012) - LNCS*, 7383, 521-528.

Kammoun S., **Macé M. J.-M.**, Oriola B. et Jouffrais C. (2011). Toward a better guidance in wearable electronic orientation aids. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International conference IFIP TC13 on Human-Computer Interaction (INTERACT 2011) - LNCS*, 6949, 624-627.

Parlouar R., Dramas F., **Macé M. J.-M.** et Jouffrais C. (2009). Assistive device for the blind based on object recognition: an application to identify currency bills (Poster). *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International conference ACM SIGACCESS (ASSETS 2009)*, 227-228.

## Chapitres de livres (2)

**Macé M. J.-M.**, Bardot S., Brock A., Brulé E., *Ducasse J.*, Giraud S., Oriola B., Serrano M., *Denis G.* et Jouffrais C. (2019). Développement psychologique chez les enfants et adolescents déficients visuels. Enjeux théoriques et appliqués. Dans : *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant (ANAE)*, 31(159), 167-186.

Kammoun S., **Macé M. J.-M.**, Oriola B. et Jouffrais C. (2012). Designing a virtual environment framework for improving guidance for the visually impaired. In *Designing Inclusive Systems (CWUAAT)*, Eds: Langdon P., Clarkson J., Robinson P., Lazar J. et Heylighen A., Cambridge, Springer, 217-226.

## Articles de revues nationales à comité de lecture (1)

Brock A., Kammoun S., **Macé M. J.-M.** et Jouffrais C. (2014). Using wrist vibrations to guide map exploration and whole body navigation. *I-com journal (special issue)*, 13(3), 19-28.

## Articles de conférences nationales à comité de lecture (6)

Mulet J., Dimitrov L., Bartolucci A., Raynal M., Tartas V., Lemarié J., *Ducasse J.*, Jouffrais C., **Macé M. J.-M.** et Oriola B. (2020). Evaluation d'un dispositif audio-tangible pour l'apprentissage spatial chez les enfants déficients visuels. *Actes de la 11<sup>ème</sup> conférence handicap (HANDICAP 2020)*, 157-162.

*Ducasse J.*, Oriola B., **Macé M. J.-M.** et Jouffrais C. (2016). Concevoir des interfaces tangibles et spatiales pour les déficients visuels : pourquoi et comment ? *Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM 2016)*, 79-90.

*Ducasse J.*, **Macé M. J.-M.**, Oriola B. et Jouffrais C. (2014). Techniques d'interactions sur dispositifs mobiles pour l'aide à l'orientation chez les non-voyants. *Actes de la 8<sup>ème</sup> conférence handicap (HANDICAP 2014)*.

Jouffrais C., Oriola B., Truillet P., Raynal M., Serpa A. et **Macé M. J.-M.** (2014). Les technologies d'assistance pour la qualité de vie et l'autonomie des déficients visuels (TAVIS). *Actes de la 8<sup>ème</sup> conférence handicap (HANDICAP 2014)*, 307-311.

**Macé M. J.-M.**, *Ducasse J.* et Jouffrais C. (2013). Stratégies de présentation d'informations spatiales en mobilité pour l'aide à la navigation chez les non-voyants. *Actes de la 25<sup>ème</sup> conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, hal-00879596 1-2*.

*Vergniewux V.*, **Macé M. J.-M.** et Jouffrais C. (2012). Spatial navigation with a simulated prosthetic vision in a virtual environment (Poster). *Proceedings of the NeuroComp/KEOpS'12 workshop*.

### Communications avec résumés publiés (17)

*Vergniewux V.*, **Macé M. J.-M.**, *Valton H.*, Barbeau E. et Jouffrais C. (2018). Spontaneous representation of Vista spaces: similarities and differences between sighted and blind people. *International Conference on Spatial Cognition (ICSC 2018)*.

**Macé M. J.-M.**, *Guivarch V.* et Jouffrais C. (2011). Brain-Computer Interface for the Blind: The benefits from a computer-based object recognition approach. *Perception*, 40 suppl, 51.

Dramas F., **Macé M. J.-M.**, Katz B. et Jouffrais C. (2010). Object localization system for the blind: designing a user-centered auditory interface. *Proceedings of the 25th Annual International Technology et Persons with Disabilities Conference - CSUN Conference 2010*.

Thorpe S. J., Crouzet S. M., **Macé M. J.-M.**, Bacon-Macé N. et Fabre-Thorpe M. (2009). Masking in a high-level gender discrimination task is essentially entirely precortical. *J Vis*, 9(8):546a.

Fabre-Thorpe M., Rousselet G. A., **Macé M. J.-M.** et Thorpe S.J. (2006). Teasing apart meaningful from meaningless ERP differences in object categorization: a complicated story. *J Vis*, 6(6):85.

Fabre-Thorpe M., Bacon-Macé N., **Macé M. J.-M.** et Thorpe S. J. (2005). Coarse to fine processing in natural scene categorisation. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, p52.

Fabre-Thorpe M., **Macé M. J.-M.**, Joubert O. (2005). Dog or animal? What comes first in vision? *Perception*, 34 suppl, 8.

**Macé M. J.-M.**, Joubert O. et Fabre-Thorpe M. (2005). Entry level at the superordinate level in visual categorization. *Proceedings of the 9th International Conference on Cognitive and Neural Systems*.

- 
- Rousselet G. A., **Macé M. J.-M.** et Fabre-Thorpe M. (2003). Comparing animal and face processing in the context of natural scenes using a fast categorization task. *Proceedings of the 12th Annual Computational Neuroscience Meeting*.
- Macé M. J.-M.**, Richard G., Thorpe S. J. et Fabre-Thorpe M. (2003). Category-level Hierarchy: What comes first in Vision? *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 63, C20, 24.
- Bacon N., **Macé M. J.-M.**, Kirchner H., Fabre-Thorpe M. et Thorpe S. J. (2003). Dynamics of rapid scene categorization: Backward masking and RSVP studies. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 63, C2, 20.
- Macé M. J.-M.**, Fabre-Thorpe M. et Thorpe S. J. (2002). How robust is rapid visual categorization of natural images to large variations of contrast? *J Cog Neurosci, suppl*, A108, 40.
- Macé M. J.-M.**, Rousselet G. A., Sternberg C., Fabre-Thorpe M. et Thorpe S. J. (2002). Very early ERP effects in rapid visual categorisation of natural scenes: Distinguishing the role of low-level visual properties and task requirements. *Perception*, 31 *suppl*, 150.
- Rousselet G. A., **Macé M. J.-M.**, Sternberg C., Fabre-Thorpe M., et Thorpe S. J. (2002). Rapid categorization of faces and animals in upright and inverted natural scenes: no need for mental rotation and evidence for a selective visual streaming of upright faces. *Perception*, 31 *suppl*, 132a.
- Thorpe S. J., Bacon N., Rousselet G. A., **Macé M. J.-M.** et Fabre-Thorpe M. (2002). Rapid categorization of natural scenes: feedforward vs. feedback contribution evaluated by backward masking. *Perception*, 31 *suppl*, 132b.
- Macé M. J.-M.** et Fabre-Thorpe M. (2001). Catégorisation visuelle rapide de scènes naturelles chez l'homme et le singe : robustesse des performances aux modifications de contraste et de luminance. *Proceedings du 5<sup>ème</sup> Colloque des Neurosciences (Toulouse, France)*.
- Fabre-Thorpe M., **Macé M. J.-M.** et Thorpe S. J. (2001). Rapid visual categorisation of grey-scale natural scenes: robustness to large variations in luminance and contrast. *Perception*, 30 *suppl*, 72b.





# Liste des acronymes

- AFIHM** Association Francophone de l'Interaction Humain-Machine 105
- AGEFIPH** Association de Gestion du Fonds pour l'Insertion Professionnelle des Personnes Handicapées 12
- ANR** Agence Nationale pour la Recherche v, 18, 22, 28, 36, 47, 105, 106
- AVC** Accident Vasculaire Cérébral 78, 81, 82
- CAVE** 'Cave Automatic Virtual Environment' (environnement virtuel immersif) 79
- CerCo** laboratoire CERveau et COgnition iii, 2, 61, 102, 103, 106
- CHU** Centre Hospitalo-Universitaire 77, 81
- CID** Commission InterDisciplinaire 4
- CIF** Classification Internationale du Fonctionnement, du handicap et de la santé 9
- CIH** Classification Internationale des Handicaps : déficiences, incapacités, désavantages 8
- CIVAL** Centre Interdépartemental de la Vision, de l'Audition et du Langage-Lestrade 29
- CLERIT** Comité consuLtatif d'Éthique / Recherche en Informatique de Toulouse 104
- CLIS** CLasses d'Intégration Scolaire 13
- CNRS** Centre National de la Recherche Scientifique iii, 4, 60, 83, 102
- COMUE** Communauté d'Universités et Établissements 104
- COVID** 'COronaVirus Disease' (maladie à coronavirus) 38, 43
- CPV** Laboratoire commun IRIT-IJA Cherchons Pour Voir 5, 46
- CR2** Chargé de Recherche de 2<sup>ème</sup> classe 4
- CRCA** Centre de Recherche sur la Cognition Animale 107
- CTRDV** Centre Technique Régional pour la Déficience Visuelle 30, 44
- DEA** Diplôme d'Études Approfondies 2, 3, 102
- DERi** Document En Relief interactif 18, 27, 28, 29, 30, 31, 36, 38, 42, 43, 44, 46
- DEUG** Diplôme d'Études Universitaires Générales 102
- DMLA** Dégénérescence Maculaire Liée à l'Âge 7
- ECIT-FH** Ergonomie Cognitive, Innovation Technologique et Facteur Humain 104
- EEG** Électro-EncéphaloGraphie 3, 78, 79, 81, 83
- ELIPSE** Étude de l'Interaction Personne-Système iii, 4, 25, 28, 36, 46, 78, 102
- EV** Environnements Virtuels 77, 78, 79, 82
- FAF** Fédération des Aveugles de France 6, 106

- FDA** 'Food and Drug Administration' (organisme de certification des dispositifs médicaux aux États-Unis) [54](#), [55](#)
- fNIRS** 'Functional Near-InfraRed Spectroscopy' (imagerie spectroscopique infrarouge) [78](#), [79](#), [83](#)
- FRM** Fondation pour la Recherche Médicale [106](#)
- FUI** Fonds Unique Interministériel [106](#)
- GPEAA** Groupement des Professeurs et Éducateurs d'Aveugles et d'Amblyopes [30](#)
- GPS** 'Global Positioning System' (système de positionnement par satellite) [27](#)
- GT** Groupe de Travail [105](#)
- HDR** Habilitation à Diriger des Recherches [iii](#), [v](#), [103](#)
- IC95** Intervalle de Confiance à la moyenne de 95 % [29](#)
- ICM** Interface Cerveau-Machine [77](#), [78](#), [80](#), [81](#), [82](#)
- ICSC** Interaction, Coopération, Systèmes Complexes [104](#)
- IGN** Institut Géographique National [47](#), [105](#), [106](#)
- IHCS** 'Interacting Humans with Computing Systems' (humains interagissant avec des machines) [103](#)
- IHM** Interaction Humain-Machine [v](#), [2](#), [4](#), [31](#), [36](#), [46](#), [76](#), [77](#), [78](#), [82](#), [83](#), [102](#), [103](#), [104](#), [105](#)
- IJA** Institut des Jeunes Aveugles [iii](#), [5](#), [15](#), [26](#), [29](#), [30](#), [33](#), [34](#), [35](#), [36](#), [38](#), [40](#), [42](#), [43](#), [44](#), [48](#), [105](#), [106](#)
- INJA** Institut National des Jeunes Aveugles [6](#), [30](#), [36](#), [106](#)
- INP** Institut National Polytechnique [52](#)
- INSA** Institut National des Sciences Appliquées [104](#)
- INSEE** Institut National de la Statistique et des Études Économiques [11](#)
- INSHEA** Institut National Supérieur de formation et de recherche pour l'éducation des jeunes Handicapés et les Enseignements Adaptés [30](#)
- IRISA** Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires [v](#), [77](#), [78](#), [79](#), [80](#), [82](#), [83](#)
- IRIT** Institut de Recherche en Informatique de Toulouse [iii](#), [v](#), [4](#), [5](#), [15](#), [42](#), [52](#), [60](#), [67](#), [71](#), [76](#), [102](#), [103](#), [104](#), [105](#), [106](#)
- IRMf** Imagerie par Résonance Magnétique nucléaire Fonctionnelle [3](#), [78](#), [81](#), [83](#)
- IRT** Institut de Recherche Technologique [77](#)
- IUT** Institut Universitaire de Technologie [34](#), [104](#)
- LAAS** Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des systèmes [58](#), [105](#), [106](#)
- LASTIG** Laboratoire en Sciences et Technologies de l'Information Géographique [106](#)
- LIMOS** Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes [47](#), [105](#), [106](#)
- LIMSI** Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur [106](#), [107](#)
- MCF** Maître de Conférences [28](#)
- NCC** Neurosciences, Comportement et Cognition [102](#), [103](#)

- OCR** 'Optical Character Recognition' (reconnaissance optique de caractères) [67](#), [73](#)
- OMS** Organisation Mondiale de la Santé [6](#), [7](#)
- PPH** Processus de Production du Handicap [9](#)
- PUMAH** 'Pan-tilt Ultrasound Mid-Air Haptics' (système haptique sans contact à ultrasons) [82](#)
- QR Code** 'Quick Response Code' [34](#)
- RA** Réalité Augmentée [76](#), [77](#), [78](#), [80](#)
- RFID** 'Radio Frequency IDentification' (radio-identification) [37](#), [46](#)
- RGB+D** 'Red-Green-Blue+Depth' (caméra de profondeur) [27](#)
- RV** Réalité Virtuelle [69](#), [76](#), [77](#), [80](#)
- RV/RA** Réalité Virtuelle / Réalité Augmentée [2](#), [76](#), [77](#), [78](#), [82](#), [83](#)
- SC** Signal et Communication [52](#), [67](#)
- SIG** Système d'Information Géographique [22](#), [69](#)
- SPV** 'Simulated Prosthetic Vision' (simulation de neuroprothèse visuelle) [59](#), [60](#), [61](#), [62](#), [70](#)
- SRI** Systèmes Robotiques et Interactifs [104](#)
- STL** 'Standard Tessellation Language' (format de fichier pour l'impression 3D) [47](#)
- SUS** 'System Usability Scale' (échelle d'utilisabilité) [29](#), [39](#)
- SVG** 'Scalable Vector Graphics' (format de fichier graphique vectoriel) [47](#)
- TDM** Table Des Matières [2](#)
- TMS** 'Transcranial Magnetic Stimulation' (stimulation magnétique transcrânienne) [3](#)
- UMR** Unité Mixte de Recherche [102](#), [106](#), [107](#)
- UPR** Unité Propre de Recherche [106](#), [107](#)
- UPS** Université Paul Sabatier [2](#), [102](#), [103](#), [105](#)
- W3C** 'World Wide Web Consortium' (consortium de standardisation du Web) [14](#)
- WAI** 'Web Accessibility Initiative' (initiative pour l'accessibilité du Web) [14](#)
- WIMP** 'Windows, Icons, Menus and Pointing devices' (interface avec fenêtres, icônes, menus et dispositif de pointage) [31](#)

