

Sommaire

Remerciements	2
Sommaire	3
Introduction	6
I. Le toucher.....	10
I.1 Introduction	10
I.2 Psychophysique de l'appareil tactile humain	14
I.3 Aspects psycho-fonctionnels du toucher	16
I.4 Conclusion	18
II. Les particularités sensori-motrices chez les personnes atteintes de Trouble du Spectre de l'Autisme	20
II.1 Introduction	20
II.2 Particularités sensorielles des personnes avec TSA	22
II.2.1 Définition	22
II.2.2 Les symptômes sensoriels	23
II.2.3 Prévalence des particularités sensorielles	28
II.3 Facteurs indicateurs de sévérité	29
II.4 Troubles de la coordination sensorimotrice dans l'autisme	30
II.5 Particularités Tactiles chez les personnes avec TSA	31
II.6 Conclusion	32
III. Les interfaces tactiles/haptiques pour personnes avec Trouble du Spectre de l'Autisme	33
III.1 Introduction	33
III.1.1 Le sens du toucher dans le Trouble du Spectre de l'Autisme	33
III.1.2 Interfaces Haptiques – Interfaces Tactiles	35
III.2 Méthodologie	36
III.2.1 Critères de l'étude	36
III.2.2 Base de données	36
III.2.3 Présentation des résultats	37
III.3 Résultats	41
III.3.1 Caractérisation fonctionnelle des dispositifs	41
III.3.2 Développement et évaluations des dispositifs	45
III.4 Discussion	49
III.4.1 Apports des interfaces tactiles/haptiques	49
III.4.2 Qualité des évaluations	51
III.5 Conclusion	52
IV. Conception de l'interface d'Exploration Motrice pour l'Autisme (DEMA)	54
IV.1 Analyse des besoins des professionnels travaillant avec des personnes avec Troubles du Spectre de l'Autisme (Etude exploratoire préliminaire)	54
IV.1.1 Introduction	54
IV.1.2 Méthode	55
IV.1.3 Résultats	56
IV.1.4 Conclusion de l'analyse des besoins	59

IV.2 Conception et Développement Mécatronique	60
IV.2.1 Concept.....	60
IV.2.2 Cahier des charges.....	61
IV.2.3 Benchmark technologique.....	62
IV.3 Instrumentation.....	67
IV.3.1 Principe de Fonctionnement.....	67
IV.3.2 Acquisition et traitements des signaux.....	68
IV.3.3 Interface graphique associée	69
IV.4 Démonstrateur final	70
IV.5 Conclusion.....	72
V. Etude exploratoire des représentations des IHM chez les professionnels de santé via une technique d'élicitation associative	74
V.1 Introduction	74
V.2 Méthode.....	74
V.2.1 Participants.....	74
V.2.2 Procédure.....	75
V.2.3 Analyse des données	75
V.3 Résultats et discussion.....	77
V.3.1 Catégories.....	79
V.3.2 Analyse par groupe Métier.....	81
V.4 Conclusion.....	85
VI. Evaluation de la place des IHM et de notre interface DEMA par des entretiens semi- dirigés de professionnels de santé	86
VI.1 Introduction	86
VI.2 Méthode.....	86
VI.2.1 Participants.....	86
VI.2.2 Protocole.....	87
VI.2.3 Analyse des données	88
VI.3 Résultats et discussion.....	93
VI.3.2 Analyse catégorielle	95
VI.3.3 Analyse par groupe Métier.....	100
VI.4 Conclusion.....	102
VII. Simon Tactile et Simon Social Tactile.....	104
VII.1 Introduction	104
VII.2 Conception et développement mécatronique.....	108
VII.2.1 Cahier des charges	108
VII.2.2 Architecture générale.....	110
VII.2.3 Démonstrateur final	111
VII.3 Etude expérimentale	117
VII.3.1 Participants	117
VII.3.2 Matériel.....	118
VII.3.3 Procédure	118
VII.3.4 Résultats et discussion	123
VII.4 Conclusion.....	131
Conclusion et perspectives.....	133
Bibliographie.....	136
Annexes.....	167

Annexe 1 – Exemples pour les catégories issus du corpus des entretiens semi-dirigés.....	167
Annexe 2 – Stimuli de l'étude en ligne	172
Annexe 3 – Trame des entretiens semi-dirigés	174
Annexe 4 – Questionnaire de Quotient Autistique (QA)	176
Table des illustrations.....	179
Table des tableaux	181

Introduction

Le sens du toucher fait partie des sens primaires de l'être humain. Ce sens nous permet d'extraire des informations physiques sur les objets tels que la chaleur, le poids, la texture ou la forme. Il nous permet également de communiquer des émotions à d'autres individus (Hertenstein, Holmes, McCullough, & Keltner, 2009). Dans le Trouble du Spectre d'Autisme (TSA), le sens du toucher peut présenter des particularités. En effet, certains individus avec TSA ont des difficultés à tolérer une caresse, d'autres ne ressentent pas les douleurs. Alors que d'autres encore peuvent exprimer un besoin constant de stimulation tactile (Grandin, 1992). Le sens tactile a peu été étudié chez les personnes avec TSA et aucune similarité de motif de développement commun n'a été observée (Marco, Hinkley, Hill, & Nagarajan, 2011). Néanmoins, les effets de stimulations tactiles contrôlées, dispensées dans des environnements adaptés pourraient être bénéfiques (pour le développement ou pour le bien être) pour certaines personnes avec TSA. Les premières observations de l'Autisme ont été réalisées par le docteur Kanner en 1943 (Kanner, 1943) et, dès cette époque, les personnes ayant un TSA ont été caractérisées par des troubles de la communication et des interactions sociales mais également par des particularités sensorielles (American Psychiatric Association, 2013, p. 5). L'autisme est un handicap lourd, à la fois pour les patients et leurs familles. L'absence de possibilités d'interactions tactiles peut être très frustrante pour les familles.

Les avancées technologiques ont permis de développer des Interfaces Humain-Machine (IHM) ayant pour rôles d'assister les personnes avec TSA (Grynszpan, Weiss, Perez-Diaz, & Gal, 2014). Bien que l'utilisation de certaines technologies soient déjà répandues dans la population avec TSA, telles les tablettes tactiles, les IHM actuellement disponibles pour le grand public n'adressent pas forcément les problématiques propres à ces personnes ou à leurs aidants. En outre, les applications spécifiquement développées pour les TSA sont souvent focalisées sur l'apprentissage et le développement de la communication, et ne prennent pas forcément en compte les particularités sensorielles et motrices des personnes.

Les supports des Interfaces Humain-Machines sont des outils mécatroniques à complexité variable. La mécatronique est la combinaison synergique et systémique de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique en temps réel. L'intérêt de ce domaine d'ingénierie interdisciplinaire est la conception de systèmes automatiques puissants et

permettant le contrôle de systèmes hybrides complexes. L'ingénierie de tels systèmes mécatroniques nécessite la conception simultanée et pluridisciplinaire de trois sous-systèmes :

- Une partie opérative : squelette de muscle du système à dominante mécanique et électromécanique ;
- Une partie commande : intelligence embarquée du système à dominante électronique et informatique temps réel ;
- Une partie interface humain-machine : forme géométrique et dialogue du système à dominante ergonomique et esthétique.

Parmi les disciplines qui y sont impliquées, nous citons l'automatique (contrôle et commande), le génie informatique (logiciel), le génie mécanique, l'électronique et l'ergonomie comme illustrée par la Figure 1 ci-dessous.

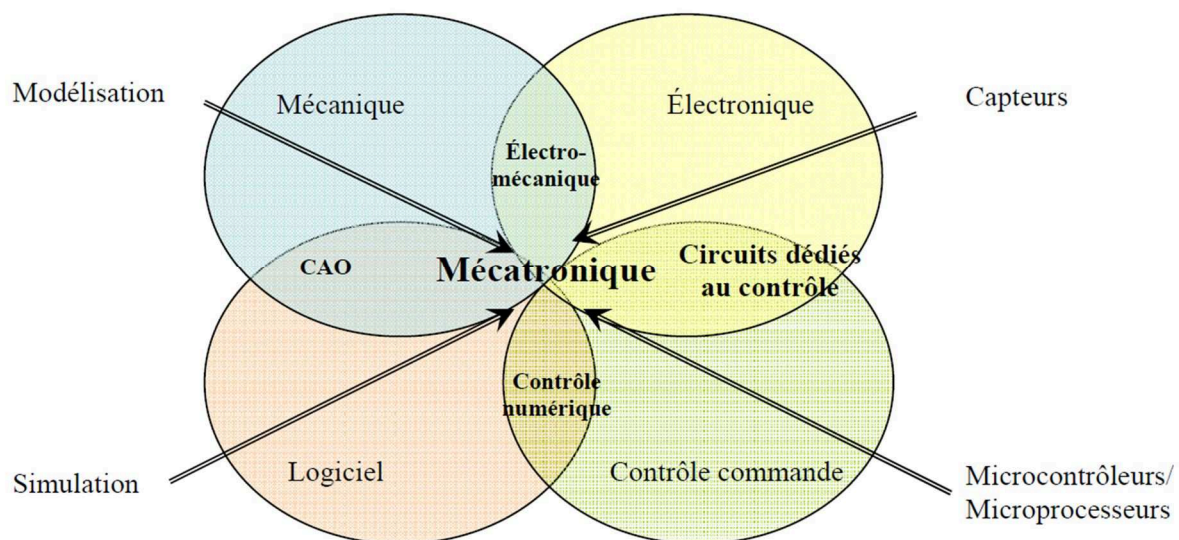


Figure 1 Représentation schématique de la mécatronique

La conception de produits intégrés peut se réaliser de deux façons : soit dans une approche dite “techno-centrée” où on recherche à optimiser une technologie et ensuite identifier les futurs utilisateurs ; soit dans une approche dite “centrée-utilisateur”, qui comme son nom l’indique, place l'utilisateur final au centre de la démarche de conception et l’implique tout au long du processus de réalisation (Dix, Finlay, Abowd, & Beale, 1998). L’approche de conception centrée utilisateur a plusieurs avantages notamment s’agissant du taux d’acceptation du produit fini.

Le Laboratoire des Interfaces Sensorielles et Ambiantes (LISA) du Commissariat à l’Energie Atomique et aux énergies renouvelables (CEA) travaille depuis plusieurs années à la

réalisation de nouvelles interfaces sensorielles dans une démarche centrée utilisateur pour des projets industriels mais également éducatifs et médicaux. L'équipe Interaction de l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR) de Sorbonne Université (SU) effectue des recherches sur les interactions sociales notamment en robotique et sur le Trouble du Spectre de l'Autisme ; ceci à travers un partenariat avec le service du Professeur Cohen du Département de Psychiatrie de l'Enfant et de l'Adolescent de l'hôpital de la Pitié Salpêtrière à Paris. Dans ce cadre de travail, mon objectif de recherche est de concevoir une interface tactile ludo-éducative pour l'Autisme dans une approche centrée utilisateur. Je souhaite notamment observer la pertinence de l'approche haptique ou tactile comme vecteur d'interface pour les personnes avec TSA et leurs aidants. Notre objectif est d'analyser l'application de ces outils à des professionnels de santé.

Le premier chapitre présente les différents mécanorécepteurs de la peau et décrit l'appareil tactile humain. Dans un second chapitre, les particularités sensori-motrices des personnes avec Trouble du Spectre de l'Autisme sont abordées, notamment vis à vis du sens du toucher. Puis, une revue de la littérature sur les interfaces tactiles/haptiques qui existent pour les personnes TSA est présentée dans un troisième chapitre.

Le chapitre quatre décrit la démarche de conception centrée utilisateur adoptée durant la thèse. Les premières observations sur le terrain et des échanges avec des professionnels de santé et des experts en technologies adaptées pour les personnes avec TSA ont permis de réaliser une analyse des besoins. Sur cette base ont été déduites des spécifications esquissant un cahier des charges. La conception et le développement mécatronique de l'interface développée au cours de la thèse y sont également présentés.

La démarche de conception centrée utilisateur s'est poursuivie par une étude exploratoire sur les représentations mentales des professionnels de santé vis-à-vis des Interfaces Humain-Machines, présentées dans le chapitre cinq. Une méthode d'élicitation par association a été conduite auprès de dix-sept professionnels de santé.

Dans le prolongement de cette étude, le chapitre six décrit une série d'entretiens semi-dirigés réalisés avec douze des dix-sept participants. L'objectif de ces entretiens était de poursuivre l'exploration des pratiques professionnelles dans le domaine des TSA et les utilisations potentielles des IHM haptiques ou tactiles, en vue d'évaluer le prototype développé.

Enfin, le chapitre sept est dédié à une étude plus fondamentale sur la perception de stimulation vibrotactile dans le contexte social chez l'être humain. L'objectif de cette étude est de vérifier, avec un paradigme classique issu des sciences cognitives, si les principes qui sous-tendent l'interaction sociale peuvent perdurer lorsque les voies de communication sont purement tactiles. Les résultats de cette étude renseignent sur l'utilisabilité des IHM tactiles pour créer des activités ludo-éducatives d'entraînement aux interactions sociales qui seraient d'intérêt pour les TSA.

Rapport-Gratuit.com

I. Le toucher

I.1 Introduction

Les sensations tactiles et haptiques procèdent de plusieurs mécanismes physiologiques auxquels participent la peau, les muscles et les articulations. Bien que l'ensemble des organes du corps humain soit sensible au toucher, c'est la peau, plus grand organe du corps, qui regroupe l'essentiel des capteurs biologiques du toucher. La sensibilité cutanée inclut la sensibilité aux variations de températures, aux pressions ou encore aux vibrations. La répartition de ces capteurs n'est pas homogène sur l'ensemble de la peau. Ainsi, la main est parmi les zones ayant la plus grande sensibilité au toucher. Ce chapitre aborde certains aspects de l'appareil tactile humain qui paraissent essentiels pour comprendre l'influence du toucher sur le fonctionnement moteur, cognitif et social d'un individu. Ces connaissances servent de base à la conception des interfaces tactiles et haptiques.

Les interactions tactiles et haptiques se limitent rarement à la stimulation d'un seul type de récepteurs sensoriels. Aussi, pour commencer ce chapitre, il paraît important de rappeler comment sont classifiées les voies perceptives. La classification la plus classique est celle de Sherrington (Calas, Boulouis, Perrin, Plas, & Vanneste, 2016) qui sépare les extérocepteurs des intérocepteurs (Tableau 1). Les premiers renseignent sur le monde extérieur. Les seconds nous renseignent sur l'état de notre propre organisme.

Tableau 1 Classification de Sherrington

Extérocepteurs : renseignements sur le monde extérieur	Télérécepteurs : perception à distance	Récepteurs visuels
		Récepteurs auditifs
		Récepteurs olfactifs
	Récepteurs de contact	Récepteurs gustatifs
		Récepteurs cutanés du toucher
Intérocepteurs : renseignements sur notre propre organisme	Viscérocepteurs : disséminés dans les viscères	Ils nous renseignent sur les paramètres physiologiques internes
	Propriocepteurs : regroupés (oreille interne) ou disséminés (fuseaux neuromusculaires)	Ils nous renseignent sur l'état de tension des muscles, sur la position relative des différentes parties du corps, et sur la position du corps dans l'espace.

Différents termes sont couramment employés pour désigner les récepteurs tactiles et haptiques, tels que les nocicepteurs pour les récepteurs de la douleur ou les chimiorécepteurs

pour les récepteurs sensibles à un changement de composition chimique de l'environnement (par exemple une variation de pH ou pression partielle d'oxygène)(Le Corre, 2014). Il existe aussi une nomenclature qui identifie les récepteurs sensoriels en fonction du type de stimulus : mécanorécepteurs, thermorécepteurs, chimiorécepteurs, photorécepteurs, nocicepteurs.

On appelle la somesthésie l'ensemble des sensations (pressions, chaleur, douleurs) qui proviennent de différentes régions du corps (peau, tendons, articulations, viscères). Ces sensations proviennent des informations fournies par les nombreux récepteurs sensitifs présents dans notre organisme et appartenant au système somato-sensoriel. La somesthésie se subdivise en une sensibilité somatique, superficielle ou profonde, et une sensibilité viscérale (Figure 2).

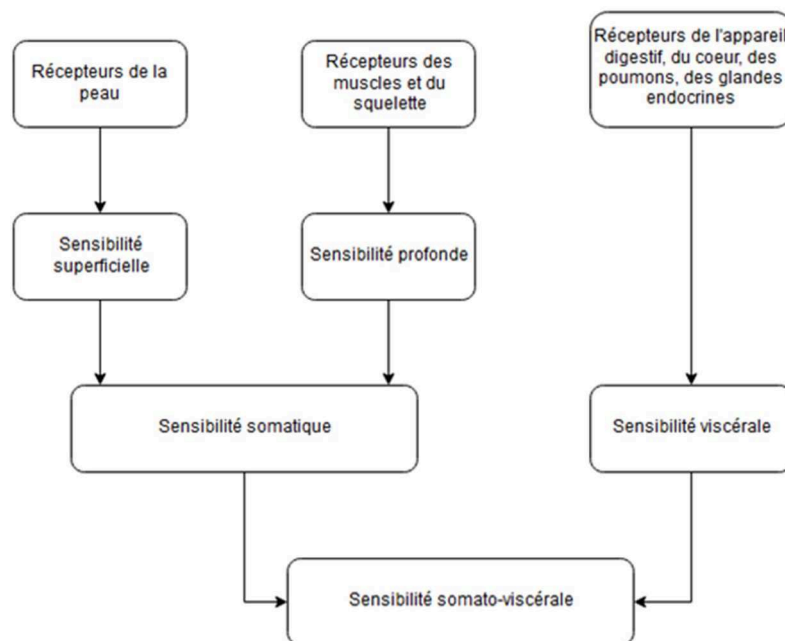


Figure 2 Principales subdivisions de la somesthésie

Les circuits de traitement de l'information tactile et haptique sont multiples et impliquent la peau, le système musculo-squelettique, la moelle épinière et l'encéphale. Par exemple, la Figure 3 représente le trajet d'une sensation tactile due à un écoulement d'eau sur la main : les récepteurs sensoriels de la peau détectent des signaux au niveau des doigts créant un influx nerveux qui traverse la moelle épinière pour aller dans le cerveau. L'influx est transmis au thalamus, puis au cortex cérébral pour décodage et traitement de l'information. En réponse, une action motrice peut être enclenchée via les aires motrices supérieures qui vont envoyer la commande motrice jusqu'aux muscles concernés.

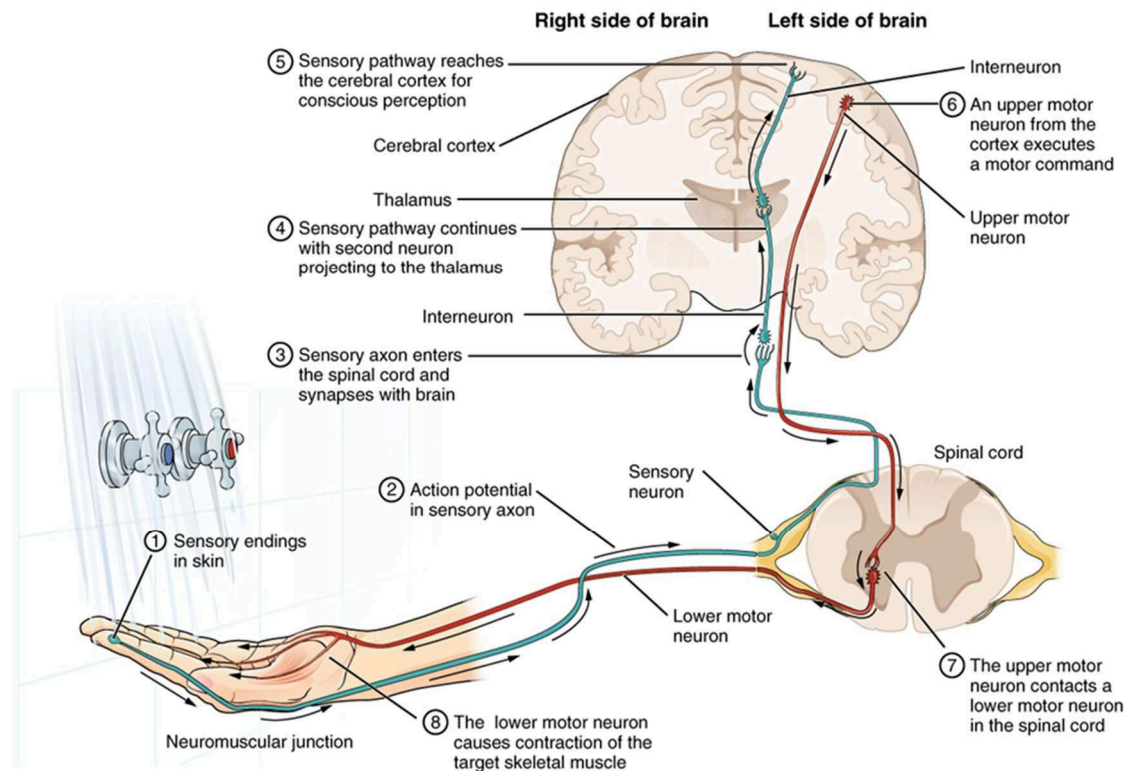


Figure 3 Chemin de perceptions sensorielles, de l'eau qui coule sur notre main à notre cerveau, un chemin direct et rapide

Source : [OpenStax]

Comme mentionné plus haut, la peau regroupe la plus grande partie des récepteurs tactiles. La peau est le plus grand organe du corps humain, elle peut couvrir entre 1,5m² et 2m² chez l'adulte et peut représenter 4kg d'un adulte moyen (Montagna, 1956; Quilliam, 1978). Elle nous renseigne sur le poids, la température et la rugosité de l'objet touché. D'autre part, elle sert de système d'alerte à la douleur et de régulateur thermique pour notre corps. On peut résumer les fonctions de la peau autour de trois caractéristiques :

1. La matière : La peau délimite notre corps, elle fait office de barrière pour les éléments nocifs extérieurs,
2. L'énergie : La peau permet des échanges d'énergie thermique. Par exemple, la thermorégulation est assurée par la transpiration. Elle permet aussi l'échange d'énergie mécanique car elle fait office d'interface entre un membre et un objet extérieur,
3. L'information : La peau est le siège de la sensibilité tactile, elle permet le passage d'informations relatives aux températures, à la luminosité du milieu et aux vibrations (Benali-Khoudja, 2002).

La peau est composée de trois couches : l'épiderme, le derme et l'hypoderme (Coulard, Poirier, & Racadot, 1980). L'épiderme ne contient pas de récepteurs contrairement au derme et à l'hypoderme. D'autre part, la peau se distingue en deux types majeurs : la peau glabre, reconnaissable par son absence de poils, on la trouve sur la plante des pieds et la partie palmaire des mains, et la peau velue présente sur la majeure partie des autres surfaces de notre peau (Figure 4).

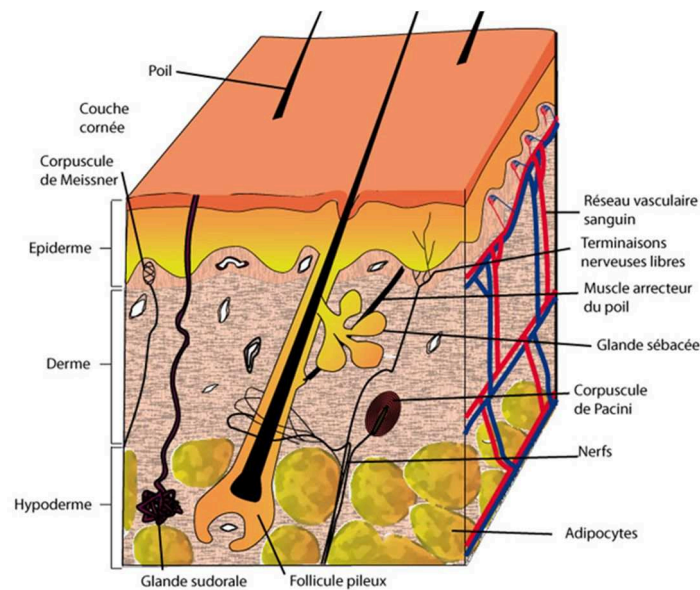


Figure 4 Composition de la peau

Source : [<https://biologiedelapeau.fr>]

Les sensibilités cutanées sont élaborées à partir des informations issues des mécanorécepteurs, des nocicepteurs et des thermorécepteurs. Seuls les mécanorécepteurs seront évoqués dans ce chapitre, nous ne nous intéresserons pas aux informations de douleurs et de chaleurs [pour plus de détails voir (Hensel, 1973; Ochoa & Torebjörk, 1989)].

A travers les différentes couches de notre peau, nous comptons quatre types de mécanorécepteurs. Au sein de la partie superficielle du derme se trouvent les mécanorécepteurs les plus sollicités lorsque notre peau entre en contact avec un élément extérieur : les disques de Merkel, sont sensibles à une pression soutenue appliquée sur la peau ; les corpuscules de Meissner, sont sensibles au toucher léger, et ils réagissent aux vibrations de basses fréquences (autour de 50 Hz). Ces deux types de récepteurs sont les plus nombreux. Dans les parties plus profondes, sont localisés les corpuscules de Ruffini sensibles aux étirements de la peau ; ainsi que les corpuscules de Pacini, sensibles aux vibrations de hautes fréquences (sensibilité

optimale vers 200 Hz) et aux indentations rapides. Le Tableau 2 présente les principales caractéristiques des différents mécanorécepteurs (Bolanowski, Gescheider, Verrillo, & Checkosky, 1988; Reynier & Hayward, 1993; Shimoga, 1993) .

Tableau 2 Principales caractéristiques des mécanorécepteurs

Caractéristiques	Corpuscules de Meissner	Disques de Merkel	Corpuscules de Pacini	Corpuscules de Ruffini
Position	Partie superficielle du derme	Derme	Derme	Partie superficielle du derme
Moyenne zone réceptive	13 mm ²	11 mm ²	101 mm ²	59 mm ²
Intervalle de réponse en fréquence	10-200 Hz	0, 4 – 100 Hz	70 – 1 000 Hz	0, 4 – 100 Hz
Seuil de fréquence minimal	40 Hz	50 Hz	200-250 Hz	50 Hz
Sensible à la température	Non	Oui	Oui	>100 Hz
Vitesse de transmission	54-60.mms ⁻¹	40-70 mms ⁻¹	57-75 mms ⁻¹	50-70 mms ⁻¹
Paramètre physique senti	Courbature de la peau, vitesse, glissement, contact léger	Courbature de la peau, pression	Vibration, glissement, accélération	Etirement de la peau, contact local

Le sens du toucher dépend aussi d'informations qui proviennent d'organes autres que la peau, en particulier les muscles et les articulations. *Les sensibilités musculaires* sont issues des fuseaux neuromusculaires, présents dans les muscles. Ils indiquent l'étirement de celui-ci. Ces sensibilités proviennent également des organes neurotendineux de Golgi, qui renseignent sur l'allongement des tendons.

Les sensibilités articulaires font appel à des corpuscules de Ruffini et de Pacini, analogues à ceux de la peau et aux organes de Golgi, tels que ceux présents dans les muscles.

I.2 Psychophysique de l'appareil tactile humain

La psychophysique est une branche de la psychologie expérimentale qui a pour but de quantifier les relations entre un stimulus physique et la perception que l'on en a (Fechner, 1877). Weber (1978), a été l'un des pionniers dans l'étude systématique de la sensibilité de la peau.

Son travail a permis de caractériser la psychophysique de l'organe tactile humain selon trois critères :

- Le seuil de stimulation est la quantité minimale d'information nécessaire pour qu'apparaisse une sensation. Il est différent pour chaque mécanorécepteur et est très dépendant du mouvement de la surface de la peau, de la viscosité de la surface et de la température (Ino et al., 1993).
- Le seuil de discrimination spatiale représente la distance minimale entre deux stimuli ponctuels pour qu'ils soient perçus comme séparés. Il est inversement proportionnel à la densité des récepteurs dans le territoire stimulé. La peau a une innervation afférente très riche, dont la densité varie beaucoup d'une zone à une autre (Grunwald, 2008). Ces différentes densités entraînent des seuils de sensibilités différents (Figure 5). Ce seuil est mesuré à l'aide d'un compas à pointe sèche. Les seuils les plus bas (1-3 mm) sont situés à l'extrémité de la langue et au bout des doigts ; par opposition, le dos est la région où le seuil de discrimination spatiale est le plus élevé (50-70 mm) (Johnson & Phillips, 1981).

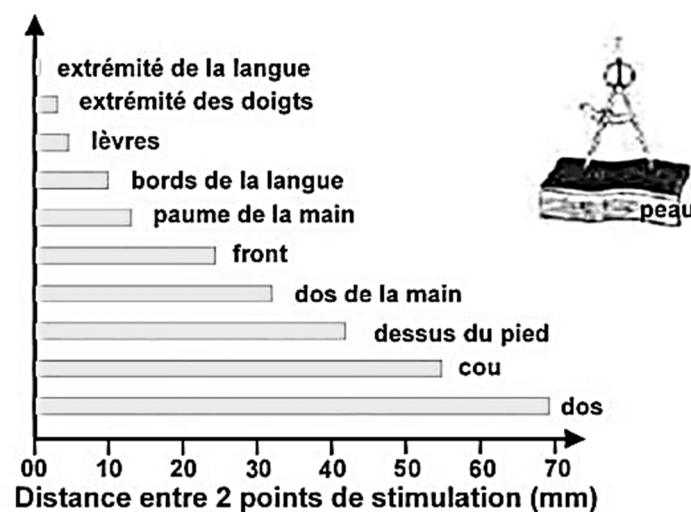


Figure 5 Seuil de discrimination spatiale tactile selon les régions du corps

Source : [[neur-one](#)]

- La durée du stimulus, appelée aussi durée de saturation correspond à la durée au-delà de laquelle, l'intensité de la sensation devient indépendante de l'intensité de la stimulation. Des stimulations constantes sur de longues durées sont perçues comme si elles étaient de moins en moins intenses : le système sensoriel mis en jeu s'adapte. Ce phénomène nous rend donc plus sensible aux variations

d'intensité d'une stimulation qu'à la valeur absolue de l'intensité d'une stimulation donnée. Il existe un intervalle de temps minimum à partir duquel deux stimulations sont ressenties comme séparées dans le temps (Larguier des Bancel, 1902).

I.3 Aspects psycho-fonctionnels du toucher

Le sens du toucher regroupe les sensations tactiles et haptiques. Le terme haptique, au sens strict, intègre les informations cutanées et kinesthésiques (Révész, 1950). Celles-ci permettent à l'individu d'explorer son environnement. Chez les nouveau-nés le sens du toucher est l'un des sens les plus développés (de Ajuriaguerra, 1989). Tant que notre besoin de toucher et d'être touché est satisfait nous grandissons sainement, mais lorsqu'il est inhibé notre développement physique et émotionnel risque d'en souffrir (Ashley, 1979; Field, 2010). Le toucher peut être également thérapeutique quand son utilisation permet un abaissement du stress et de l'anxiété. Les études ont montrés des effets positifs sur la croissance, le rythme cardiaque et le système immunitaire (Apostle-Mitchell & MacDonald, 1997; Maville, Bowen, & Benham, 2008; Olson & Sneed, 1995; Phelan, 2009; Ramnarine-Singh, 1999). Les interactions tactiles et haptiques entre deux personnes dépendent de la culture des individus concernés. Ainsi, nous pouvons parler parfois de culture tactile, ou de culture non tactile, voire « froide » (Andersen & Leibowitz, 1978). Par exemple, des études ont observé des différences de comportements tactiles en fonction des cultures, identifiant les cultures du Sud de l'Europe comme utilisant le toucher plus fréquemment que les cultures du Nord de l'Europe (Dibiase & Gunnoe, 2004; Remland, Jones, & Brinkman, 1995).

De nombreuses études sur la perception tactile se sont focalisées sur l'application de stimuli (cheveux, objets arrondis, métaux chauds et froids , etc...) sur la peau d'un observateur passif, limitant ainsi les entrées sensorielles aux seuls récepteurs de la perception cutanée (Lederman & Klatzky, 2009). Par opposition, Gibson (1962) a mis en évidence une dualité dans l'expérience du toucher. Ses différentes études ont montré que, d'une part, être touchée de manière passive amène la personne à être concentrée sur les sensations subjectives de son corps ; d'autre part, le contact résultant d'une exploration active entraîne la personne à prêter attention aux propriétés de l'environnement extérieur. Cette dualité se retrouve dans la différence entre tactile et haptique : Grâce à l'haptique nous obtenons des informations sur les

objets en les manipulant activement, avec une entrée à la fois cutanée et kinesthésique (Gibson, 1966).

Lederman et Klatzky (Lederman & Klatzky, 1987) ont mis en évidence un certain nombre de caractéristiques que nous pouvons extraire d'un objet en l'explorant. Ces caractéristiques sont la texture, la rigidité, les propriétés thermiques, le poids, le volume, la forme générale et la forme précise. Leurs résultats indiquent que l'exploration manuelle est systématique, et suit des motifs d'explorations hautement stéréotypés désigné par le terme « procédures d'explorations » (Exploratory Procedures : EP). Nous utilisons chaque EP en fonction des caractéristiques des objets que nous souhaitons identifier. La Figure 6 présente ces différentes procédures.

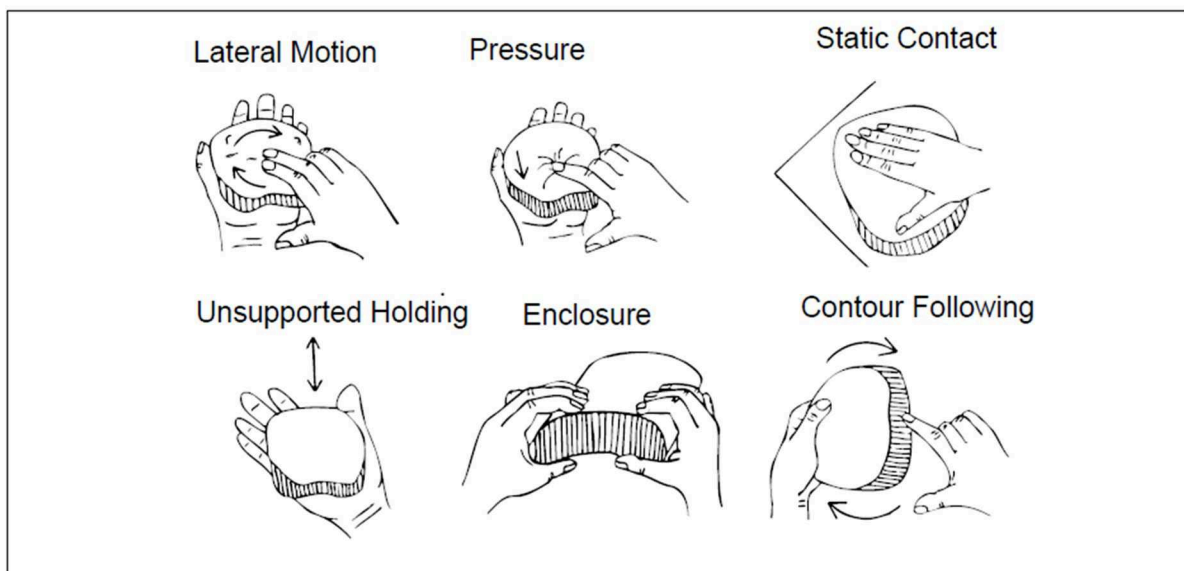


Figure 6 Procédures d'explorations primaires

Source : [Lederman et Klatzky, 1978]

L'EP *mouvement latéral* implique des mouvements d'aller-retour tangentiels à la surface de l'objet exploré ; elle est typiquement utilisée pour identifier une texture. L'EP *pression* correspond à l'application de forces normales ou de couples suivant un axe de l'objet ; cette procédure est communément employée pour identifier la rigidité de l'objet. L'EP *contact statique* ou simple contact entre la peau et la surface d'un objet permet d'évaluer les propriétés thermiques de l'objet. L'EP *pesée* correspond au soulevé dynamique de l'objet pour en estimer son poids. L'EP *enclos* ou modelage du contour de l'objet avec les doigts et la paume de la main permet d'obtenir des informations sur le volume de l'objet et sa forme globale. L'EP *suivi*

de contour est utilisée pour connaître la forme exacte de l'objet, venant ainsi compléter les informations obtenues par la précédente EP. (Lederman & Klatzky, 2009). Pour plus de détails concernant l'exploration par le toucher et la richesse des informations obtenues via ce sens, le lecteur peut se référer à (Jacobson, 2009).

I.4 Conclusion

Comme évoqué dans ce chapitre, le sens du toucher permet d'explorer son environnement et d'interagir avec autrui. Ce sens est parfois utilisé pour pallier aux difficultés des personnes avec handicap, comme pour les personnes malvoyantes qui s'appuient sur le toucher pour la lecture. Cette piste pourrait également être intéressante pour les personnes avec Trouble du Spectre de l'Autisme. Certaines d'entre elles étant non-verbales, de nombreux moyens de communications alternatifs sont mis en place, dont certains utilisent en partie le sens tactile. Nous détaillerons ce point dans le chapitre 3.

Il existe des nouvelles technologies qui simulent des contacts tactiles pour communiquer avec un individu. On peut noter différents appareils de contact à distance tel que Hug me (Cha, Eid, Rahal, & Saddik, 2008) qui permettent de simuler le contact de son partenaire absent. Certains chercheurs distinguent les Tactons ou icônes tactiles qui sont des messages tactiles qui peuvent être utilisés pour communiquer des messages non visuels (Brewster & Brown, 2004) et les Hapticons ou icônes Haptiques qui correspondent à des forces appliquées à un utilisateur grâce à une interface haptique, ayant pour but de communiquer des idées simples de manière similaire aux icônes visuelles ou auditives (Karon E. MacLean, 2008a). Les Tactons ou les Hapticons, sont des messages structurés abstraits dont la diversité et la combinaison permettent de communiquer des concepts complexes. Par exemple, les propriétés des Tactons, telles que la fréquence, l'amplitude, la forme de l'onde, la durée, le rythme, et la position peuvent être manipulées pour envoyer un message spécifique.

D'autres concepts d'interfaces tactiles et haptiques ont pour but d'alerter l'utilisateur, en lui indiquant un changement dans son environnement nécessitant, ou non, une réaction de sa part. On peut les retrouver dans différents contextes : automobiles (Filgueiras et al., 2016; Riener & Ferscha, 2008; Sinha, Kumar, Singh, & Singh, 2015; Yunqing Wang & Kuchenbecker, 2012), sports (Alahakone & Senanayake, 2009), sommeil (Haghi, Thurow, & Stoll, 2017), et travail (Duong, Andargie, Chen, Giakoumidis, & Eid, 2014). Les vibrations

tactiles des téléphones portables ou des manettes de jeux vidéo sont parmi les mieux connus des stimulations tactiles pour la notification.

Dans le prochain chapitre, les particularités du sens du toucher dans le Trouble du Spectre d'Autisme (TSA) sont décrites. Puis, nous verrons dans le chapitre 3 les différentes technologies existantes pour stimuler le sens du toucher chez les personnes TSA.

II. Les particularités sensori-motrices chez les personnes atteintes de Trouble du Spectre de l'Autisme

II.1 Introduction

En préambule de ce chapitre portant spécifiquement sur les particularités sensorielles des individus avec autisme, il paraît nécessaire de préciser quelques concepts de références sur la sensorialité.

Tout organisme vivant, et l'être humain en particulier, est en perpétuelle interaction avec son environnement. Ces interactions lui permettent de se déplacer et de réagir vis-à-vis de situations particulières. Cela nécessite une permanente prise d'information et la circulation de messages entre les différentes parties du corps. Cette prise d'information se réalise grâce aux différents organes sensoriels. Le système nerveux central a pour charge d'intégrer ces informations et éventuellement permettre une réponse adaptée de l'organisme (Kandel, Schwartz, Jessell, & Mack, 2013). Les auteurs différencient habituellement sensation et perception. Des définitions de ces termes sont proposées ci-dessous :

- La sensation : En neuroscience, la détection d'un stimulus et la reconnaissance d'un évènement qui s'est produit sont habituellement appelés sensation (Squire, 2013). La sensation est propre à chaque modalité sensorielle. Les stimuli peuvent être captés par nos récepteurs sensoriels. La sensation a un caractère à la fois universel, tous les individus perçoivent leurs environnements avec un ou plusieurs sens. Elle a aussi un caractère relatif, chaque individu ne ressentant pas les stimuli de la même façon (Carterette & Friedman, 1974).
- La perception : L'interprétation et l'appréciation de l'évènement, détectées par la sensation, constituent la perception (Squire, 2013). La perception dépend des connaissances de chacun c'est-à-dire des stimuli, du contexte et de l'apprentissage (Postman, Bruner, & McGinnies, 1948).

Chez l'être humain, les différents systèmes sensoriels sont : le système visuel, le système tactile, le système auditif, le système gustatif, le système olfactif et le système proprioceptif qui permet la sensation de l'état de tension des muscles et des articulations. Il est défini comme le sens de la position et du mouvement des parties du corps (Sherrington, 1906).

On définit le traitement de l'information sensorielle comme étant la capacité du cerveau à enregistrer, organiser et donner du sens à l'information reçue de ses sens (Ayres, 1989). Les troubles du traitement de l'information sensorielle correspondent à des réponses motrices, comportementales, émotionnelles et attentionnelles inhabituelles qui ont théoriquement été causées par l'incapacité du cerveau à traiter les informations visuelles, auditives, tactiles, olfactives, gustatives, ou proprioceptive (Suarez, 2012). Ce trouble englobe les troubles de la modulation sensorielle, les troubles moteurs à bases sensorielles et les troubles de la discrimination sensorielle (Miller, Anzalone, Lane, Cermak, & Osten, 2007) (Figure 7). Les troubles moteurs à base sensorielle sont caractérisés par de mauvaises postures ou mouvements volontaires (Miller et al., 2007). Les troubles de la discrimination sensorielle correspondent à une difficulté d'interprétation des qualités des stimuli sensoriels et à une incapacité à percevoir des similarités et des différences entre stimuli (Miller et al., 2007). Les troubles de la modulation sensorielle font référence aux difficultés à filtrer les informations sensorielles. Le présent travail s'intéresse essentiellement à la modulation sensorielle et aux troubles moteurs à base sensorielle, car ils sont les plus caractéristiques du TSA.

Trois types de comportements ont été observés dans les troubles de la modulation sensorielle : L'hyper-réactivité, l'hypo-réactivité et la recherche de sensation. L'hyper-réactivité correspond à une réponse exagérée, très rapide ou très prolongée à des stimulations sensorielles. Par contraste, l'hypo-réactivité relève d'un manque de prise en compte d'un stimulus ou d'une lenteur à répondre. La recherche sensorielle est définie comme un besoin ou un intérêt très marqué pour les expériences sensorielles prolongées ou intenses (Cermak & Ben-Sasson, 2007).

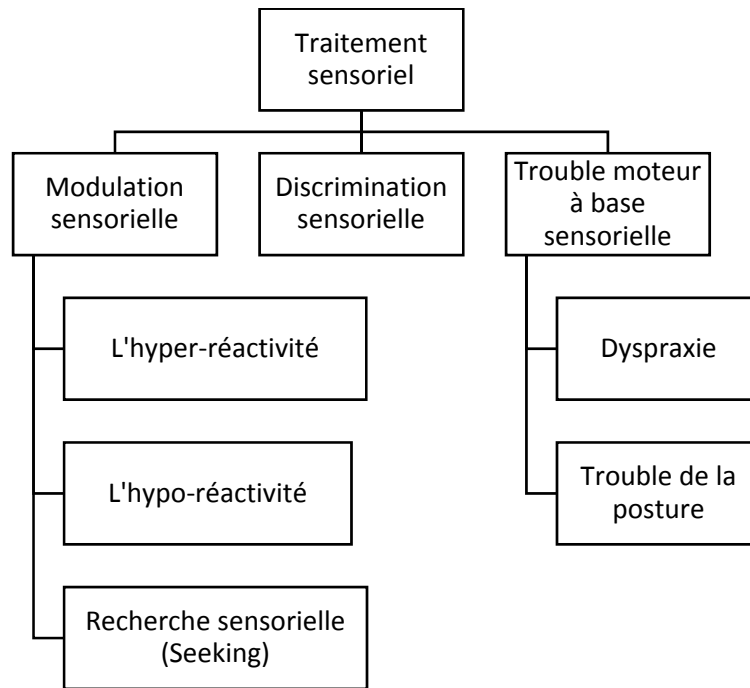


Figure 7 Troubles Sensoriels

Source : [Adaptée de (Cermak & Ben-Sasson, 2007; Miller et al., 2007; Minshew & Hobson, 2008)]

Parmi les critères de diagnostic du Trouble du Spectre de l'Autisme (TSA), les particularités sensorielles sont un élément fondamental. Bien qu'observées par le Docteur Kanner dès 1943, il a fallu attendre le DSM-5 pour que ce critère soit mis en avant. En effet, l'hétérogénéité de ces particularités, leurs difficultés d'observations, parfois, et les interrogations quant à leurs origines alimentent les recherches des communautés scientifiques.

Ce chapitre aborde quelques informations clés pour comprendre ce que sont les particularités sensorielles chez les personnes avec TSA, leurs prévalences, leurs évaluations et en quoi elles constituent un aspect de notre travail de recherche.

II.2 Particularités sensorielles des personnes avec TSA

II.2.1 Définition

Les chercheurs et cliniciens spécialistes s'accordent pour considérer que l'autisme recouvre une large gamme de conditions différentes qui forment un continuum, désigné par l'expression "Troubles du Spectre d'Autisme" (TSA). Les classifications internationales en vigueur actuellement (American Psychiatric Association, 2013) définissent les TSA sur la base de deux critères principaux: (1) déficits persistants dans la communication sociale et les

interactions sociales; (2) des patterns de comportements, d'intérêts ou d'activités restreints et répétitifs. La prévalence des TSA au niveau mondial est estimée à environ 0,6 % de la population (Fombonne, 2003). En France, une étude récente portant sur les registres départementaux relève qu'un peu plus de 30 naissances sur 10 000 reçoivent un diagnostic d'autisme (Delobel et al., 2013). Cependant, ce chiffre est certainement sous-évalué du fait des difficultés à recenser efficacement l'ensemble des cas. Les individus avec Trouble du Spectre d'Autisme présentent une grande variété de profils cognitifs. La diversité interindividuelle est particulièrement importante en ce qui concerne les performances intellectuelles. Selon Fombonne (2003), l'autisme est associé à un retard mental plus ou moins sévère dans 70 % des cas. Il existe, néanmoins, un sous-groupe du spectre, désigné sous le terme d'autisme de haut niveau de fonctionnement, pour lequel les mesures du quotient intellectuel sont équivalentes ou même supérieures à la population moyenne.

L'impact social pour les personnes avec Troubles du Spectre de l'Autisme est important. Seuls 20% des enfants avec TSA arrivent à suivre une scolarité ordinaire sans aide spécialisée (Pinborough-Zimmerman et al., 2012; Prado, 2013). A l'âge adulte, la majorité des personnes avec TSA sont sans emploi. En effet, une étude menée par Hofvander et al. (2009) décompte seulement 43 % d'adultes employés ou étudiants dans une population de 122 adultes avec TSA et sans déficience intellectuelle.

II.2.2 Les symptômes sensoriels

Dès ses premières descriptions, l'autisme est caractérisé par la présence de troubles de la communication et des interactions sociales (Kanner, 1943). Le docteur Kanner relève aussi chez certains des 11 enfants observés des désordres perceptifs ; notamment une réactivité soit trop élevée soit inexistante aux sons, une attention particulière aux détails, une aversion pour le mouvement. Il faudra attendre 2013 avec la parution du DSM-5 (Manuel Diagnostique et statistique des troubles mentaux) pour inclure les particularités sensorielles comme sous critère de diagnostic du Trouble du Spectre de l'Autisme (American Psychiatric Association, 2013). En effet, pour être considéré comme un symptôme essentiel, il aura fallu démontrer les aspects universel (présent chez quasiment tous les individus avec ce syndrome), unique (différent des individus avec d'autres diagnostic cliniques) et spécifique (différent des autres symptômes déjà décrits) à la nature du syndrome (Sigman, 1994).

A travers le récit de leurs vies, des personnes avec Asperger nous offrent la possibilité de voir le monde à travers leurs yeux : Ils nous donnent accès à une meilleure compréhension de leurs difficultés, et donnent une voix à tous ceux qui ne peuvent s'exprimer. Ainsi, Temple Grandin, femme avec autisme, docteure en science animale, écrivaine et militante pour l'Autisme, fait le récit de ses expériences de vie, et notamment de ses particularités sensorielles, motrices et sociales à travers son autobiographie (Grandin, 1992). Par exemple, elle a construit une machine où elle pouvait s'auto comprimer en s'inspirant des machines de maintien individuel des bestiaux.

Donna Williams, dans son autobiographie (Williams, 1995), au titre français plus qu'évocateur « Si on me touche, je n'existe plus », nous offre un témoignage de sa vie assez poignant, où sont dressées de nombreuses situations illustrant ses particularités sensorielles. Par exemple, « Je me tirais les cheveux et, par miracle, je ressentais quelque chose. Je me mordillais les bras et goûtais le sel de ma peau. C'était moi. » Ou encore « Pour percevoir le contact physique comme un plaisir, il fallait toujours que ce contact se fasse à mon initiative et, à tout le moins, qu'on me donne le choix de le refuser ou de l'accepter. »

On peut observer à la lecture de ces témoignages, que les difficultés et les symptômes de chacun s'expriment à des degrés variés. On y retrouve des particularités sensorielles et perceptions atypiques du monde qui interagissent avec les difficultés sociales et difficultés de communication propre à l'autisme.

Les particularités sensorielles dans l'autisme sont multiples et variées, impliquant une ou plusieurs modalités sensorielles. Dans le domaine visuel, des réactions négatives à la lumière sont observées (Baranek et al., 2013). Dans le domaine auditif, la littérature mentionne la présence de réactions de contrariétés, voire de détresse, dues au bruit, ainsi qu'une ouïe extrêmement précise et fine (Leekam, Nieto, Libby, Wing, & Gould, 2007). Dans le domaine tactile, on observe une aversion marquée pour certains types de tissus et un intérêt accru pour des activités quotidiennes impliquant de fortes stimulations tactiles telles que se couper les ongles (Dunn, Myles, & Orr, 2002) ou les embrassades (Grandin, 1992). Dans le domaine olfactif ou gustatif, la littérature rapporte des préférences pour la nourriture liées à la couleur des aliments, leurs textures, odeurs (Leekam et al., 2007) ou à leur effet gustatif (épicé, salé, sucré etc.) (Dunn et al., 2002). Dans le domaine proprioceptif, les particularités sensorielles se manifestent par la présence de seuils de douleurs ou de détection de chaleur inhabituels (Riquelme, Hatem, & Montoya, 2016). Pour plus de détails sur les différentes particularités sensorielles, le lecteur peut consulter (Deguenne-Richard, 2014).

Outre ces témoignages, les particularités sensorielles des individus avec Trouble du Spectre de l'Autisme ont été objectivées par la recherche clinique.

II.2.2.1 Objectivations cliniques

Afin d'identifier des patterns de symptômes dans le Trouble du Spectre de l'Autisme, Greenspan et al (1997) ont analysé les dossiers de 200 enfants avec TSA, âgés de 22 mois à 4 ans en début d'étude, sur 8 ans. Leurs résultats indiquent que les 200 cas présentent des dysfonctionnements de traitement de l'information auditive, de la planification motrice et de la modulation sensorielle. Toutefois, il y a des différences frappantes dans la manière dont les différents enfants traitent les informations, planifient et réalisent les actions motrices.

McAlonan et al (McAlonan et al., 2002) ont étudiées l'anatomie du cerveaux, et notamment les zones impliquées dans la modulation sensorimotrice de 24 adultes contrôles et 21 adultes avec syndrome d'Asperger à l'aide d'imagerie à résonnance magnétique (IRM). La modulation sensorimotrice était significativement moins efficace chez les participants avec syndrome d'Asperger, avec une diminution de la matière grise dans les régions fronto-striatales et du cervelet ainsi que des différences généralisées de la matière blanche.

L'entourage proche des personnes avec TSA est souvent consulté à l'aide de différents questionnaires. En effet, certaines personnes avec TSA ne sont pas capables de communiquer, et peuvent présenter des déficiences mentales. Dans de tels cas, le recours aux parents ou proches aidants s'avère nécessaire.

Ornitz (1977) ont sélectionné 74 jeunes enfants avec TSA afin d'observer des comportements spécifiques et la présence ou l'absence de conditions pathologiques associés. Ces données ainsi que celle de 38 enfants avec âge et développement correspondant ont été comparées. De plus, les parents de ces enfants ont eu à remplir des questionnaires sur le développement de leurs enfants lorsqu'ils avaient moins de 4 ans. Les résultats indiquent que les enfants avec TSA avaient des retards de développement significatifs dans les compétences motrices, la parole, la communication, la compréhension et dans une moindre mesure la perception durant leurs deux premières années.

Kientz et Dunn (1997) ont utilisé un questionnaire communément employé pour évaluer les troubles du traitement sensoriel : le profil sensoriel (Sensory Profile (Dunn, 1994)). Il a été rempli par les parents de 32 enfants avec TSA, âgés entre 3 et 13 ans, et les parents de 64 enfants

avec un développement typique, âgé de 3 à 10 ans : les résultats indiquent 85 % de différences de réponses sur les compétences de traitements des informations sensorielles entre les enfants avec TSA et les enfants avec développement typique.

Se servant à nouveau du Profile Sensoriel, Ermer et Dunn (1998) ont étudiés trois groupes d'enfants de 3 à 15 ans, 38 avec autisme ou trouble envahissant du développement, 61 avec troubles d'hyperactivité avec déficits d'attention et 1075 sans trouble. Ils ont déterminés deux fonctions permettant de distinguer les différents groupes aux travers de leurs réponses au Profile Sensoriel, avec 90 % de distinctions correctes. La première fonction a permis de discriminer les enfants avec des handicaps de ceux qui n'en avaient pas, en observant le facteur « Inattention / distractibilité ». La deuxième fonction, a permis de dissocier les enfants avec Autisme ou trouble envahissant du développement des enfants avec trouble d'hyperactivité avec déficits d'attention en combinant l'observation des facteurs « recherche de sensation », « sensibilité sensorielle orale » et « Motricité fine/ Perceptuelle ». Ce questionnaire a, par la suite, été employé pour identifier des patterns dans le traitement des informations sensorielles chez des enfants avec syndrome d'Asperger (équivalent au TSA sans retard mental). Ainsi Dun, Myles et Orr 2002 ont comparé les scores du Profil Sensoriel entre 42 enfants avec Asperger et 42 enfants sans trouble. Les résultats indiquent des différences significatives entre les deux groupes sur 22 des 23 items utilisés dans le Profil Sensoriel.

Une version courte du Profile Sensoriel, le Short Sensory Profile, a été également développée et testée par Tomchek et Dunn (2007). L'étude a comparé les scores obtenus par 281 enfants avec Autisme et 278 enfants avec développement typique d'âge apparié (entre 3 et 6 ans) : 95 % des enfants avec TSA présentaient des différences dans le traitement des informations sensorielles. Néanmoins, les données ne permettent pas de faire émerger des patterns communs.

Baranek, David, Poe, Stone et Watson (2006) ont créé un questionnaire, le questionnaire d'expérience Sensoriel (Sensory Experiement Questionnaire SEQ), qui est remplis par les soignants des personnes avec TSA. Ils l'ont testé sur 258 enfants entre 5 mois et 6 ans, répartis en 4 groupes : Autism, autres troubles envahissant du développement, autres troubles du développement et ceux avec développement typique. Leur but était d'identifier les caractéristiques sensorielles et essayer de mettre en avant des patterns d'hyper et hypo réponse aux stimulations sensorielles des enfants avec autisme, retard de développement et développement typique : les résultats indiquaient une augmentation des symptômes sensoriels

chez les enfants avec TSA. De plus, les enfants avec TSA présentaient un pattern d'hyporéponse dans des contextes sociaux et non sociaux.

Leekam, Nieto, Libby, Wing et Gould (2007), ont utilisé « l'interview diagnostic » pour les troubles de la communication sociale (the diagnostic interview for social communication Disorders : DISCO) pour essayer d'identifier des patterns de particularités sensorielles chez des enfants et des adultes avec TSA. De plus, ils ont recherché s'il existait des corrélations entre ces particularités et l'âge physique ou le niveau de quotient intellectuel (QI) des participants. : Ils ont, notamment, observés la présence de particularité sensorielle chez les participants de tous les âges. Il semblerait que certains symptômes sensoriels évoluent en fonction de l'âge et du QI. La première étude montre que 90 % des enfants avec TSA présentent des particularités sensorielles, et même dans plusieurs domaines sensoriels ; la seconde, portant sur des enfants et des adultes avec TSA, indique que les particularités sensorielles observées sont omniprésentes, multimodales et persistantes quel que soit l'âge et les compétences des enfants et adultes avec TSA.

Afin d'explorer les pistes neurologiques pour identifier les particularités sensorielles présentées chez les personnes avec TSA, Minshew et Hobson (2008) ont employés le questionnaire de sensibilité sensorielle (Sensory Sensivity Questionnaire) ainsi que des tests neuropsychologiques sur 60 enfants avec autisme de haut niveau et 61 enfants contrôles : Les données indiquent que 30 % des participants avec autisme ont eu de fort taux d'erreurs sur les items utilisant la perception sensorielle corticale plus élevée.

Parmi les études mentionnées ci-dessus, nous avons pu observer différentes méthodes pour évaluer les particularités sensorielles des individus avec TSA, principalement des questionnaires remplis par des parents ou soignants, voire l'individu concerné, lorsque ses capacités le lui permettent (Burns, Dixon, Novack, & Granpeesheh, 2017).

Les principaux questionnaires sont le Profil Sensoriel (Dunn, 1999), le Profile Sensoriel Court (D. McIntosh, Miller, Shyu, & Dunn, 1999), et l'Interview de diagnostic pour les troubles de la communication sociale (DISCO) (Wing, Leekam, Libby, Gould, & Larcombe, 2002). On peut aussi mentionner le Sensory Sensitivity Questionnaire-Revised (Talay-Ongan & Wood, 2000) qui a été spécialement conçu pour étudier les particularités sensorielles dans l'autisme, ainsi que le Sensory Perception Quotient (SPQ) (Tavassoli, Hoekstra, & Baron-Cohen, 2014).

Les compétences sensorielles sont aussi prises en compte dans des outils d'aide au diagnostic tel que l'ADI-R (Catherine Lord, Rutter, & Le Couteur, 1994).

Des batteries de tests utilisés lors de bilans neuropsychologiques existent aussi pour évaluer les compétences sensori-motrices des individus, par exemple les « Luria Nebraska neuropsychological battery tactile test » (Golden, 1980) et « Reitan-Klove (RK) Sensory Perceptual Examination » (Reitan & Wolfson, 1994).

Des tests ont également été créés pour évaluer les compétences sensori-motrices des patients, lors d'observations directes en milieux cliniques. On peut citer notamment « The Sensory Integration and Praxis Tests (Ayres, 1989), » et le « Bilan sensori moteur » de Bullinger et al. (1996).

Ces objectivations cliniques nous montrent la présence de particularités sensorielles variées chez les personnes avec TSA ; ainsi qu'une absence de pattern général identifié, et ce, quelle que soit la méthode d'évaluation, direct ou indirect, utilisée.

II.2.3 Prévalence des particularités sensorielles

Les particularités sensorielles semblent être présentes chez 42 à 88 % des enfants avec autisme en âge d'aller à l'école (Baranek et al., 2006; Ben-Sasson et al., 2009; Cermak & Ben-Sasson, 2007; Kientz & Dunn, 1997; Minshew & Hobson, 2008; Ornitz et al., 1977; Tomchek & Dunn, 2007). Elles apparaissent comme communes mais pas universelles chez les personnes avec TSA (Baranek et al., 2006; Dawson, Osterling, Meltzoff, & Kuhl, 2000). Elles concernent souvent plusieurs modalités (Cermak & Ben-Sasson, 2007; Kern et al., 2006; Leekam et al., 2007). 94 % des personnes avec TSA présenteraient des troubles sensoriels, alors que pour d'autres groupes cliniques tels que les troubles du développement, cela ne concernerait que 65 % des participants (Baranek et al., 2006; Ben-Sasson et al., 2009; D. N. McIntosh, Miller, Shyu, & Hagerman, 1999; Tomchek & Dunn, 2007). La fréquence des particularités sensorielles serait plus grande chez les personnes avec autisme sans retard mental que chez celles ayant un retard de développement (Freeman, Ritvo, & Schroth, 1984; Leekam et al., 2007).

Les comportements d'hypo-réactivité à des stimulations sensorielles et de recherche de sensation seraient significativement plus présents dans le Trouble du Spectre de l'Autisme que dans d'autres troubles développementaux et dans le développement typique (Baranek et al., 2006; Ben-Sasson et al., 2009; Tomchek & Dunn, 2007). D'autres études mentionnent une prédominance des comportements de hyper et hypo-réactivité (Baranek et al., 2006; O'Neill & Jones, 1997). Les comportements d'hyper et hypo-réactivités à des stimulations sensorielles pourraient coexister dans l'Autisme (Greenspan & Wieder, 1997; Hirstein, Iversen, &

Ramachandran, 2001; Williams, 1995). La prévalence des particularités sensorielles chez les adultes avec TSA n'est pas aussi bien établie (Leekam et al., 2007; O'Neill & Jones, 1997).

Nous pouvons retenir que les particularités sensorielles sont communes et fréquentes chez les personnes avec TSA, elles permettent de les distinguer précisément d'autres groupes cliniques en ayant également. Ce qui en fait une spécificité type chez les TSA. Toutefois elles se manifestent de façon différente au sein du Spectre et peuvent être rattachées à trois types de comportement sensoriel : l'hyper réactivité, l'hypo réactivité et la recherche de sensation.

II.3 Facteurs indicateurs de sévérité

Plusieurs études ont porté sur la recherche de patterns de particularités sensorielles en corrélation avec différents facteurs tels que l'âge chronologique, l'âge mental, le quotient intellectuel ou le genre. Baranek, David, Poe, Stone & Watson (2006) ont observé, à l'aide du Questionnaire d'Expériences Sensorielles, 258 enfants entre 5 et 80 mois répartis en 5 groupes de diagnostic (Autisme, autres troubles envahissant du développement, retard développemental/retard mental, autres troubles développementaux et développement typique). Selon leurs résultats l'intensité des symptômes sensoriels seraient inversement liés à l'âge mental. Le genre ne serait pas un facteur significatif de la prévalence des symptômes sensoriels.

Dans leur étude sur les particularités sensorielles d'enfants et d'adultes avec autisme, Leekam, Nieto, Libby, Wing et Gould (2007) ont observé 200 enfants et adultes avec TSA, entre 32 mois et 38 ans à l'aide du DISCO (Diagnostic Interview for Social Communication Disorders). Ils ont observé que 90 % des participants présentaient des anomalies sensorielles multiples. Les particularités dans les domaines tactiles et olfactifs/gustatifs ne variaient pas avec l'âge physique ou le Quotient Intellectuel (QI) ; il en était de même pour les particularités auditives. Et de plus, les jeunes individus avec autisme et retard mental présentaient en moyenne plus de particularités sensorielles que les autres.

Ben-Sasson et al.(2009) ont montré, dans leur méta-analyse, que les tout-petits avec autisme ont des fréquences plus faibles de présenter des comportements de recherches de sensation sensorielle. De plus, la fréquence des comportements d'hyper-réactivité sensorielle augmente significativement de 0 à 9 ans puis elle diminue après 9 ans. Ils n'ont pas observé de pattern particulier pour la fréquence des comportements d'hypo-réactivité sensorielle. Ils

concluent que l'amplitude des symptômes semble être modérée par l'âge physique et la sévérité de l'autisme.

Les perturbations sensorielles empêchent une bonne interaction avec son environnement et par conséquent un développement harmonieux (Dunn, 1997). En effet, il est difficile pour les personnes ayant des troubles sensoriels de participer pleinement à des activités de la vie quotidienne qu'elles soient dans un contexte social ou individuel (Little, Ausderau, Sideris, & Baranek, 2015). Ainsi peuvent naître de profondes détresses, anxiétés, frustrations pour ces personnes mais aussi leurs entourages (Suarez, 2012).

II.4 Troubles de la coordination sensorimotrice dans l'autisme

Les troubles du traitement de l'information sensorielle ont des répercussions au niveau de la coordination sensorimotrice. Des difficultés motrices dans l'autisme peuvent être observées dès le 14^{ème} mois de vie et devenir plus prononcées à 24 mois (Baranek, 1999; Landa & Garrett-Mayer, 2006). Les troubles de la coordination motrice sont particulièrement prégnants au niveau de la motricité fine (McPhillips, Finlay, Bejerot, & Hanley, 2014). La coordination motrice fine implique les membres supérieurs sans déplacement du centre de gravité. Elle est fondamentale dans les activités manuelles et en particulier pour atteindre et saisir des objets. Or ces capacités seraient spécifiquement altérées dans l'autisme (Gowen & Hamilton, 2013; Sacrey, Germani, Bryson, & Zwaigenbaum, 2014). L'étude de Ming, Brimacombe et Wagner (2007) portant sur une cohorte de 154 enfants avec autisme de 2 à 18 ans, note que 51 % d'entre eux présentaient une diminution, pathologique ou non, du tonus musculaire. Concernant l'exécution motrice, certaines études sont en faveur d'une augmentation du temps de mouvement pour le pointage, en particulier lorsque les tâches sont complexes (Glazebrook, Elliott, & Lyons, 2006; Nazarali, Glazebrook, & Elliott, 2009). D'autres, par contre, indiquent que la vitesse d'exécution des mouvements serait épargnée voire plus rapide chez les personnes avec TSA (Mari, Castiello, Marks, Marraffa, & Prior, 2003; Rinehart, Bradshaw, Brereton, & Tonge, 2001).

Par ailleurs, il existe des troubles de la coordination motrice globale regroupant les troubles de la posture, du tonus et de la locomotion (Emck, Bosscher, Beek, & Doreleijers, 2009). Dans leur étude transversale impliquant 40 enfants avec TSA âgés de 18 mois à 6 ans comparés à 40 enfants au développement typique appariés selon l'âge, Pusponogoro et al. (2016) montraient que 20 % des enfants avec TSA présentaient des déficiences de coordination

générale. En outre, 80 % des enfants TSA participant à l'étude de Liu et Breslin (2013), présentaient des difficultés motrices ou des retards moteurs en comparaison à des enfants typiques d'âge correspondant. Green et al (2009) observaient que 79 % des participants avec TSA présentaient des troubles moteurs, avec une prévalence plus importante si le Quotient Intellectuel (QI) était inférieur à 70 indiquant un retard mental. Dans les études de Dewey, Cantell et Crawford (2007) 59 % des enfants avec TSA présentaient des troubles moteurs.

Ainsi nous pouvons retenir que les personnes avec TSA peuvent également présenter, en plus des particularités sensorielles, des troubles de la motricité fine et / ou de la motricité globale, et ce, manière fréquente.

II.5 Particularités Tactiles chez les personnes avec TSA

Bien que mentionnées dès les premières observations de l'Autisme par Kanner, les études caractérisant les particularités tactiles restent encore assez rares en comparaison aux recherches sur les particularités visuelles ou auditives. En effet, celles-ci sont assez complexes à étudier, du fait de la multitude de récepteurs différents, de ses canaux neuronaux, de sa relation avec le système vestibulaire et de sa contribution au développement cognitif.

Les récits autobiographiques de personnes avec autisme mentionnent une sensibilité tactile inhabituellement aiguë ou une incapacité à moduler l'entrée tactile de nature à entraver le comportement social lorsque celui-ci implique le toucher interpersonnel (Grandin, 1992). Par exemple Temple Grandin écrit « When I was a child I craved the feeling of being hugged but then I withdrew because I was overwhelmed by the tidal wave of sensation » (Grandin 1992, p108), que l'on peut traduire par « Quand j'étais enfant, j'avais envie d'être étreinte, mais je me retirais parce que j'étais submergée par le raz-de-marée des sensations. » L'aversion au toucher social fait partie des comportements atypiques observés chez les nourrissons plus tard diagnostiqués autistes (Baranek, 1999).

Dawson et al. (2000) relatent l'observation, par des professionnels de santé, d'un enfant durant la première et deuxième année de vie. L'enfant présentait des hypersensibilités au toucher dès les 6 premiers mois, ainsi que des problèmes musculaires, moteurs, de coordination, puis des difficultés dans les interactions sociales. Toujours concernant les observations sur de jeunes enfants, Baranek et al. (1999) ont observés des vidéos, enregistrées par des parents, entre les 9^{ème} et 12^{ème} mois de vie de leurs enfants et ont annotés les comportements sensori-moteurs

et sociaux observés. Ils ont comparé les vidéos de trois groupes de participants : un groupe de 11 enfants avec Autisme, un groupe de 10 enfants avec des troubles du développement et le dernier groupe incluant 11 enfants avec un développement typique. Les résultats indiquent une aversion pour les toucher sociaux et l'exploration buccale d'objets plus marquée chez les enfants avec TSA que dans les deux autres groupes.

Des compléments d'informations sur les particularités de sensibilité tactile dans l'autisme seront indiqués dans le chapitre Interfaces Tactiles et Haptiques pour le Trouble du Spectre de l'Autisme

II.6 Conclusion

Les troubles sensoriels sont communs dans l'autisme mais non universels et aucun pattern de fréquence ou d'intensité ne semble émerger des différentes études. Ces troubles sont le plus souvent présents dans plusieurs modalités sensorielles, leurs fréquences et leurs intensités permettent de distinguer les individus TSA d'autres groupes cliniques. Ces troubles sont modulés par l'âge et le niveau cognitif des individus. Les capacités de coordination sensorimotrice sont impactées dans l'autisme, en particulier en ce qui concerne la motricité fine impliquant les mouvements des membres supérieurs. Au vu de l'importance du toucher dans les relations humaines et les activités de tous les jours, les troubles sensoriels tactiles et la coordination sensorimotrice manuelle sont susceptibles d'avoir une influence sur le développement de compétences sociales et d'interaction. Le développement de technologies tactiles et haptiques pourraient contribuer à améliorer la qualité de vie des personnes avec autisme. Nous abordons cette question dans le chapitre suivant.

III. Les interfaces tactiles/haptiques pour personnes avec Trouble du Spectre de l'Autisme

III.1 Introduction

III.1.1 Le sens du toucher dans le Trouble du Spectre de l'Autisme

Une des sources de variabilité interindividuelle importante dans le Trouble du Spectre d'Autisme (TSA) se manifeste au niveau du traitement sensoriel. Selon la dernière version des critères diagnostiques reconnus internationalement (American Psychiatric Association, 2013), les particularités sensorielles font partie intégrante du syndrome. Les symptômes comportementaux observés sont des réactions atypiques ou des intérêts inhabituels envers certaines stimulations sensorielles. Ben-Sasson et al. (Ben-Sasson et al., 2009) distinguent trois profils différents : les hyper-sensibles, les hypo-sensibles et ceux qui sont en recherche de sensations. Ils se manifestent sur différents registres sensoriels, tant visuel qu'auditif ou encore tactile (Marco et al., 2011). Dans le domaine tactile, les comportements d'hypo-sensibilités et de recherche de sensations seraient fortement corrélés aux symptômes sociaux, communicatifs et de comportements répétitifs associés aux critères diagnostiques (Foss-Feig, Heacock, & Cascio, 2012).

Sur le plan tactile, il n'y a pas actuellement de consensus quant à des altérations perceptives propres au TSA. Ce sens, bien qu'essentiel, est relativement peu étudié dans le TSA (Pernon, Pry, & Baghdadli, 2007). Puts, Wodka, Tommerdahl, Mostofsky et Edden (2014) rapportent des déficits dans le traitement de l'information tactile. En revanche, Cascio et al. (2008) et Blakemore et al. (2006) mettent en évidence une sensibilité accrue chez des adultes avec TSA. Les résultats de Tommerdahl, Tannan, Cascio, Baranek et Whistel (2007) suggèrent un traitement cérébral inhabituel des informations tactiles avec des performances supérieures aux personnes typiques dans la localisation des stimulations tactiles, mais aussi une moindre adaptabilité des capacités de perception tactile. Nakano, Kato et Kitazawa (2012) montrent que des participants avec TSA avaient de meilleures aptitudes que des personnes typiques dans une tâche où il fallait transférer de l'information haptique vers le visuel. Ainsi, bien que la perception tactile soit considérée comme atypique dans les TSA, l'hétérogénéité du spectre ne permet pas de conclure quant à des déficits ou des sur-compétences perceptives (Marco et al., 2011). Il n'y a donc pas, a priori, de raisons de restreindre l'accès des personnes avec TSA aux

interactions homme-machine impliquant le sens du toucher. Bien au contraire, les recherches récentes sur les circuits neuronaux liés au toucher montrent l'existence de voies spécialisées dans l'induction de sensations plaisantes (Morrison, Löken, & Olausson, 2010). La stimulation du sens du toucher, adaptée et maîtrisée grâce à des technologies appropriées, pourrait s'avérer propice au bien-être des personnes avec TSA.

Le sens du toucher nous permet d'interagir physiquement avec notre environnement, et ce avec n'importe quelle partie de notre corps. Dijkerman et de Haan (2007) font une distinction entre le sens haptique et le sens tactile, définissant : le sens haptique comme le sens qui permet de ressentir les actions extérieures (surtout les forces) appliquées sur notre corps, et contribuant à déterminer la position de nos membres dans l'espace auprès de notre système vestibulaire. Il existe effectivement des mécanorécepteurs ayant ce rôle. Ils sont présents dans les différentes articulations du corps, tels les organes tendineux de Golgi situés dans les jonctions myotendineuses (jonction muscle-tendon) et sont sensibles aux variations de la force contractile du muscle (Burke, Hagbarth, Löfstedt, & Wallin, 1976; Ferrell, Gandevia, & McCloskey, 1987; Goodwin, McCloskey, & Matthews, 1972) .

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 1, le sens tactile désigne la perception induite par le contact de notre peau avec des objets extérieurs. Il dépend de quatre types de mécanorécepteurs présents dans notre peau, nous permettant de distinguer la douleur, la chaleur, la pression ou les vibrations (Richard, Camps, & Eugène, 2013). Ces récepteurs sont reliés à différents types de terminaisons nerveuses, qui sont à adaptation rapide ou lente, et passent par la colonne vertébrale pour aboutir au cerveau, pour finalement innervier le cortex somato-sensoriel (Dijkerman & de Haan, 2007; Stillman, 2002).

Le sens du toucher, tactile ou haptique, permet, bien entendu, d'interagir avec l'environnement physique de l'individu, mais il joue également un rôle essentiel dans le domaine social. Le contact tactile, est pour l'être l'humain, un vecteur de relations sociales primordial (Bonanni, Vaucelle, Lieberman, & Zuckerman, 2006; Rochat & Senders, 1991). Dès la naissance, le bébé est touché, câliné, caressé, maintenu dans les bras, recevant ainsi ses premières relations avec autrui (de Ajuriaguerra, 1989). Tout au long de la vie, le contact tactile permet de générer des liens sociaux (Dunbar, 2010), transmettre des émotions, influencer les comportements d'autrui (Gallace & Spence, 2010), ou encore favoriser l'apprentissage (Streri & Féron, 2005). Il semble donc naturel que les sciences et technologies de l'information s'intéressent à ce sens pour développer des interfaces offrant à l'utilisateur des stimulations

tactiles et haptiques. Les interfaces homme-machine explorant le sens du toucher apparaissent comme un canal d'interaction potentiellement intéressant pour les personnes avec TSA. Le but de ce chapitre est d'établir une revue systématique de l'existant concernant les interfaces tactiles et haptiques dédiées au TSA. Ce chapitre met l'accent sur les approches de développement et les études utilisateurs effectuées

III.1.2 Interfaces Haptiques – Interfaces Tactiles

A travers le toucher, l'être humain peut récupérer de nombreuses informations sur son environnement (chaleur, texture, poids, etc.). Ainsi, les interfaces tactiles et haptiques peuvent servir dans différents domaines d'applications, tels que la chirurgie, l'assistance aux personnes avec handicap ou l'industrie agroalimentaire (M. H. Lee & Nicholls, 1999). Une des utilisations les plus populaires est celle remplaçant la sonnerie sur les téléphones portables. Sur le plan tactile, les interfaces font appel à des stimulations de pressions, de vibrations, de chaleur et de déformations sur des zones localisées sur la peau, par exemple sur la main, le bout des doigts ou la langue (pour plus d'informations voir Benali-Khoudja, Hafez, Alexandre, & Kheddar (2004). Dans le domaine haptique, les interfaces stimulent différentes parties du corps grâce à des dispositifs physiques dits « à retour de force », c'est-à-dire qui simulent une force de pression active ou de résistance lorsqu'on les manipule (Hayward & Maclean, 2007; K.E. MacLean & Hayward, 2008) ou requièrent un changement de position du corps de la part de l'utilisateur (pour une revue voir Varalakshmi, Thriveni, Venugopal, & Patnaik (2012)).

Dans la revue systématique de la littérature présentée ci-après, notre objectif est de décrire l'existant en matière d'interfaces tactiles et haptiques développées pour les individus avec Trouble du Spectre d'Autisme. Par interfaces nous désignons tout objet ou dispositif permettant des interactions entre différents acteurs humains ou agents artificiels (Hayward, Astley, Cruz-Hernandez, Grant, & Robles-De-La-Torre, 2004). Nous ne nous focaliserons pas sur un symptôme particulier, ni sur une technologie spécifique. Etant donné que les interfaces tactiles et haptiques pour les TSA constituent un domaine encore en émergence, nous avons opté pour une exploration assez large du domaine.

III.2 Méthodologie

III.2.1 Critères de l'étude

L'objectif de ce travail est d'établir une revue de l'existant en matière d'interfaces tactiles et haptiques conçues pour les individus avec Trouble du Spectre d'Autisme. Nous considérons donc tout dispositif faisant appel au sens du Toucher de l'utilisateur, et qui a été indiqué par les auteurs comme étant développé pour les personnes avec Trouble du Spectre d'Autisme.

Les études incluses dans cette revue de la littérature correspondent à des articles scientifiques publiés dans des revues ou des conférences internationales. Ces dernières ont également été consultées car, dans le domaine des sciences de l'ingénieur, il est courant de publier des articles dans les actes de conférences. Les technologies numériques pour les TSA ont connu une progression fulgurante à partir de la moitié des années 2000 (Grynszpan et al., 2014). Pour cette raison, nous avons choisi de commencer la revue à partir de 2005. Nous avons effectué des recherches sur des bases de données en appliquant des combinaisons des mots clés suivants : Tactile, Haptics Interface, Device, Autism, Autism Spectrum Disorder, Asperger. Chaque combinaison était composée d'un terme relatif au sens du Toucher (Tactile ou Haptique), d'un terme relatif aux interfaces (Interface ou Device) et d'un terme relatif au TSA (Autism, Autism Spectrum Disorder ou Asperger).

III.2.2 Base de données

Pour fournir une vision pluridisciplinaire, nous avons mené des recherches dans cinq bases de données scientifiques : IEEEExplorer, Science Direct, ACM Digital Library, Springer et Web of Science. La base IEEEExplorer est une base de référence dans le domaine des technologies de l'ingénierie électrique et électronique et la base ACM Digital Library est spécifiquement dévolue au domaine des machines computationnelles, incluant ingénierie mécatronique et design. Science Direct, Springer et Web of Science sont des bases de données multidisciplinaires qui nous ont permis d'étendre le champ des recherches.

Durant nos recherches dans différentes bases de données, certaines publications sont apparues à plusieurs reprises. Ces publications n'ont été comptabilisées qu'une seule fois. Au total, la recherche dans les bases de données a fourni 51 publications.

Dans un premier temps, nous avons parcouru les résumés d'articles et les conclusions pour vérifier qu'ils portaient bien sur la thématique des interfaces tactiles pour les personnes avec TSA. Les conclusions étaient également prises en compte, car il est fréquent en sciences de l'ingénieur de résumer un article dans une conclusion. Certains articles mentionnent l'autisme uniquement comme possible perspective d'application pour la technologie présentée. Ces articles ont donc été exclus de la revue. Tous les articles qui mentionnent le tactile, l'haptique ou les personnes avec TSA uniquement comme exemple d'application possible ou illustration, ou bien qui redirigent vers une autre publication sans plus de précisions, ont été exclus de notre échantillon. Quinze articles ont ainsi été rejetés, ce qui porte à 36, le nombre d'articles considérés dans cette revue. Sur ces 36 articles, plusieurs portaient sur un même dispositif, mais sur des phases différentes du développement ou de l'évaluation. D'autres décrivaient plusieurs dispositifs différents. Ainsi, à partir des 36 articles, nous avons recensé 35 dispositifs distincts.

III.2.3 Présentation des résultats

Les articles de notre panel sont résumés dans deux tableaux. Le premier présente les paramètres généraux de caractérisation des dispositifs. Le second est axé sur la conception de ces dispositifs et les méthodes d'évaluation utilisées pour les tester.

1. Caractérisation fonctionnelle des dispositifs (cf. Tableau 3)

Nous commencerons par décrire le premier tableau qui présente une caractérisation fonctionnelle des dispositifs. Afin de présenter nos résultats de manière synthétique et lisible nous avons identifié quatre paramètres clés qui permettent une synthèse générale des articles sélectionnés. Ces paramètres sont : le type de technologie développé, les modalités sensorielles stimulées, l'interface spécifiquement dédiée au sens du toucher (tactile / haptique), et l'utilisation faite du dispositif pour les personnes avec TSA.

a. Type de technologie

En ce qui concerne le premier paramètre, appelé « type de technologie », nous avons identifié les différents types de technologies suivants :

- Robot (humanoïde) : systèmes robotiques, certains étant de forme humanoïde.

- Les manettes : dispositifs permettant d'interagir avec un système informatique. Comme par exemple, des manettes de consoles vidéo type Wii® (Hölzl, Denker, Meier, & Wirsing, 2009) ou Playstation® (Changeon, Graeff, Anastassova, & Lozada, 2012), mais aussi des joysticks (Mustafa, Arshad, & Zaman, 2013) (voir Figure 8)
- Objets tangibles : objets physiques de la vie courante qui « réagissent » lorsqu'ils sont touchés, déplacés ou actionnés. Ce sont, par exemple, des objets réels dans lesquels des capteurs sont intégrés. Une autre méthode couramment employée consiste à envoyer un courant électrique de très faible intensité dans l'objet et mesurer ses variations qui permettent de détecter si l'objet a été touché
- Interfaces portées : interfaces qui sont positionnées directement sur le corps humain comme des bracelets, tee shirt, veste etc. Par exemple *Squeeze me* (Vaucelle, Bonanni, & Ishii, 2009) est une veste qui peut se gonfler grâce à un compresseur à air intégré.
- Jouets interactifs : jouets qui ont été instrumentalisés ou augmentés par des capteurs afin de les rendre interactifs. Il peut en exister pour les enfants (Dsouza, Barretto, & Raman, 2010) comme pour les adultes (Simm, Ferrario, Gradinar, & Whittle, 2014).
- Tablettes / smartphones : les articles concernés mettent en avant l'utilisation de la modalité tactile pour les tablettes. Les tablettes sont des interfaces très répandues qui connaissent plusieurs formes. Bien que les tablettes et smartphones aient beaucoup de points communs, nous avons choisi de les distinguer dans la présente revue.
- NUI (Natural User Interface) : ce type désigne des interfaces considérées comme naturelles pour l'utilisateur dans le sens où il n'est pas nécessaire de passer par une phase d'apprentissage pour s'en servir. L'utilisateur peut rapidement passer du stade de novice à expert. Par exemple, le Microsoft Kinect® est une technologie NUI (Ringland et al., 2014a).
- Environnements virtuels : il s'agit d'installations multi-sensorielles complexes composées de plusieurs éléments, comme par exemple des projecteurs tels que ceux classiquement utilisés en réalité virtuelle (Gumtau, Newland, Creed, & Kunath, 2005).

- Exergames : jeux vidéo dont le but est de prodiguer de l'exercice physique à l'utilisateur, comme par exemple la plateforme Wii Fit® pour le fitness.



Figure 8 Manette de jeu munie d'interfaces vibrotactiles sur les surfaces de préhension

Source : [Changeon et al., 2012]

b. Modalités sensorielles impliquées

Le second paramètre concerne les modalités sensorielles stimulées lors de l'utilisation des dispositifs présentés. Nous avons distingué le sens tactile de l'haptique. Les autres modalités utilisées sont le sens auditif et visuel.

c. Caractérisation de l'interface tactile/haptique

Le troisième paramètre décrit brièvement l'interface tactile/haptique et précise de quelle façon les modalités tactiles / haptiques sont stimulées par le dispositif. Par exemple, le dispositif peut avoir un écran tactile, des vibreurs, des capteurs de force ou de mouvement.

d. Utilisation de l'interface

Le quatrième paramètre, appelé « Utilisation de l'interface », permet d'explicitier comment le dispositif était utilisé lors des évaluations avec des utilisateurs. Par exemple, les participants devaient réaliser un puzzle sur tablette (Amar, Goléa, Wolff, Gattegno, & Adrien, 2012), ou créer de la musique en faisant des gestes avec une manette (Hölzl et al., 2009). Plusieurs études se sont intéressées spécifiquement à l'interaction entre les utilisateurs avec TSA et le dispositif développé sans objectif d'utilisation fonctionnelle dans la vie quotidienne. Ainsi, la colonne du tableau correspondant au paramètre « Utilisation de l'interface » contient

fréquemment la mention interaction libre, lorsque le participant était exposé au dispositif sans instructions ou contraintes particulières, ou encore la mention interaction scénarisée, lorsqu'un scénario d'utilisation avait été défini à l'avance.

2. Développement et évaluation des dispositifs (cf. Tableau 4)

Concernant le second tableau relatif au développement et à l'évaluation des dispositifs, nous avons identifié 3 paramètres : le type de développement, la méthode d'évaluation et la population évaluée.

a. Type de développement

Pour le type de développement du dispositif, nous avons réduit les possibilités à trois catégories : aucun développement (cela concerne notamment des produits issus du commerce) ; un développement sans implication des utilisateurs ; et finalement un développement centré utilisateur. Un développement centré utilisateur consiste à impliquer les futurs utilisateurs et leurs remarques dans les différentes étapes de développement. Leurs implications peuvent prendre différentes formes : observations des utilisateurs par les concepteurs pendant l'activité à laquelle est destiné le dispositif, entretiens avec les utilisateurs, production et présentation de scénarios d'utilisations, groupe de travail avec les utilisateurs (*focus group*), tests de prototypes avec les utilisateurs etc... (Endsley, 2016). Cette approche est définie par la norme ISO 9241 – 210, qui en décrit les cinq critères d'application et de mise en œuvre (Organisation Internationale de Normalisation, 2010) : la prise en compte en amont des tâches, des besoins et de l'environnement des utilisateurs, leur participation active, la répartition appropriée des fonctions entre les utilisateurs et la technologie, l'itération des solutions de conception, et l'intervention d'une équipe de conception pluridisciplinaire visant une expérience utilisateur optimale (Mayhew, 1999; Nogier, 2009). Une itération de développement consiste à développer un prototype, le soumettre à des tests utilisateurs et / ou des *focus group* pour améliorer l'interface en vue de répondre aux besoins formulés par les populations d'utilisateurs qui participent à la conception ou aux tests. Le développement itératif est une des bases du développement centré utilisateur.

b. La méthode d'évaluation

Le deuxième paramètre du tableau sur le développement et l'évaluation des dispositifs concerne la méthode d'évaluation utilisée. Ce paramètre précise comment le dispositif a été

testé, s'il l'a été, ainsi que l'analyse pratiquée sur les données récoltées. Plusieurs méthodes d'évaluation ont été distinguées : les études de cas, les études contrôlées et les tests utilisateurs. Les études de cas consistent en des analyses précises de l'utilisation du dispositif par un nombre restreint d'individus. Les études contrôlées se basent sur la comparaison entre un groupe de participants ayant utilisé le dispositif et un groupe de l'ayant pas utilisé. Les tests utilisateurs, sont définis comme une technique d'évaluation couramment utilisée en interaction Homme-machine qui consiste à tester la « faisabilité » ou l'utilisabilité de l'interface. Nous désignons par « faisabilité » une approche ou une démarche consistant à tester un prototype ou un modèle pour vérifier la réalisation de sa/ses fonction/s. L'utilisabilité est définie par la norme ISO 9241 (Organisation Internationale de Normalisation, 2010) comme « le degré selon lequel un produit peut être utilisé, par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié ». Ainsi, les tests utilisateurs ont pour but d'attester les fonctionnalités de l'interface dans un cas d'utilisation précis et ne nécessitent pas la réalisation d'inférence statistique sur les échantillons de participants. L'analyse quantitative signifie que des données chiffrées ont été obtenues. Les analyses qualitatives, quant à elles, se réfèrent à des données extraites de questionnaires, d'entretiens informels après l'expérimentation ou de l'observation de comportement pendant la passation.

c. La population évaluée

Pour finir, le dernier paramètre décrit les populations ayant participé à l'évaluation de l'interface.

III.3 Résultats

III.3.1 Caractérisation fonctionnelle des dispositifs

Une certaine variété est retrouvée dans les populations consultées pour le développement des dispositifs. Le tableau ci-dessous (Tableau 3) présente les caractéristiques fonctionnelles des dispositifs recensés dans notre échantillon d'articles. Parmi les types de technologies employées par les dispositifs, on peut noter une utilisation majoritaire des environnements virtuels et des tablettes, (6 dispositifs sur 35 pour chacun de ces deux types de technologie), suivis des robots (5 interfaces sur 35), puis des jouets interactifs et des interfaces portées (4 dispositifs sur 35 pour chacun de ces deux types de technologie). Les NUI et les

smartphones étaient les technologies les moins employées (1 dispositif pour chacun de ces deux types de technologie).

Les dispositifs retenus pour cette étude montrent une certaine diversité de technologies employées mais aussi de modalités sensorielles stimulées. Dans la grande majorité des cas (29 sur 35), le sens du toucher n'est pas stimulé de manière isolé, mais en synergie avec d'autres modalités sensorielles comme l'ouïe ou la vue. Lors des analyses sur les interfaces des dispositifs, les stimulations tactiles ont été distinguées des stimulations haptiques. Les contacts physiques, les vibrations, les effets de pression, et les variations de température étaient considérés comme relevant des interfaces tactiles, et les interfaces impliquant des gestes et des retours de force comme relevant des interfaces haptiques (voir introduction pour plus de détails). 30 dispositifs intègrent une interface tactile et 16 une interface haptique. On constate que ces interfaces utilisent des vibreurs (10 interfaces), des capteurs de force (9 interfaces), des écrans tactiles (8 interfaces) ou des caméras Microsoft Kinect® (5 interfaces) pour capter les mouvements. La dernière colonne du tableau illustre les diverses utilisations de ces dispositifs testées lors des évaluations.

Tableau 3 Caractéristiques fonctionnelles des dispositifs inclus

Auteurs	Type de technologie	Modalités sensorielles impliquées	Caractérisation de l'interface tactile/haptique	Utilisation de l'interface
(Amar et al., 2012)	Tablette	Tactile, Visuel	Ecran tactile	Réaliser un puzzle
(Amirabdollahian, Robins, Dautenhahn, & Ji, 2011; Robins, Amirabdollahian, Ji, & Dautenhahn, 2010; Robins, Dautenhahn, & Dickerson, 2012; Robins & Dautenhahn, 2014)	Robot humanoïde	Tactile, Haptique, Audio, Visuel	Revêtement composé de capteurs de force pour simuler la peau du robot	Interaction libre avec le robot
(Buzzi, Buzzi, Rapisarda, Senette, & Tesconi, 2013)	Tablette	Tactile, Visuel, Audio	Ecran tactile	Apprentissage sémantique par essais distincts
(Caro, Tentori, Martinez-Garcia, & Zavala-Ibarra, 2015)	Environnement virtuel, Exergame	Haptique, Visuel, Audio	Caméra Kinect pour la capture de mouvement	Coordination visuo-motrice

(Changeon et al., 2012)	Manette	Tactile	Manette de jeu munie de vibreurs	Transmission de messages sous formes de vibration
(Chien et al., 2015)	Tablette	Tactile, Visuel	Ecran tactile	Communication par pictogrammes
(Costa et al., 2009)	Robot	Tactile, Haptique, Audio	Capteurs tactiles sur le robot	Interaction structurée avec un robot
(de Urturi Breton, Hernández, Zorrilla, & Zapirain, 2012)	Smartphone	Tactile, Visuel, Audio	Ecran tactile	Utilisation d'applications sur smartphone
(Dsouza et al., 2010)	Jouets interactifs	Tactile, Haptique, Audio, Visuel	Vibreurs et capteurs de mouvement	Interaction libre avec les jouets
(Durango, Carrascosa, Gallud, & Penichet, 2017)	Objets tangibles	Tactile, Visuel, Audio	Fruits réels instrumentalisés avec des capteurs tactiles	Apprentissage sémantique
(Escobedo, Ibarra, Hernandez, Alvelais, & Tentori, 2014)	Objets tangibles	Tactile, Visuel, Audio	Objets instrumentalisés munis de vibreurs communicants avec un gant	Discrimination d'objets
(Gumtau et al., 2005)	Environnement virtuel	Tactile, Haptique, Audio, Visuel	Vibreurs et capteurs de force dans les murs, éléments muraux de textures différentes	Interaction libre avec l'environnement
(Hözl et al., 2009)	Manette	Tactile, Haptique, audio	Manettes de jeu (Wii) munies de vibreurs et d'un accéléromètre	Création musicale interactive
(Le et al., 2014)	Environnement virtuel	Haptique, audio, visuel	Styleret à retour de force	Interaction libre
(J. Lee & Obinata, 2015)	Indéterminé	Tactile, Visuel	Boule munie de capteurs de force	Non-spécifiée
(Mustafa et al., 2013)	Environnement virtuel	Tactile, Haptique, Visuel, Audio	Joystick muni de capteurs de force et vibreurs	Interaction libre
(Pérusseau-Lambert, 2016)	Manette	Tactile, Haptique	Styleret à retour de force	Reconnaissance de forme
(Ringland et al., 2014a, 2014b)	Natural User Interface	Haptique, Audio, Visuel	Caméra Kinect pour la capture de mouvement	Développement de la conscience du corps

(Salter, Davey, & Michaud, 2014 ; Salter, Werry, & Michaud, 2008)	Jouet interactif	Haptique, Tactile, Audio, Visuel	Ballon muni de moteur de propulsion, d'accéléromètre et de capteurs de pression	Interaction libre
(Sampath, Agarwal, & Indurkha, 2013)	Tablette tactile	Tactile, Audio, Visuel	Ecran tactile	Communication par pictogramme
	Environnement virtuel	Haptique, Audio, Visuel	Caméra Kinect pour la capture de mouvement	Coordination visuo- motrice
(Segond & Maris, 2008)	Interface portée	Tactile	Matrice de pico sur la langue	Suppléance viso-tactile
(Seo, Sungkajun, & Suh, 2015)	Objets tangibles	Tactile, Audio, Visuel	Plantes naturelles et artificielles instrumentalisées avec des capteurs tactiles	Interaction libre
(Shim et al., 2015)	Interface portée	Tactile, Audio, Visuel	Bracelet vibrant	Transmissions de signaux d'alarmes
(Simm et al., 2014)	Jouet interactif	Tactile, Visuel	Balle de relaxation avec des capteurs de pression et écran tactile	Gestion de l'anxiété
(Söchting et al., 2015)	Indéterminé	Tactile, Visuel	Capteur de pression et smartphone	Instruments de mesures médicales pour évaluer les compétences proprioceptives
	Tablette	Tactile, Visuel	Ecran tactile	
	Environnement virtuel	Haptique, visuel	Caméra Kinect pour la capture de mouvement	
(Taheri, Alemi, Meghdari, PourEtemad, & Basiri, 2014)	Robots humanoïdes	Tactile, Haptique, Audio, Visuel	Caméra Kinect pour la capture de mouvement et stylet à retour de force pour contrôler le robot	Jeux d'imitation et manipulation libre des robots
(Tang, McMahan, & Allen, 2014)	Interface portée	Tactile, Haptique	Manchette en lycra composé d'actionneurs vibrants	Gestion des hypersensibilités tactiles
(Toshniwal, Dey, Rajput, & Srivastava, 2015)	Tablette	Tactile, Haptique, Audio, Visuel	Ecran tactile, capteurs de position (accéléromètre, gyroscope et compas) et actionneur vibrant	Aide à l'apprentissage scolaire
(Vaucelle et al., 2009)	Interfaces portées	Tactile	Echarpe avec des vibreurs, veste avec des actionneurs pneumatiques, bracelet pneumatique et à dents en plastique, bracelet avec des pompes à chaleurs	Gestion de la réactivité sensorielle

(Westeyn et al., 2012)	Jouets interactifs	Tactile	Jouets instrumentalisés avec des capteurs tactiles et de mouvement	Evaluation clinique des enfants
(Yin & Tung, 2013)	Robots humanoïdes	Tactile, Visuel, Audio	Robots habillés de différents tissus	Interaction structurée avec des robots
(Zhao et al., 2013)	Robot humanoïde	Tactile, Visual, Audio	Capteurs tactiles sur les robots	Interaction structurée avec des robots

III.3.2 Développement et évaluations des dispositifs

Le tableau ci-dessous (Tableau 4) présente comment les interfaces ont été développées, comment elles ont été évaluées et avec quelle population d'étude. En ce qui concerne le type de développement des dispositifs considérés, nous relevons que la plupart des études (20 études) adoptaient une approche centrée utilisateur. Il faut noter que dans le cadre de ces études, les utilisateurs avec TSA n'étaient pas les seuls à être impliqués. Leurs familles et les professionnels de santé qui les accompagnaient pouvaient également être sollicités. On peut ainsi noter une certaine variété dans les populations consultées pour le développement des dispositifs. Par exemple, Sampath et al. (2013) ont dans un premier temps consulté uniquement les familles avant de prévoir des tests d'utilisabilité avec des enfants avec TSA. Dans certaines études, les chercheurs n'ont collaboré qu'avec des professionnels de santé (Durango et al., 2017; Pérusseau-Lambert, 2016; Söchting et al., 2015) ou des enseignants (J.-H. Lee, Choi, Song, & Shin, 2014). D'autres n'ont considéré que les utilisateurs finaux dans leurs études (Amar et al., 2012; Dsouza et al., 2010; Le et al., 2014). Plusieurs études mentionnent avoir consulté et travaillé avec la plupart des populations concernées par les Troubles du Spectre d'Autisme, à savoir les utilisateurs finaux, leurs familles, les professionnels de santé et d'accompagnement. Les études avaient pour but de répondre à différentes questions d'utilisabilité, comme par exemple la satisfaction des utilisateurs (Amar et al., 2012; Dsouza et al., 2010; Zhao et al., 2013) ou le nombre d'erreurs commises en utilisant l'interface (Buzzi et al., 2013; Durango et al., 2017; Escobedo et al., 2014; J.-H. Lee et al., 2014; Toshniwal et al., 2015).

Outre les développements centrés utilisateurs, d'autres types de méthodes de conception ont été employées. Par exemple, certaines études ont procédé en analysant les besoins des personnes avec TSA au travers de la littérature spécialisée sans avoir recours directement aux populations concernées (Segond & Maris, 2008; Vaucelle et al., 2009; Zhao et al., 2013).

La grande majorité des dispositifs a été évaluée avec des utilisateurs avec TSA. Néanmoins, 4 articles ne font pas mention de tests avec des utilisateurs. Une seule étude a suivi une méthode expérimentale permettant des inférences statistiques avec un groupe contrôle (Shim et al., 2015). Deux articles présentent des études de cas (Amar et al., 2012; de Urturi Breton et al., 2012). Le reste des études adopte une approche classique en développement d'interface humain-machine qui consiste à réaliser des tests utilisateurs. Suivant les protocoles implémentés, ces tests utilisateurs se fondaient sur des analyses qualitatives (22 études) et quantitatives (14 études).

Les populations d'utilisateurs qui participent aux évaluations sont assez diversifiées. Il est important de noter que plusieurs études s'appuient sur des utilisateurs ayant des diagnostics différents, où les TSA ne représentent qu'une fraction de l'échantillon (Amar et al., 2012; de Urturi Breton et al., 2012; Durango et al., 2017; Toshniwal et al., 2015; Zhao et al., 2013). L'âge des utilisateurs varie entre 3 et 26 ans selon les études (Tableau 2). En outre, certains tests ont lieu avec 300 participants (Salter et al., 2008) et d'autres avec uniquement 2 ou 3 participants (Costa et al., 2009; Dsouza et al., 2010; Zhao et al., 2013). En règle générale, les caractéristiques cliniques des échantillons d'utilisateurs sont peu détaillées dans les articles et, dans certains cas, l'effectif n'est même pas précisé (Amirabdollahian et al., 2011; J. Lee & Obinata, 2015; Robins et al., 2010, 2012; Robins & Dautenhahn, 2014). Il faut cependant garder à l'esprit que les tests utilisateurs n'ont pas pour objectif d'aboutir à des inférences statistiques sur une population plus large que l'échantillon décrit dans l'étude. Ainsi, il n'exige pas le même niveau de rigueur que les études expérimentales en neurosciences ou psychologie.

Tableau 4 Développement et évaluation des dispositifs dans les études incluses

Auteurs	Type de développement	Méthode d'évaluation	Participants pour l'évaluation
(Amar et al., 2012)	Aucun (utilisation d'une application grand public)	Etude de cas avec analyse quantitative du comportement	9 adultes avec déficience mentale sans TSA et 1 adulte avec TSA (19 – 26 ans)
(Amirabdollahian et al., 2011; Robins et al., 2010, 2012; Robins & Dautenhahn, 2014)	Développement sans implication des utilisateurs	Tests utilisateurs avec analyse quantitative	Non communiqué
(Buzzi et al., 2013)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur et sondage auprès des aidants (parents et	- Test utilisateur avec 7 enfants avec autisme de bas niveau (âge : 2, 5 – 10 ans). - Le sondage a reçu 47 réponses

		cliniciens) avec analyse qualitative et quantitative	
(Caro et al., 2015)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse qualitative et quantitative	8 enfants avec autisme de bas niveau accompagnés par 3 enseignantes
(Changeon et al., 2012)	Développement sans implication des utilisateurs	Tests utilisateur avec analyse qualitative	9 adultes typiques (22-25 ans) et 9 enfants avec autisme (10-16 ans)
(Chien et al., 2015)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse qualitative	11 enfants avec autisme modéré à sévère (5-16 ans) et 11 aidants (parents ou éducateurs spécialisés)
(Costa et al., 2009)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse qualitative et quantitative	2 adolescents présentant des retards mentaux et caractéristiques autistiques (17-19 ans)
(de Urturi Breton et al., 2012)	Aucun (utilisation d'une application grand public)	Etude de cas avec analyse qualitative	10 adultes avec syndrome de Down ou d'Autisme catégorisé entre modéré et moyen par l'OMS
(Dsouza et al., 2010)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse qualitative	14 enfants avec autisme (5-11 ans)
(Durango et al., 2017)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse qualitative et quantitative	10 enfants avec troubles du développement dont 2 avec autisme (3-6 ans)
(Escobedo et al., 2014)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateurs avec analyse qualitative et quantitative	18 enfants avec autisme de bas niveau (3-8 ans)
(Gumtau et al., 2005)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse qualitative	40 utilisateurs avec autisme
(Hölzl et al., 2009)	Développement sans implication des utilisateurs	Pas d'évaluation	
(Le et al., 2014)	Développement sans implication des utilisateurs	Tests utilisateur avec analyse qualitative et quantitative	7 enfants avec autisme (7ans ± 14mois)
(J. Lee & Obinata, 2015)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse qualitative	Enfants avec autisme sans précision sur leur nombre ni leurs caractéristiques
(Mustafa et al., 2013)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse qualitative	20 enfants avec autisme modéré (9 -14ans)
(Pérusseau-Lambert, 2016)	Développement centré utilisateur	Pas d'évaluation	
(Ringland et al., 2014a, 2014b)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse qualitative	- 15 enfants avec troubles neurodéveloppementaux recrutés dans une

			clinique spécialisée dans l'autisme (10 - 14ans) - 4 enfants avec autisme (4-12 ans)
(Salter et al., 2014, 2008)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse qualitative	300 adolescents typiques
(Sampath et al., 2013)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse qualitative et quantitative	- 4 enfants avec autisme (âge moyen : 8 ans, écart-type = 7 mois) - 4 enfants avec autisme (8 - 13ans)
(Segond & Maris, 2008)	Développement sans implication des utilisateurs	Pas d'évaluation	
(Seo et al., 2015)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse qualitative	7 enfants avec autisme (5 - 12ans)
(Shim et al., 2015)	Développement centré utilisateur	Etude contrôlée avec mesures quantitatives comparant participants avec autisme et participants typiques	10 adultes avec développement typique (20 – 47 ans) et 10 adultes avec autisme (22 – 52 ans)
(Simm et al., 2014)	Développement centré utilisateur	Etude de cas avec analyse quantitative du comportement	3 adultes avec autisme de haut niveau
(Söchting et al., 2015)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse quantitative	24 enfants avec développement typique (entre 7 et 8ans)
(Taheri et al., 2014)	Développement sans implication des utilisateurs	Tests utilisateur avec analyse qualitative	3 enfants avec syndrome d'Asperger et un enfant avec autisme de bas niveau (7-9 ans)
(Tang et al., 2014)	Développement sans implication des utilisateurs	Tests utilisateur avec analyse qualitative	4 adultes typiques
(Toshniwal et al., 2015)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse qualitative et quantitative	18 adolescents (12-18ans) avec des déficiences intellectuelles dont 10 avec autisme
(Vaucelle et al., 2009)	Développement sans implication des utilisateurs	Pas de test utilisateur	
(Westeyn et al., 2012)	Développement centré utilisateur	Tests utilisateur avec analyse quantitative	1 enfant (5 ans) avec développement typique et 10 adultes avec développement typique
(Yin & Tung, 2013)	Aucun (utilisation d'une application grand public)	Tests utilisateur avec analyse qualitative et quantitative	4 enfants avec autisme de haut niveau, 1 enfant avec syndrome d'Asperger (8-11 ans)

(Zhao et al., 2013)	Aucun (utilisation d'une application grand public)	Tests utilisateur avec analyse qualitative et quantitative	2 adolescents avec autisme et retard mental (14-16ans) et une adolescente avec troubles mentaux (13 ans)
---------------------	--	--	--

III.4 Discussion

III.4.1 Apports des interfaces tactiles/haptiques

Les chercheurs en Interfaces Homme-Machine font preuve de beaucoup d'inventivité, comme le montrent les études incluses dans la présente revue de littérature. Les dispositifs recensés intègrent une large variété d'interfaces tactiles et haptiques, offrant ainsi une grande diversité de stimulations et modes d'interaction. Sur le plan tactile, les stimulations produites par les interfaces sont le plus souvent des vibrations (Dsouza et al., 2010; Escobedo et al., 2014; Gumtau et al., 2005; Hölzl et al., 2009; Shim et al., 2015; Tang et al., 2014), bien qu'il existe également des interfaces pneumatiques ou thermiques (Vaucelle et al., 2009). Les dispositifs sont couramment munis de capteurs tactiles, en particulier lorsqu'ils comprennent des écrans tactiles (Amar et al., 2012; Buzzi et al., 2013; Chien et al., 2015; de Urturi Breton et al., 2012; Sampath et al., 2013; Söchting et al., 2015; Toshniwal et al., 2015). D'autres formes de détection du toucher sont aussi mises en œuvre, notamment dans les objets tangibles qu'il s'agisse de fruits (Durango et al., 2017) ou de jouets (Westeyn et al., 2012). Sur le plan haptique, on trouve plusieurs études fondées sur la reconnaissance de geste avec des caméras Kinect (Caro et al., 2015; Ringland et al., 2014a, 2014b; Sampath et al., 2013; Söchting et al., 2015; Taheri et al., 2014), mais aussi des capteurs de forces (Mustafa et al., 2013) ou levier à retour de force (Le et al., 2014).

Si certains dispositifs sont des prototypes conçus en intégrant des actionneurs ou des capteurs (J.-H. Lee et al., 2014; Robins et al., 2012; Salter et al., 2008; Tang et al., 2014), d'autres sont directement disponibles dans le commerce, comme c'est le cas des smartphones (de Urturi Breton et al., 2012; Sampath et al., 2013; Toshniwal et al., 2015) ou des tablettes (Amar et al., 2012; Buzzi et al., 2013; Chien et al., 2015). On trouve plusieurs études ayant intégré les dimensions tactile et haptique dans l'interaction avec des robots (Costa et al., 2009; Robins & Dautenhahn, 2014; Taheri et al., 2014; Yin & Tung, 2013; Zhao et al., 2013). Les objets tangibles sont également plébiscités dans la littérature (Durango et al., 2017; Escobedo et al., 2014; Seo et al., 2015). Par exemple, Seo et al. (2015) ont voulu augmenter différentes plantes et des morceaux de gazon avec des actionneurs et capteurs, afin d'observer si les effets

calmants et relaxants du contact avec les plantes pouvaient se reproduire avec leurs interfaces, mêlant végétations et technologie. Westeyn et al. (2012) ont instrumentalisé des jouets pour de très jeunes enfants dans le but d'examiner leurs pratiques du jeu libre ou en interaction avec un adulte. Ils espèrent ainsi collecter des données qui pourront servir au diagnostic précoce d'enfants à risque de TSA.

L'utilisation faite des dispositifs munis d'interfaces tactiles/haptiques est très variée. Certains ont un caractère ludo-éducatif. Par exemple, on trouve des exergames (Caro et al., 2015; Ringland et al., 2014b), des jeux d'imitations (Yin & Tung, 2013) ou de collaboration (Dsouza et al., 2010; Robins & Dautenhahn, 2014; Taheri et al., 2014), des outils d'apprentissage (Buzzi et al., 2013; Durango et al., 2017; Escobedo et al., 2014; Toshniwal et al., 2015) ou d'aide à la communication (Chien et al., 2015; Sampath et al., 2013). Les interfaces tactiles présentent l'avantage de pouvoir être intégrées dans des dispositifs portés, comme les tablettes ou smartphone (de Urturi Breton et al., 2012) ou même sous forme de vêtements (Vaucelle et al., 2009). Plus spécifiquement, les vibrations tactiles sont notamment utilisées pour transmettre des informations (Changeon et al., 2012; Shim et al., 2015), maintenir l'attention (Toshniwal et al., 2015) ou apprendre à gérer les hypersensibilités tactiles (Tang et al., 2014; Vaucelle et al., 2009). Une utilisation possible des capteurs tactiles ou haptiques concerne l'évaluation clinique dans la mesure où ils sont capables de quantifier les comportements de toucher des enfants (Söchting et al., 2015; Westeyn et al., 2012). La gestion du stress apparaît comme une application prometteuse pour ces interfaces, qu'il s'agisse de capteurs de pression (Simm et al., 2014) ou d'actionneur pneumatique (Vaucelle et al., 2009). Néanmoins, force est de constater qu'un nombre important de dispositifs recensés n'étaient pas développés pour une utilisation fonctionnelle précise, mais étaient essentiellement destinés à stimuler l'interaction par le toucher chez les utilisateurs avec TSA (Amirabdollahian et al., 2011; Costa et al., 2009; Dsouza et al., 2010; Gumtau et al., 2005; Le et al., 2014; Mustafa et al., 2013; Robins et al., 2010, 2012; Robins & Dautenhahn, 2014; Salter et al., 2014, 2008; Seo et al., 2015; Yin & Tung, 2013; Zhao et al., 2013).

Peu d'études emploient uniquement des stimulations tactiles ou haptiques. La plupart du temps, ces dernières sont associées à des informations visuelles ou auditives. Toutefois la multi-modalité peut paraître délicate à utiliser pour certains individus du Spectre de l'Autisme. (Marco et al. 2011) précisent que certaines personnes avec TSA sont susceptibles de mal réagir à trop de stimulations sensorielles simultanées. Les surcharges sensorielles, entraînant stress et

frustrations, peuvent aboutir à des crises d'anxiété, autrement appelés « meltdown » (Lipsky, 2011; Ryan, 2010). La nécessité de personnaliser l'interface à chaque profil sensoriel et cognitif est apparue dans plusieurs articles (Buzzi et al., 2013; Durango et al., 2017; Sampath et al., 2013).

La majorité des études incluses dans la revue s'appuyaient sur un développement centré utilisateur des dispositifs. Au cours des développements, les familles, les soignants, les accompagnants ou les utilisateurs finaux ont exprimé des besoins en matière de conception des dispositifs, comme par exemple la robustesse (Salter et al., 2008), la facilité de transport (Amar et al., 2012), la possibilité d'un usage sans supervision (Toshniwal et al., 2015), l'enregistrement des données (Escobedo et al., 2014; J.-H. Lee et al., 2014; Salter et al., 2008; Simm et al., 2014; Zhao et al., 2013), la possibilité de personnaliser le contenu et les fonctionnalités (Buzzi et al., 2013; Chien et al., 2015; de Urturi Breton et al., 2012; Dsouza et al., 2010; Pérusse-Lambert, 2016; Robins et al., 2010; Salter et al., 2008). Au-delà du développement centré utilisateur, deux études (Caro et al., 2015; Simm et al., 2014) ont adopté une approche, dite de « développement participatif », où les utilisateurs finaux ne se sont pas simplement consultés mais où ils se sont directement impliqués dans le processus de conception et de décisions sur les fonctionnalités des dispositifs.

III.4.2 Qualité des évaluations

La majorité des évaluations procédaient par tests utilisateurs. Du point de vue des sciences de l'ingénieur, les tests utilisateurs permettent de vérifier si les dispositifs présentés sont fonctionnels, c'est-à-dire qu'ils réalisent la(les) fonction(s) pour laquelle (lesquelles) ils ont été conçus. Par exemple, grâce à des tests utilisateurs, Söchting et al. (2015) ont pu montrer que les instruments de mesures qu'ils avaient construits produisaient des données stables et reproductibles. Toutefois, avec ces tests, il est difficile de quantifier la concordance entre les résultats présentés et les buts d'utilisation recherchés des dispositifs. D'une part, les résultats obtenus lors des tests utilisateurs sont souvent de nature qualitative avec une part importante d'informations subjectives (voir Tableau 4). Ce sont, par exemple, des retranscriptions de témoignages d'utilisateurs, d'aidants ou de parents (Gumtau et al., 2005; Salter et al., 2014; Seo et al., 2015). D'autre part, les passations ne suivent pas forcément un protocole expérimental formel (Ringland et al., 2014a, 2014b; Salter et al., 2008). Dans plusieurs études, les passations consistent à observer une interaction libre entre les utilisateurs et le dispositif (Tableau 3).

D'ailleurs, certains résultats sont mentionnés sans informations sur la méthodologie d'acquisition des données (Amirabdollahian et al., 2011; Gumtau et al., 2005).

La grande majorité des études mentionnées dans ces articles sont des études préliminaires ou des études pilotes (Chien et al., 2015; Falcão & Price, 2012; Gumtau et al., 2005; Le et al., 2014; Mustafa et al., 2013; Ringland et al., 2014b; Seo et al., 2015; Taheri et al., 2014; Zhao et al., 2013). Un certain nombre d'entre elles ne présentent pas de données d'utilisation (Hölzl et al., 2009; Pérusse-Lambert, 2016; Segond & Maris, 2008; Vaucelle et al., 2009). Quand on se limite aux études ayant testé les dispositifs avec des groupes d'utilisateurs, on en compte 14 sur 27 dont les effectifs sont inférieurs à 10 participants (Tableau 3). En outre, comme indiqué précédemment, ces groupes sont parfois composés de populations avec des diagnostics différents, dont certains sont en dehors du Spectre de l'Autisme. Plusieurs articles omettent des informations importantes permettant de qualifier les groupes d'utilisateurs, comme par exemple l'âge (J. Lee & Obinata, 2015; Ringland et al., 2014a; Salter et al., 2008; Seo et al., 2015; Shim et al., 2015; Simm et al., 2014) ou le genre (Amirabdollahian et al., 2011; Buzzi et al., 2013; Costa et al., 2009; Durango et al., 2017; Hölzl et al., 2009; J. Lee & Obinata, 2015; Mustafa et al., 2013; Robins & Dautenhahn, 2014; Torng, 2013; Westeyn et al., 2012). Certains articles déclarent se focaliser sur des sous-groupes du Spectre de l'Autisme, mais les définitions de ces sous-groupes restent ambiguës, comme par exemple « Autisme modéré » (Chien et al., 2015). Aucune étude n'a indiqué les scores obtenus par les participants sur des outils cliniques reconnus internationalement, tel que l'ADOS (Autism Diagnostic Observation Schedule) (C. Lord et al., 2000).

Peu d'interfaces présentent des hypothèses à valider lors des tests utilisateurs. Il s'agit le plus souvent d'une interaction libre avec le robot pour évaluer l'intérêt des participants pour l'interface (Costa et al., 2009; Gumtau et al., 2005; Le et al., 2014; J.-H. Lee et al., 2014; Ringland et al., 2014a; Salter et al., 2014; Seo et al., 2015), ou observer le taux de complétion des niveaux des jeux dispensés par les interfaces.

III.5 Conclusion

Cette revue montre qu'il existe peu d'études à l'heure actuelle ayant suivi une méthodologie de qualité permettant de répondre à une hypothèse sur les interfaces tactile ou haptique par inférences statistiques. On ne peut donc pas conclure quant à la validité de ces technologies pour les personnes avec TSA. En revanche, l'approche de conception et les tests

utilisateurs sont généralement mieux décrits dans les articles. On constate que très peu d'entre eux ont pris en compte les profils sensoriels particuliers des personnes avec TSA, ni dans la conception, ni dans les tests utilisateurs. Par ailleurs, il n'y a pas eu de tests d'utilisation sur une population suffisamment large et bien caractérisée pour pouvoir en déduire des résultats reproductibles. Nous avons identifié différents problèmes méthodologiques dans la conduite des tests utilisateurs, tels que le manque d'informations sur les populations participantes, les définitions des tâches, des protocoles expérimentaux, ou l'absence de groupe contrôle. Toutefois, cette revue permet de mettre en lumière de nouvelles formes d'utilisation de la technologie pour les TSA, avec des approches originales et prometteuses.

IV. Conception de l'interface d'Exploration Motrice pour l'Autisme (DEMA)

IV.1 Analyse des besoins des professionnels travaillant avec des personnes avec Troubles du Spectre de l'Autisme (Etude exploratoire préliminaire)

IV.1.1 Introduction

Nos travaux de recherche ont comme objectif de concevoir un système mécatronique ayant pour but de stimuler le sens tactile des utilisateurs avec une finalité ludo-éducative. Dans notre application de la démarche centrée utilisateur, une étude préliminaire consistant à aller à la rencontre de professionnels de santé et d'experts travaillant sur des technologies pour personnes avec TSA a été réalisée, constituant la première étape de notre démarche de conception.

La conception centrée utilisateur est une approche de conception qui place les utilisateurs, finaux réels ou potentiels, ainsi que leurs besoins, au centre de la démarche. Cette démarche est appliquée tout au long du processus de développement d'une application informatique, d'une technologie ou d'un produit. La norme ISO 9241 - 210 définit le processus de conception des systèmes interactifs centrés sur l'humain, et présente les cinq principes nécessaires à satisfaire cette norme :

- Une préoccupation amont des utilisateurs, de leurs tâches et de leur environnement
- La participation active de ces utilisateurs, ainsi que la compréhension claire de leurs besoins et de leurs exigences liées à leurs tâches
- Une répartition appropriée des fonctions entre les utilisateurs et la technologie
- L'itération des solutions de conception
- L'intervention d'une équipe de conception multidisciplinaire

La mise en place de la démarche centrée utilisateur comme guide de conception permet d'augmenter les chances d'adoption des produits ou des services développés par les utilisateurs finaux. Par conséquent, nous avons décidé, dans le cadre de notre recherche, d'adopter une telle démarche.

Nous présentons ici la première phase de notre démarche qui vise à comprendre la population cible, c'est-à-dire les professionnels de santé travaillant avec des personnes ayant

un Trouble du Spectre de l'Autisme de plutôt bas niveau de fonctionnement avec des troubles moteurs et/ou sensoriels, ainsi que leur buts, tâches et environnements. L'objectif de cette étape étant de spécifier les besoins de ces professionnels en matière d'outils pour réaliser leur pratique, ainsi que d'analyser leurs environnements de travail afin d'observer l'applicabilité de ces outils. Cette démarche s'est centrée autour de l'observation des passations de bilans psychomoteurs, de différents échanges avec une experte paramédicale et des chercheurs en nouvelles technologies.

IV.1.2 Méthode

IV.1.2.1 Participants

Cinq participants, trois hommes et deux femmes, âgés de 38 à 50 ans, (moyenne 43, 6 ans), ont pris part à cette étude. Trois travaillent dans la recherche technologique (informatique, robotique, technologies sensorielles), une dans l'ergonomie et la psychologie, et la dernière dans la prise en charge psychomotrice de patients avec TSA. Ces personnes ont, en moyenne 18 ans (minimum 16 ans, maximum 24 ans) d'expérience professionnelle dans leurs domaines respectifs vis-à-vis des thématiques liées à l'Autisme.

Deux des cinq professionnels ont l'habitude de travailler avec des enfants avec Troubles de Spectre de l'Autisme et retard intellectuel associé.

IV.1.2.2 Procédure

Douze réunions, un entretien avec la psychomotricienne et une séance d'observation d'un bilan sensori-moteur ont été effectués. Onze de ces événements ont eu lieu entre Octobre 2015 et Décembre 2016, soit durant le premier tiers du projet de recherche, les autres ont eu lieu entre Janvier 2017 et Septembre 2017.

Lors des réunions, les sujets du choix des technologies, de la conception mécatroniques et de la conception du prototype ont été évoqués. L'observation a porté sur les particularités sensori-motrices des personnes avec TSA ainsi que les outils utilisés par les professionnels de santé lors des bilans sensori-moteurs. Lors de l'entretien nous avons pu échanger avec une psychomotricienne, afin de recueillir des informations nous permettant de mieux comprendre les activités des professionnels de santé, et les particularités des patients avec TSA.

Des notes succinctes ont été prises lors des entretiens et une position d'observatrice passive a été prise lors du bilan sensori-moteur.

IV.1.2.3 Analyse des données

Nous avons analysé les thèmes évoqués dans les comptes rendus et, les notes prises durant les réunions. De la même manière, nous avons analysé nos notes d'échanges informels et l'observation du bilan sensori-moteur. Nous avons extrait les trois thèmes suivants :

- Spécificités du travail des professionnels : comment travaillent les professionnels de santé observés avec des patients avec TSA.
- Spécificités sensori-motrices des patients avec TSA, comme des particularités motrices (exemple : problèmes de préhension des objets) ou des particularités sensoriel (exemple : refus de contact sur les avant-bras) ;
- Spécificités des tâches et scénarii : caractéristiques souhaitées des tâches à réaliser et de scénarii d'application ;
- Spécificités du design de notre future interface, par exemple sa forme, son aspect ou la manière de l'utiliser.

IV.1.3 Résultats

IV.1.3.1 Spécificité du travail des professionnels

L'observation d'un bilan sensori-moteur nous a permis de constater les spécificités mentionnées ci-après.

Les bilans sensori-moteurs reposent sur des mises en situations globales ou spécifiques ou la présentation de différents types de stimulation afin d'explorer plusieurs domaines tels que l'organisation des systèmes sensori-moteurs, la régulation tonico-émotionnelle, l'organisation posturale, la motricité globale, la représentation de l'organisme, la coordination visuo-manuelle, la structuration spatiale et la graphomotricité. Ce type d'intervention dure en moyenne une heure trente. Dans le cas de l'observation d'un enfant avec TSA, un entretien avec les parents, pour approfondir la connaissance des habitudes de vie et les expériences sensori-motrices du quotidien de l'enfant, est effectué à la suite du bilan

IV.1.3.2 Spécificités sensori-motrices des patients avec TSA

Les spécificités sensori-motrices explicitées ci-après proviennent de notre entretien avec la psychomotricienne et de l'observation du bilan sensori-moteur.

- Les personnes avec TSA peuvent se sentir submergées par des stimulations multimodales. Il nous est suggéré, par la psychomotricienne, d'appliquer une seule stimulation sensorielle à la fois dans un premier temps d'utilisation. Les stimulations vibratoires et vibro acoustiques sont très appréciées des patients avec TSA. Elles sont souvent utilisées avec des effets positifs par les professionnels de santé pour calmer, détendre les patients avec TSA et/ou pour canaliser leur attention entre deux activités.
- Il faut une mise en place progressive des stimuli, des déplacements et consignes tout en maintenant l'intérêt de l'utilisateur. C'est à dire qu'il faut une modulation de l'intensité des différents stimuli afin de pouvoir s'adapter à chaque utilisateur. De même, une modulation dans les déplacements réalisés par le patient est nécessaire ; les exercices doivent faire travailler tout le corps de l'utilisateur, les mains, les bras, les épaules. Plus particulièrement, la psychomotricienne s'est montrée intéressée par des gestes du haut du corps tels que les bras, les avant-bras et les mains, car ils sont très utilisés dans la vie de tous les jours : attraper des objets, écrire-dessiner, tenir un objet etc. Ce sont souvent des axes de travail qu'elle doit renforcer chez ses patients avec TSA.
- La présence de particularités sensorielles notamment tactiles, peut créer un rejet d'une interface portée sur le ventre ou les avant-bras par exemple. En effet, comme nous l'avons relevé lors de l'observation du bilan sensori-moteur et comme nous la confirmé la psychomotricienne lors de l'entretien, les personnes avec TSA peuvent fréquemment présenter des seuils de sensibilités tactiles particuliers notamment au niveau de la tête, du ventre, des mains et avant-bras ainsi que la plante des pieds, en d'autres termes, dans les parties les plus riches en termes de récepteurs sensorielles tactiles (cf. chapitre2). Par conséquent ils ont tendance à refuser tous contacts extérieurs, y compris certains vêtements dans ces zones.
- La psychomotricienne nous indique que la période de développement et d'exploration sensori-motrice précède celle du langage. Cela suggère que si la base de développement sensori-motrice n'est pas acquise, il sera encore plus compliqué d'acquérir la base du langage et de la communication sociale.

- Il est ressorti que ces patients peuvent présenter des troubles de l'attention, ainsi que des temps de latence entre l'instruction d'une consigne et leurs réactions. Il faut le prendre en compte dans la création des tâches, règles et méthodes d'évaluations employées.

IV.1.3.3 Spécificités pour les tâches et scénarii d'utilisations

A travers notre entretien avec la psychomotricienne, nous avons pu identifier les spécificités de tâches et de scénarii d'utilisations suivantes.

- Il est nécessaire que l'utilisateur puisse être pleinement acteur dans cette interface, c'est-à-dire qu'il faut maintenir et entretenir leurs intérêts via différentes stimulations et également qu'ils soient actifs lors de l'utilisation de l'interface. Ils ne doivent pas être passivement entraînés par les actionneurs motorisés mais être à l'origine d'un mouvement, d'une action, etc...
- Dans le cas d'une tâche graphique, telle que suivre des formes géométriques simples avec des mouvements manuels, la psychomotricienne nous a indiqué que commencer par faire des carrés serait un peu complexe pour des autistes de bas niveau¹, et qu'il faut commencer par des points, des traits puis des formes géométriques moins complexes.

IV.1.3.4 Spécificités pour la conception du prototype

Les spécificités de conception du prototype mentionnées ci-après proviennent de l'entretien avec la psychomotricienne et des réunions.

- La ou les technologies choisies doivent être résistantes et robustes, ceci est notamment dû à la présence de troubles du comportement (par exemple : auto et hétéro-agressivité) chez certaines personnes avec TSA. La construction d'un cache de protection pour recouvrir et protéger le prototype a été proposée. Notre concept d'interface posée sur une table a retenue l'attention de la psychomotricienne interviewée, notamment le fait qu'elle soit potentiellement volumineuse et difficilement projetable contre un mur en cas de crise d'un patient.
- Sachant que des patients peuvent avoir des sensibilités tactiles exacerbées au niveau des avant-bras, il paraît nécessaire, d'ajouter un degré de liberté supplémentaire qui se

¹ Autisme classique : cet autisme est indiqué quand l'enfant présente en plus des symptômes de bases (troubles de la communication et troubles sensori-moteurs) des limitations intellectuelles.

caractérise par une variation de hauteur possible dans le cas d'interface posée sur une table pour éviter que les avant-bras du participant ne touchent la table de support de l'interface.

- Concernant la manipulation de l'interface, la psychomotricienne a mis en avant l'intérêt de travailler différents types de prise en main pour les patients avec TSA. Les tablettes tactiles ou les smartphones utilisent le doigt, et tous les patients n'arrivent pas à composer avec ce type de contact ou à canaliser leur mouvement. Si un système de type joystick est adopté, il faut prévoir une possibilité pour adapter les prises en main, au travers d'une certaine variété de formes du pommeau, en raison de certaines difficultés praxiques présentes chez les personnes avec TSA.

IV.1.4 Conclusion de l'analyse des besoins

Ce travail exploratoire nous a permis d'observer que les gestes du quotidien effectué avec les bras et les avant-bras peuvent souvent poser problèmes aux personnes avec TSA, et qu'il est fréquent que des professionnels de santé tels que les psychomotriciens aient à travailler la coordination, la préhension, le déplacement dans l'espace, la gestion de l'espace, l'écriture et également la perception haptiques chez des patients avec TSA. Plus particulièrement, la psychomotricienne que nous avons rencontrée évoque des problèmes d'écriture, de canalisation des gestes du 3D vers un plan.

À la suite à nos différents échanges (cf. section Résultats), nous souhaitons développer notre propre interface, stimulant le haut du corps, pour réaliser des tâches sensori-motrices telles que tracer des formes géométriques simples ou explorer un plan. En effet la littérature indique que peu d'interfaces adressent ces problématiques de manière approfondies pour l'Autisme (Pérusseau-Lambert, Anastassova, Boukallel, Chetouani, & Grynszpan, 2018)

La complexité de ce projet de conception réside d'une part dans la diversité des profils de patients avec TSA, cela nécessite une grande adaptabilité de notre interface en termes de stimulation, déplacement possibles et consigne ; d'autre part dans son acceptation par des professionnels de santé. En effet, l'utilisation des nouvelles technologies dans la prise en charge des personnes avec TSA n'est pas forcément commune, ni évidente. Relativement au sens du toucher, nous avons choisi d'explorer deux pistes séparément : une piste kinesthésique avec l'interface D'Exploration Motrice pour l'Autisme (DEMA), et une piste vibrotactile, dans un contexte social. Notre première piste, l'interface DEMO découle de nos échanges avec les professionnels de santé et les experts technologiques. Sa particularité première est de nécessiter

un actionnement manuel, donc le sens kinesthésique. Notre deuxième piste, quant à elle, vise à observer si les mécanismes cognitifs nécessaires à la communication sociale sont présents lors de stimulations purement tactiles entre deux individus (voir Chapitre VII).

IV.2 Conception et Développement Mécatronique

Suites à nos échanges avec les professionnels de santé et les experts technologiques nous avons pu formaliser des spécifications techniques ayant guidé la conception de l'interface DEMA, présentée ci-après. L'objectif premier de ce développement mécatronique est de tester une méthode de conception centrée utilisateur dans le cas d'application à une population cible aux besoins d'utilisabilité particuliers. Le choix s'est porté vers l'intégration de technologies existantes ou dont le développement et l'intégration ne seraient pas trop coûteux en temps. En effet, en réduisant le temps d'intégration et de développement des technologies, nous avons pu nous concentrer sur la réalisation des tests et des utilisateurs, nécessaires à une démarche centrée sur l'utilisateur.

Dans cette partie, nous détaillerons notre la suite de notre démarche de conception qui passe par :² 2) la formalisation du cahier des charges, 3) le choix des solutions techniques à adopter, 4) la réalisation de notre prototype jusqu'à un stade de développement stabilisé. Son évaluation auprès de professionnels de santé, travaillant avec des populations avec TSA, ainsi que les scénarii d'application seront détaillés dans les deux prochains chapitres.

IV.2.1 Concept

L'interface DEMA est dimensionnée pour stimuler les membres supérieurs, et permettre d'explorer un espace suffisamment grand pour impliquer le haut du corps, toute l'amplitude du bras et en partie celle de l'épaule. Plusieurs tâches et scénarii d'applications ont été envisagés notamment l'exploration libre de l'espace de travail, du suivi de trajectoire en utilisant un affichage visuel, ou potentiellement des activités de tour de rôle. Le design de cette interface avait pour but d'offrir un espace de transition entre l'analyse du mouvement en trois dimensions, avec des mouvements libres, à un format type feuille de papier A4, avec une prise en main fine.

² Pour rappel, la première étape de notre démarche est l'analyse des besoins des professionnels présentée dans la section précédente de ce chapitre.

Notre approche de développement s'articule autour d'une interface mécanique dotée d'un mécanisme de translation présentant peu de friction, résistant mécaniquement à plusieurs cycles d'utilisation, avec une prise en main interchangeable imprimé en 3D, qui permet d'explorer manuellement un espace plan horizontal. Le fait de pouvoir changer le type de prise en main présente un atout certain pour les personnes avec TSA. En effet, un certain nombre d'eux présentent des difficultés de préhension manuelle (voir Chapitre II).

Ce concept peut être augmenté, par exemple en rajoutant un écran pour réaliser un affichage ou en incluant un support sur lequel reposerait notre l'interface DEMA afin qu'elle soit inclinable.

IV.2.2 Cahier des charges

L'acceptation de notre interface par l'utilisateur va dépendre de plusieurs critères, et notamment de sa facilité d'utilisation, de son confort et de sa fiabilité. De plus, au vu de la population complexe à laquelle elle est destinée, des critères de robustesse et de sécurité d'utilisation paraissent fondamentaux (cf. section IV.1.3). L'interface DEMA à destination des personnes avec TSA doit suivre les critères de conception suivant :

1. Afin de pouvoir faire travailler les membres supérieurs, notre interface doit présenter un espace de travail permettant d'utiliser au maximum les capacités de déplacements des bras ; ainsi un espace au format A3 soit environ 30cm par 40 cm semble adapté. En effet, un bras complet (bras et avant-bras) d'un adulte est d'une longueur moyenne de 48,8 cm (femmes : 48cm, hommes : 49,6 cm) (de Leva, 1996). Il faut parcourir environ 50cm pour parcourir la diagonale de l'espace de travail, soit toute la longueur d'un bras adulte.
2. L'interface DEMA doit permettre l'exploration dans un espace à 2 dimensions. En effet nous souhaitons réaliser l'exploration d'un plan horizontal en canalisant les gestes des participants via cette interface.
3. Les personnes avec TSA peuvent présenter des difficultés de préhension ainsi une prise en main interchangeable ajustable à chaque utilisateur de l'interface paraît recommandée.
4. Une interaction fluide nécessite l'utilisation de systèmes mécaniques de translation présentant peu de friction. L'interface DEMA a, en effet, pour but de mobiliser les capacités de couplage sensori-moteur des utilisateurs avec TSA,

ainsi il faut que notre mécanisme soit le plus transparent possible. Dans une première évaluation nous associons la transparence d'un mécanisme avec des coefficients de frictions minimales et une réversibilité du système.

5. L'interface doit être stable. Elle doit être suffisamment lourde ou être fixée pour ne pas pouvoir être projetée dans le cas de situation de crise des patients avec TSA.

L'ajout d'éléments types moteurs ou freins, n'a pas été retenu pour compléter notre concept. En effet, pour les personnes avec TSA, réaliser un retour de force « virtuel », dans le sens où ils ne proviendraient pas d'un contact ostensible avec un objet physique mais d'actionneurs type freins ou moteurs, peut être déroutant.

De plus les actionneurs motorisés peuvent présenter des risques d'entraînements qui pourraient être d'autant plus dangereux que certaines personnes avec TSA pourraient avoir des réactions inattendues face à une sensation d'inconfort ou une situation nouvelle.

D'autre part, les professionnels de santé interrogés ont mentionnés le besoin que les patients avec TSA soient acteurs de l'interaction, qu'ils puissent décider des actions à réaliser et qu'ils puissent contrôler l'interface. Les actionneurs types freins ou moteurs ne nous semblent donc pas appropriés pour réaliser notre concept d'interface DEMA

Toutefois, si l'on veut réaliser des tâches de retour de force, il est possible de le faire à l'aide d'objets physiques, ayant une masse propre, que l'on doit pousser ou déplacer dans l'espace de travail. Cette méthode a l'avantage de permettre aux utilisateurs avec TSA d'associer un objet ostensible et la force nécessaire pour le déplacer. Ainsi, le retour de force n'est pas de nature à surprendre l'utilisateur avec TSA.

Un autre des points d'exigence de notre cahier des charges était également de concevoir une interface à un niveau de développement stable mais n'ayant pas encore trop d'intégration technologique. En effet, l'interface devrait pouvoir être présentée aux participants de l'étude centrée utilisateur, sans trop orienter leurs propositions d'amélioration.

IV.2.3 Benchmark technologique

Afin de respecter les critères de mouvement transparent et d'espace de travail pour solliciter une utilisation du membre supérieur, voire du buste, nous avons choisi de partir sur une interface avec un mécanisme de translation proche de celui d'une imprimante à fabrication additive : soit trois axes joints par des liaisons glissières. En effet, après avoir étudié plusieurs

solutions de l'état de l'art (tels que le pantographe, le Falcon ou le Phantom), cette architecture planaire matérialisée par un assemblage d'axes et de glissières semble être la plus appropriée. Nous avons dimensionné notre système à partir de la force estimée maximale de 110N (Eastman Kodak Company, 2004) que devrait appliquer un adulte, assis, sur une poignée pour pousser ou tirer un objet sur un plan horizontal. De plus, les axes de translation sélectionnés sont en inox ont une section de 8mm de rayon ; ainsi en considérant une version simplifiée du système à une poutre simple, nous estimons la contrainte maximum admissible à :

$$\sigma_{max} \leq R_{pe} ; \quad R_{pe} = \frac{R_e}{s} ; \quad \sigma = \frac{F}{S}$$

Avec

σ_{max} la contrainte maximum admissible de notre système d'axe simple(MPa)

R_{pe} la résistance pratique à l'extension (MPa)

R_e la limite élastique (MPa)

s le coefficient de sécurité

S l'aire de la section droite de notre poutre (mm^2)

F la force appliquée (N)

Application numérique :

$$\sigma_{max} = \frac{110}{201.61} = 0.547 \text{ MPa} \text{ et } R_{pe} = \frac{700}{1.5} = 466 \text{ MPa}$$

Les glissières par éléments roulants consistent à réaliser une liaison glissière entre deux éléments à l'aide d'éléments roulants de contacts. Généralement, ces éléments roulants sont des billes ou des rouleaux. Ils permettent ainsi une zone de contact réduite donc des pertes par frottements moindres que des glissières par éléments d'antifriction ou de contact direct. Le principe des glissières par éléments roulants est d'exploiter la faible énergie dissipée par un contact roulant par rapport à un contact glissant. En raison de leurs coûts raisonnables, de leurs performances (coefficient de friction entre 0,001 et 0,003) et des larges gammes de vitesses (de 5 000 à 45 000 Trs/min) qu'elles peuvent supporter, ces liaisons glissières sont actuellement les plus répandues dans l'industrie. Nous avons choisi un assemblage hyperstatique au sein de notre système de liaison glissière pour assurer une meilleure rigidité du système (voir Figure 9). Ainsi nous avons sélectionné des douilles à billes, qui sont des assemblages de deux liaisons pivot glissant, pour réaliser le système de guidage sur rail.

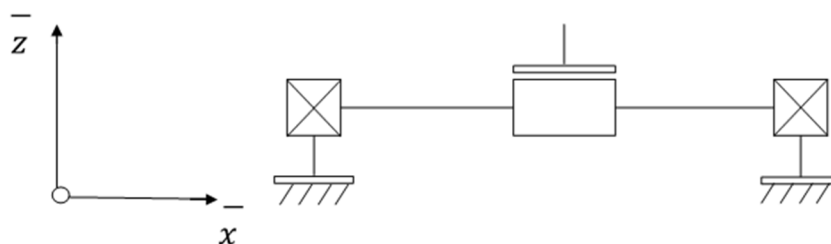


Figure 9 Représentation cinématique de l'interface DEMA, vue de face

Nous avons pris le parti de développer le système mécanique de l'interface DEMA en assemblant des éléments issus du commerce (notamment les guidages linaires, les poulies et courroies de transmission). Ce choix permet de garantir ainsi plus de flexibilité dans la conception et l'ajustement de notre interface DEMA, ainsi que dans les tests que nous voudrions mettre en place par la suite.

Afin de choisir la technologie de guidage linéaire la plus adaptée à notre cahier des charges nous avons utilisé des fiches techniques de constructeurs et nous avons comparé différentes technologies selon leurs caractéristiques, voir Figure 10.

42

MICHAUD CHAILLY
GUIDAGE ET ENTRAÎNEMENT LINÉAIRES

Guide de choix des guidages

Comparatif des différentes technologies

Type de guidage	Capacité de charge	Précision	Rigidité	Frottement	Vitesse	Prix
	- +	- +	- +	- +	- +	- +
Guidage sur arbre B6-W avec douille à billes B81-DBKB*						
Guidage sur rail à galets B2-GGLFE						
Guidage à galets combinés B2-GCF						
Guidage à galets modulaire						
Guidage sur rail à 4 rangées de billes B23-GB4E						
Guidage sur rail à rouleaux B22-GRXE						

Pour une aide à la sélection, se reporter aux « Relevés d'informations techniques » pages 716 à 722.
*Pour compléter le choix dans la technologie « Guidage sur arbre », se reporter au « Guide de choix des douilles à billes » page 43.

Figure 10 Extrait du catalogue de guidages linéaire de Michaud Chailly.

Nous souhaitons un guidage avec le moins de frottement possible. D'après la Figure 10, les guidages sur arbres avec douilles à billes, les guidages sur rail à galets, les guidages à galets modulaires et les guidages sur rails à 4 rangées de billes correspondent à ce critère. Le mécanisme n'a pas besoin de supporter de charges importantes (moins de 750 Newton, soit moins que l'équivalent du poids moyen d'un adulte debout sur le mécanisme). Les guidages sur arbre avec douille à billes et les guidages sur rails à galets répondent à ces critères.

Deux systèmes de guidages pourraient correspondre, nous avons comparé leurs caractéristiques techniques (voir Tableau 5) pour identifier notre solution. Nous observons que les guidages sur arbre avec douille à bille sont caractérisés par de faible frottement, tout en effectuant un guidage de précision pour des charges allant de faible à moyenne. Ils correspondent donc parfaitement à nos critères.

Tableau 5 Caractéristiques techniques des guidages linéaires présélectionnés.

Type	Caractéristiques
Guidage sur arbre avec douille à bille	Guidage de précision pour des charges faibles et moyennes Faible frottement Grande rigidité Haute précision
Guidage sur rails à galets	Guidage à 4 galets pour charges légères et moyennes Adapté aux environnements pollués (sciure, poussières ...) Vitesses élevées.

A l'issue de notre benchmark technologique nous avons choisi d'utiliser des paliers complets avec des douilles à billes glissant sur des arbres de précisions en inox. Ces mécanismes sont assemblés dans une configuration en H avec un mécanisme en double rail pour une meilleure tenue mécanique.

Afin de valider les calculs de dimensionnement et les concepts proposés en vue de la réalisation de DEMA, nous avons établi un modèle numérique de notre interface via le logiciel SolidWorks. (cf. Figure 11, Figure 12, Figure 13).

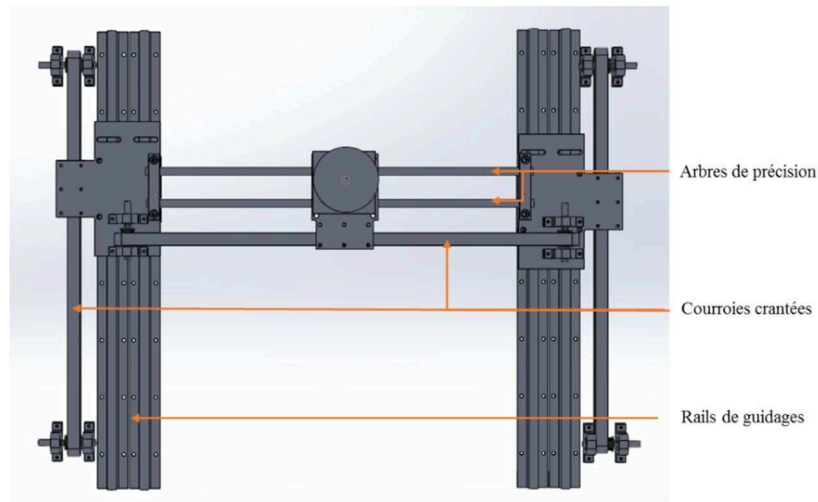


Figure 11 DEMA vue de dessus

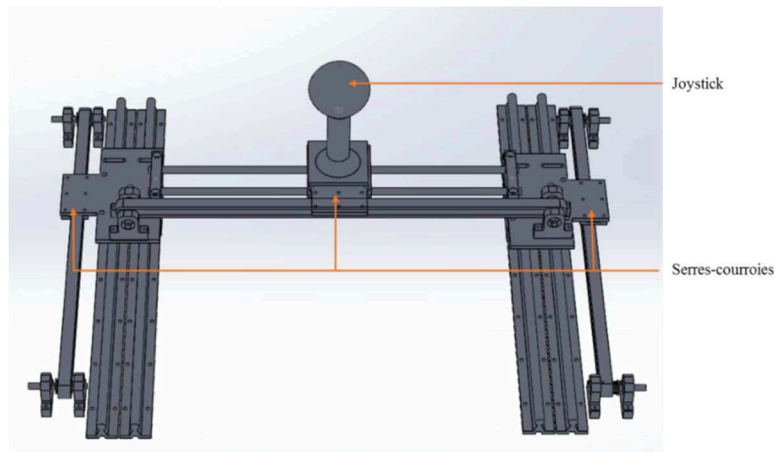


Figure 12 DEMA vu de $\frac{3}{4}$ face

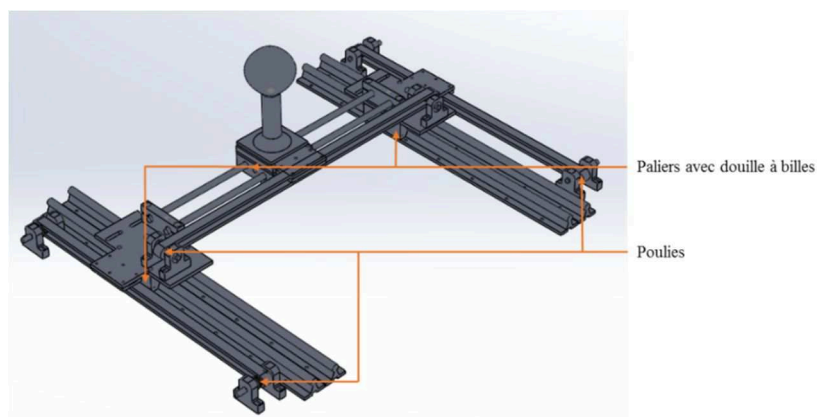


Figure 13 DEMA vue de $\frac{3}{4}$ gauche

Prototypage (usinage, impression 3D)

Les différentes pièces telles que les axes, les paliers, les poulies et les courroies, ont été commandées. Les mange-courroies et les joysticks ont été imprimés en 3D par dépôts de fils.

Enfin les plateformes, le socle d'insertion des joysticks et les supports de codeurs optiques ont été usinés pour assembler notre prototype.

Pour le support de l'interface DEMA, nous avons choisi d'utiliser du contre-plaqué simple, épais de 5 mm et nous l'avons renforcé avec 5 barres de profilé en aluminium. Ainsi nous avons pu réaliser les trous de perçages pour fixer nos rails de guidages. En conséquence notre support est à la fois léger, stable et résistant (voir Figure 14)

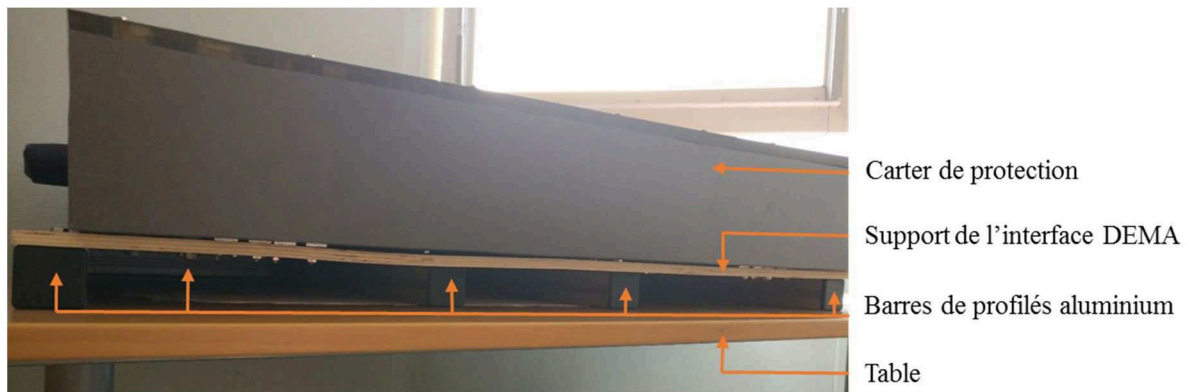


Figure 14 Interface DEMA et son carter de protection, vu de profil

Enfin, nous avons également ajouté un cache de protection qui recouvre l'ensemble de l'interface. Nous avons utilisé un contreplaqué communément employé pour réaliser des cloisons.

IV.3 Instrumentation

Pour capturer le mouvement en 2D de la plateforme DEMA, nous avons équipé cette dernière de capteur de position (codeurs optiques) Broadcom dotés d'une résolution de 500 p/m et qui supportent jusqu'à 30 000 tours/min.

IV.3.1 Principe de Fonctionnement

Les codeurs rotatifs sont des capteurs de position angulaire. Ils sont composés de trois parties : d'un élément mécanique lié au système à observer, d'un élément optique et d'un élément électronique pour l'acquisition des signaux. Le capteur optique est lié mécaniquement à un arbre qui l'entraîne, son axe fait tourner un disque qui lui est solidaire. Ce disque comporte une succession de parties opaques et transparentes (Figure 15). Une lumière, émise par des diodes électro lumineuses (DEL), traverse les fentes de ce disque et crée, sur les photodiodes

réceptrices, un signal analogique. Une interface électronique, incluse dans le codeur, amplifie ce signal puis le convertit en signal carré qui est alors transmis à un système de traitement ; dans notre cas une carte Arduino (voir section suivante acquisition des données).

Les codeurs incrémentaux sont des codeurs rotatifs destinés à des applications de positionnement et de contrôle de déplacement d'un mobile par comptage et décomptage des impulsions qu'ils délivrent. Le disque d'un codeur incrémental comporte deux pistes, près des bords, les voies A et B, divisées en « n » intervalles d'angles égaux alternativement opaques et transparents. Les « n » intervalles correspondent à la résolution ou nombre de périodes, c'est-à-dire le nombre d'impulsions délivrées par le codeur pour un tour complet de son disque. Les photodiodes délivrent des signaux carrés en quadrature. Les pistes A et B sont déphasées l'une par rapport à l'autre d'un quart de période. Le déphasage des signaux correspondant aux pistes A et B permet de déterminer le sens de rotation du codeur.

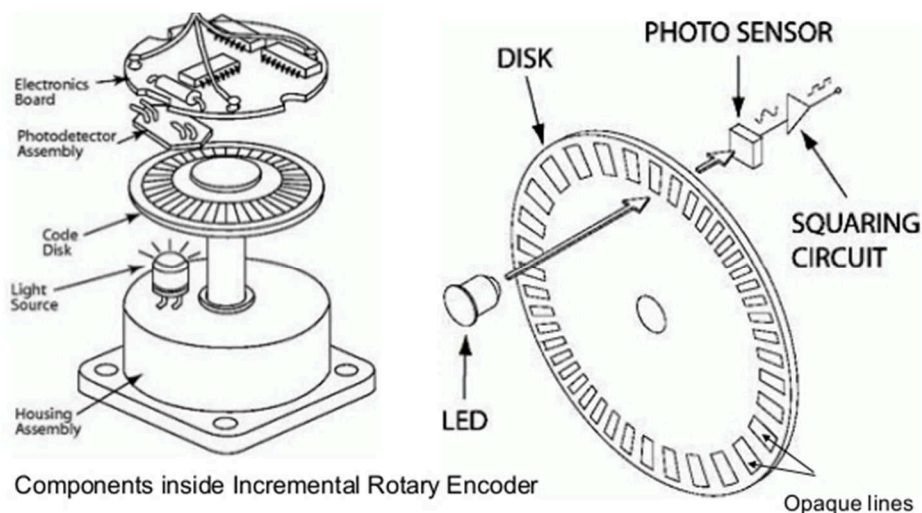


Figure 15 Principe d'un codeur rotatif incrémental,

Source : [NYU Shanghai]

Parce qu'il est de conception simple, le codeur rotatif incrémental est plus fiable et moins onéreux qu'un codeur absolu (Asch, 1999).

IV.3.2 Acquisition et traitements des signaux

Les signaux délivrés par les codeurs rotatifs incrémentaux sont des signaux carrés, déphasés permettant ainsi, en les analysant, de déterminer le sens de rotation. Le déphasage entre les voies A et B indique le sens du mouvement (Figure 16 gauche). C'est ensuite au

système électronique de traitement des données de mettre en place des compteurs d'incréments en fonction des fronts montants ou descendants détectés pour le calcul de la position (Figure 16 droite).

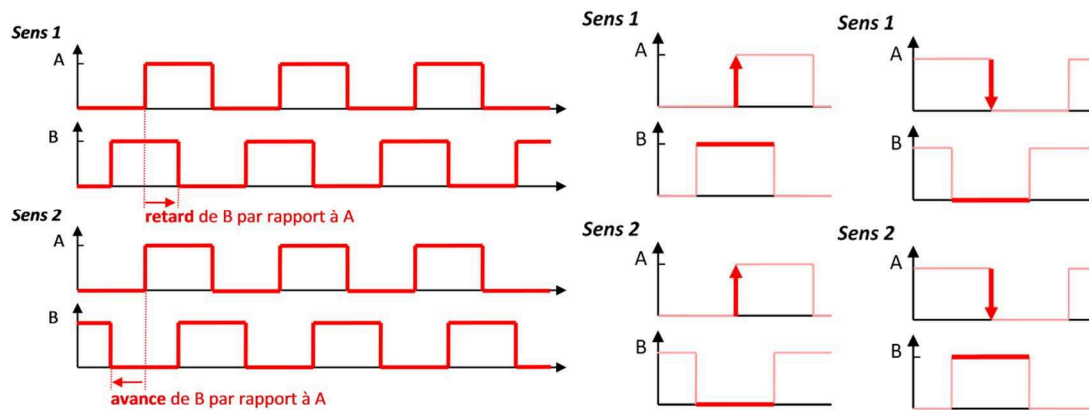


Figure 16 Exemple de déphasage entre les voies A et B (à gauche) ; Front montant et descendant (à droite)

Source : [forum Arduino(CFAURY, 2017)]

Pour déterminer la position (relative à une position initiale) et le sens du mouvement, on peut utiliser des interruptions pour détecter précisément les fronts montants ou descendants d'un des deux signaux : puis, comparer l'état de l'autre signal à l'instant de ce front, ce qui donnera le sens du mouvement.

L'interface DEMA est équipée de deux codeurs incrémentaux rotatifs : un sur un l'axe vertical et un sur l'axe horizontal ; afin de capturer la position X et Y du joystick. L'acquisition et le traitement des signaux issus des capteurs de position ont été réalisés à l'aide d'une carte Arduino méga 2560.

IV.3.3 Interface graphique associée

Nous avons développé une interface graphique utilisateur en python, afin de transcrire les tracés, en temps réel, à partir des positions lues par nos codeurs optiques (voir Figure 17). Cette interface permet d'enregistrer dans un dossier utilisateur, la succession de positions X et Y à l'instant t, lues par les codeurs optiques via la carte Arduino, et tracée dans la fenêtre de visualisation avec MATPLOTLIB. L'interface utilisateur permet également d'arrêter la lecture des positions, les effacer, ou encore de récupérer des trajectoires préalablement enregistrées afin de les tracer dans la fenêtre de visualisation.

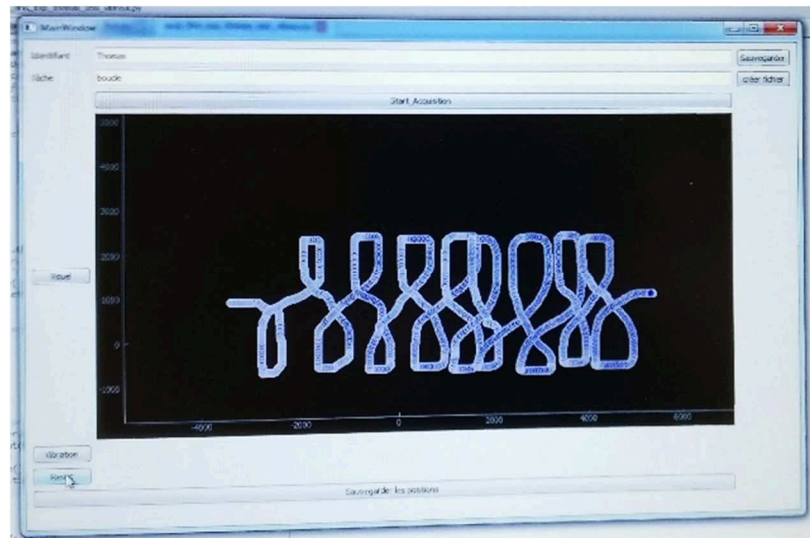


Figure 17 Interface graphique utilisateur, 1^{ère} version pour un affichage de la position du joystick de l'interface.

IV.4 Démonstrateur final

Les figures suivantes montrent le démonstrateur DEMA sous sa forme finale.

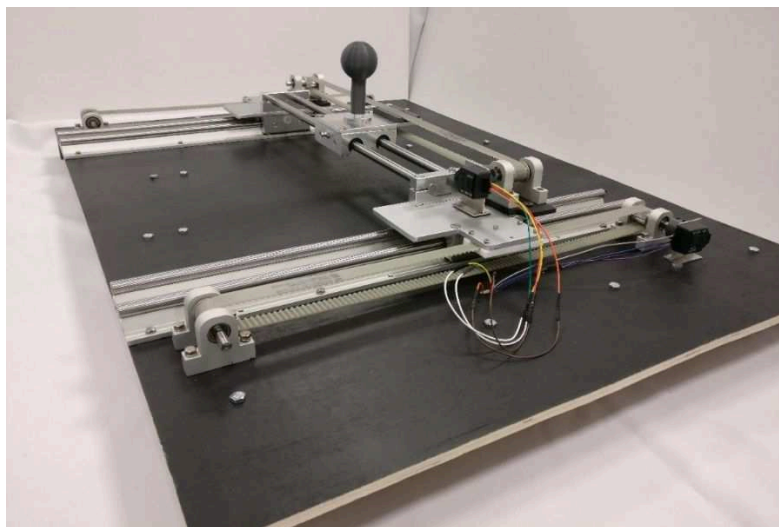


Figure 18 Représentation de $\frac{3}{4}$ de notre interface DEMA

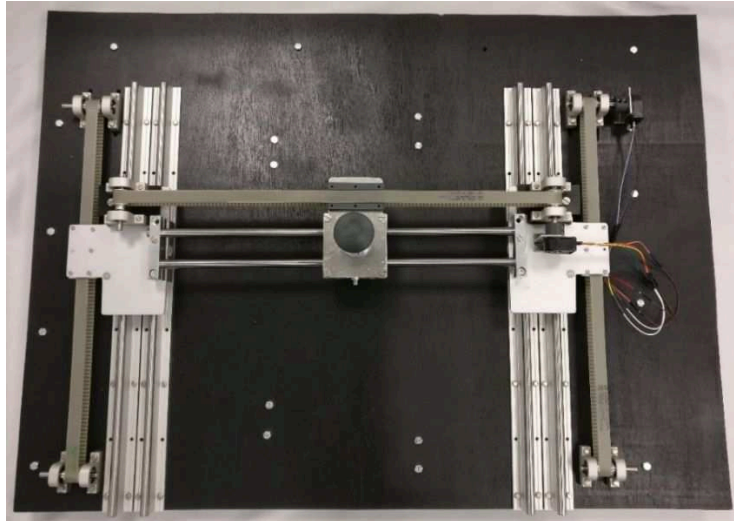


Figure 19 Vue du dessus de l'interface DEMA

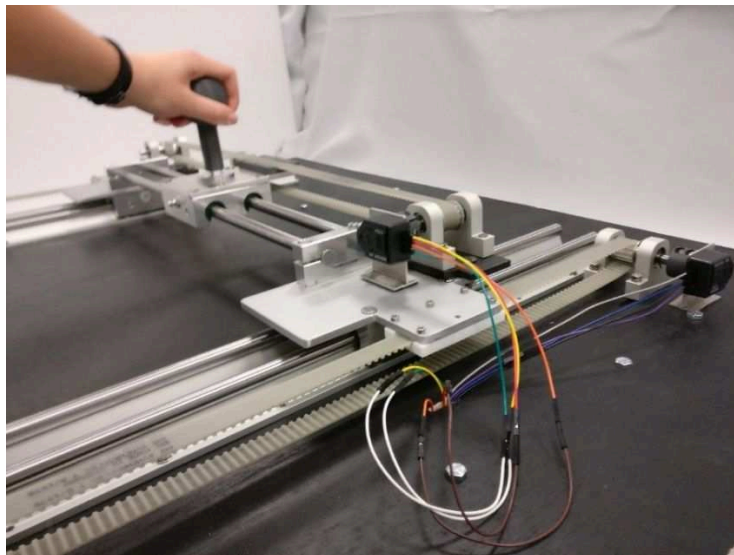


Figure 20 Codeurs Optiques de l'interface DEMA

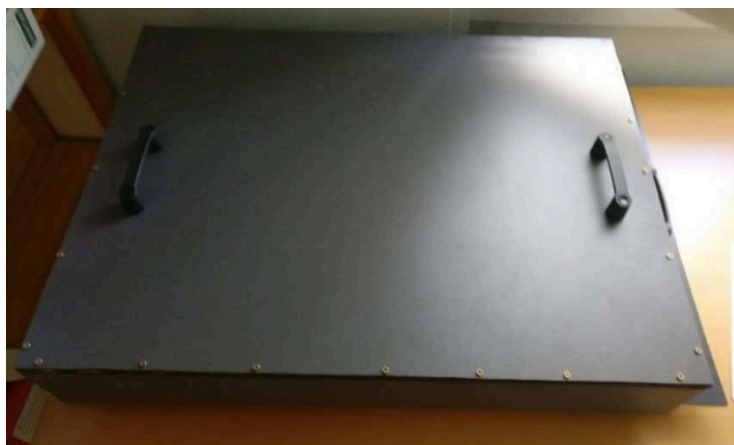


Figure 21 Cache de protection sur l'interface DEMA

En conséquence, DEMA respecte tous les critères du cahier des charges initial. En effet elle possède un espace de travail effectif 42 cm par 30 cm, elle présente deux degrés de liberté,

le joystick est interchangeable avec n'importe quelle autre prise en main imprimée en 3D ayant l'insert adéquat en sa base, et elle présente un mouvement avec très peu de frottement et de résistance.

Nous avons conduit des tests préliminaires sur l'exécution de 4 tracés pour vérifier que la chaîne de mesure et d'affichage fonctionnaient correctement. Nous avons reproduit une série de formes et tracés : une ellipse, un triangle, un carré et des boucles successives ; en utilisant un pointeur laser fixé sur la plateforme du joystick afin de suivre le tracé papier de chaque forme posé sous la surface de travail de notre interface DEMA. Voir Figure 22, Figure 23, Figure 24, Figure 25.

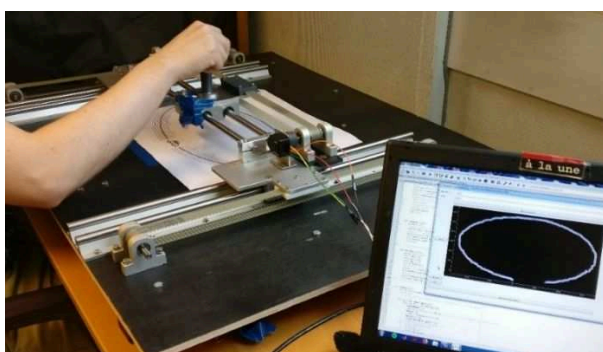


Figure 22 Tracé d'une ellipse



Figure 23 Tracé d'un triangle

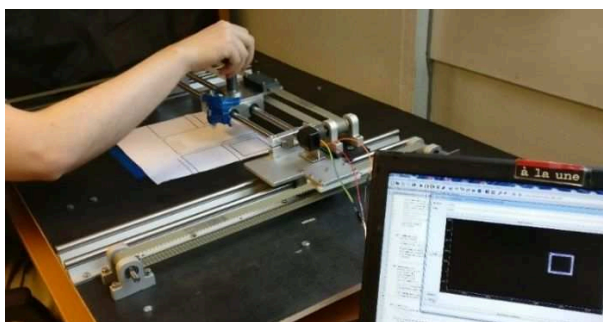


Figure 24 Tracé d'un carré

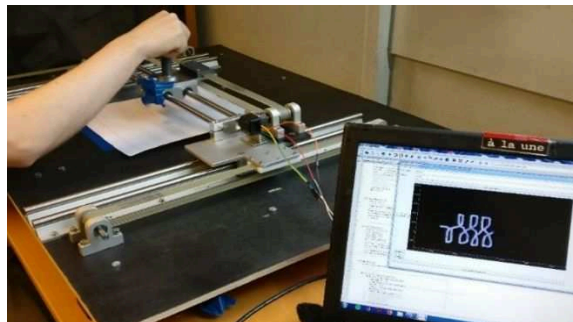


Figure 25 Tracé de boucles

IV.5 Conclusion

Les différents échanges réalisés avec les experts technologiques et paramédicaux ainsi que notre revue de la littérature nous ont permis de dresser un cahier des charges pour la conception d'une nouvelle interface destinée aux personnes avec de Trouble du Spectre de l'Autisme. En accord avec les considérations technologiques et de conception mentionnées plus

haut, nous avons réalisé un benchmark technologique puis des résultats de cette étude, nous avons développé l'interface DEMA. Elle possède un espace de travail de 42 cm par 30 cm, de deux degrés de liberté, des poignées interchangeables.

Nous avons mis en place des tests de caractérisation préliminaire ayant pour but d'illustrer la précision du mouvement possible, ainsi que la facilité d'utilisation de DEMA. Ces tests consistaient à reproduire des formes géométriques en s'aidant d'une représentation papier.

Nous avons atteint un stade de prototype fonctionnel comme démontré par nos tests de caractérisation préliminaire. Il nous faut, à présent, confronter notre proposition d'interface aux possibilités d'applications et de tâches utiles aux professionnels de santé travaillant avec des patients avec TSA. Nous souhaitons en outre leurs avis et leurs retours sur le prototype lui-même.

Dans les deux prochains chapitres nous allons détailler la démarche d'évaluation adoptée auprès de professionnels de santé de différentes spécialités travaillant avec des personnes avec TSA : explorations des champs de représentation des interfaces Humain-Machines tactiles puis entretiens semi-dirigés présentant DEMA.

V. Etude exploratoire des représentations des IHM chez les professionnels de santé via une technique d'élicitation associative

V.1 Introduction

Dans cette partie de notre projet, nous avons voulu compléter notre identification des attentes et des besoins des professionnels de santé travaillant avec des patients TSA, notamment en présentant notre prototype à des professionnels de santé pour les inciter à expliciter des besoins relatifs à cette technologie. Afin de constituer rapidement un corpus d'idées, qui relèvent les représentations des participants quant à leurs besoins vis-à-vis des IHM pour leurs patients avec TSA, nous avons choisi d'appliquer une technique d'élicitation par association : susciter des réponses par associations de concepts ou d'idées. Cette méthode consiste à introduire des stimuli verbaux ou visuels d'un domaine donné à une population sujet, ceci afin de recueillir un ensemble d'éléments dans ce domaine (Bisseret, Sebillotte, & Falzon, 1999). Pour plus de détails sur cette méthode voir (Collins & Quillian, 1969; Rosch, 1975; Vikis-Freibergs, 1994). L'étude repose sur un questionnaire en ligne qui a été diffusé auprès de professionnels de santé travaillant avec des patients avec autistes.

V.2 Méthode

V.2.1 Participants

Cette étude a été déployée au service de Psychiatrie de l'Enfant et de l'Adolescent de l'Hôpital de la Pitié Salpêtrière sur seize participants (quatorze femmes, deux hommes). Tous travaillent principalement avec des patients avec Troubles du Spectre de l'Autisme, enfants ou adultes. Le Tableau 6 présente les professions des participants. Tous ont choisi de participer librement et de façon éclairée à cette étude.

Tableau 6 Professions des participants de notre étude en ligne

Profession	Nombre
Médecin (psychiatre et pédopsychiatre)	6
Psychomotriciennes	6
Psychologues	2
Educatrice spécialisée	1
Orthophoniste	1

V.2.2 Procédure

Il s'agit d'un questionnaire en ligne basé sur 20 stimuli présentés aux participants. Ces stimuli pouvaient être des mots, des images ou des vidéos (cf. Annexe 2 pour le protocole). Sur le site Web sur lequel le questionnaire a été placé (Freeonlinesurvey.com), nous avons décrit l'objectif de notre étude. Par la suite, un formulaire de consentement éclairé était affiché. Le participant devait indiquer son consentement en cochant une case avant de pouvoir avoir accès au questionnaire.

Lors de notre étude, cette technique a été développée sur trois axes. Le premier axe présentait visuellement des mots relativement généraux tels que : « autisme », « interface », « jeux », « sensoriel », « social »³ qui font référence à l'univers de l'autisme et des technologies interactives. Le second axe employait des stimuli photographiques représentant différentes interfaces tactiles et haptiques pour l'autisme. Leur ordre d'apparition a été choisi afin de partir d'interfaces répandues, commercialisées et aller vers des objets plus spécifiques et proches de notre interface DEMA. Le dernier axe était composé de stimuli vidéographiques, représentant différentes tâches d'applications de différentes interfaces tactiles. Ces tâches sont des pistes d'activités potentielles réalisables avec l'interface DEMA. Ainsi le questionnaire était composé de trois pages de stimuli : une par axe d'étude. En début de chaque page, un rappel des consignes était indiqué : « Ecrivez tous les mots, adjectifs, éléments qui vous viennent à l'esprit, dans l'ordre dans lequel ils vous viennent, et ce le plus rapidement possible, quand vous lisez le stimulus de la question. Ne pas faire de phrase ». Enfin, la dernière page du questionnaire remerciait les participants, leur proposait de laisser un commentaire et également leur adresse mail s'ils étaient volontaire pour de futures études.

Nos analyses statistiques, notamment les analyses factorielles de correspondance simples, ont été produites avec le logiciel Microsoft XLSTAT.

V.2.3 Analyse des données

Toutes les réponses des participants, y compris les structures de plusieurs mots, ont été gardées pour l'analyse des données. Ces structures ont été comptabilisées comme une réponse unique.

³ La liste des stimuli et leur ordre de présentation est disponible en annexe 2.

Les items réponses écrits au pluriel ou les verbes conjugués et les hyponymes ont été regroupés, par exemple « Jeu », « jeux », « jeux vidéo », « jeu vidéo », « jeu d'imitation », « jeu d'exploration » ont été regroupés sous le terme jeux. Au total huit cent vingt-trois mots différents ont été dénombrés après ce regroupement, et avec leurs répétitions, mille sept cent vingt-six mots ont été mentionnés. Ils constituent notre corpus d'étude.

La fréquence d'apparition, ou nombre d'occurrences, correspond au nombre de fois qu'un item réponse est élicitée. Ces fréquences ont été calculées par participant, par question (tous participants confondus), et par métier.

Afin d'établir un critère de représentativité dans notre corpus, et au vu du nombre de participants et du nombre de réponses, nous avons considéré qu'un terme avait une représentativité importante si sa fréquence d'apparition était supérieure ou égale à 10.

Par la suite, nous avons classés les termes de notre corpus en 10 catégories, à savoir « Autisme », « Sensoriel », « Usabilité », « Interfaces-Machines », « Motricité », « Communications », « Tâches », « Jeux », « Emotions » et « Autres ». Cette procédure est basée sur une interprétation du sens des différents items réponses. Nous nous sommes servis de la sémantique pour catégoriser les items.

La catégorie « Autisme » présente tous les termes associés à l'autisme. La catégorie « Sensoriel » regroupe tous les termes liés aux sens et à la sensorialité. La catégorie « Usabilité » regroupe tous les mots en rapport avec la capacité d'un objet à être facilement utilisé par une personne donnée. La catégorie « Interfaces-Machines » présente tous les termes qui décrivent, présentent ou sont associés aux interfaces Humain-machine. La catégorie « Motricité » présente tous les termes en lien avec la motricité, voire la psychomotricité. La catégorie « Communications » regroupe tous les termes liés à la communication, aux interactions, aux compétences sociales. La catégorie « Tâches » regroupe tous les termes qui se rapportent à des tâches ou actions à produire pour réaliser une tâche. La catégorie « Jeux » présente tous les termes liés au ludisme et à différents types de jeux. La catégorie « Emotions » regroupe tous les mots en rapports avec les émotions qui peuvent être exprimés, perçus ou générés telles qu'anxieux ou rassurant. Enfin, la catégorie « Autres » regroupe tous les mots qui n'ont pas pu être classés dans les autres catégories.

V.3 Résultats et discussion

Nombre de mots élicités – Résultats généraux

Le nombre total d'items réponse est de 1 738, ce qui représente en moyenne 5, 4 associations par question par participant. Un peu moins de la moitié des participants (44 %) ont été capables de répondre avec cinq associations ou plus en moyenne. La plupart des participants (81 %) ont répondu avec plus de quatre associations en moyenne. Pour le détail de la répartition des réponses par participant sur toutes les questions voir le Tableau 7.

Tableau 7 Détails des items par participants sur toutes les questions. NR : question Non Répondues

Participant	Min	Max	Moy	Tot	NR
1	1	10	4,39	79	2
3	1	8	4	76	0
4	1	10	5,31	101	0
5	1	7	2,58	49	0
6	2	8	5,05	96	0
7	1	14	6,5	117	1
8	2	10	5	95	0
9	3	7	4,89	93	0
10	1	9	4,05	77	0
11	4	42	16,26	309	0
12	2	15	7,53	143	0
13	2	10	4,84	92	0
14	1	13	3,32	66	0
15	3	7	4,47	85	0
16	5	17	8,89	169	0
17	1	8	4,63	88	0

Parmi les 1 738 items réponses, 977 (56 %) sont différents. De plus, on note que 39, 8 % des réponses n'ont été évoquées qu'une seule fois.

Après la réalisation du groupement sémantique, on obtient 823 items réponses différentes (47 %), et 30 % des réponses n'ont été évoquées qu'une seule fois.

Les mots ayant les fréquences d'apparition les plus importantes, tous participants et toutes questions confondues, sont les termes *jeux* (n=37), *interaction* (n=26), *ludique* (n=25), *communication* (n=24), *apprendre* (n=23) ou *stimulation* (n=20). La fréquence d'apparition a été reliée avec la force ou l'importance d'un concept dans l'esprit des participants (Guerrero, Colomer, Guàrdia, Xicola, & Clotet, 2000).

Tableau 8 Pourcentage d'items élicités en fonction des questions, tous participants confondus.

Mode de présentation	N° de la question et son stimulus	Pourcentage d'items élicités (%)
Mots	2 - Autisme	9,61
	3 - Sensoriel	8,40
	4 - Toucher	6,50
	5 - Motricité	7,08
	6 - Social	6,85
	7 - Interface	4,78
	8 - Jeux	7,31
Photographie	9 – Robot Nao	5,87
	10 – Queball : Robot Mobile	4,32
	11- Tablette tactile	4,55
	12 – Je Stimule : Manette vibrante	3,39
	13 – Phantom omni	3,45
	14 – Falcon	2,47
	15 – Hurt me : interface portée pour l'autostimulation	3,22
Vidéographie	16 – Manche tactile : vibrations en contact direct sur la peau	3,34
	17 – Labyrinthe	5,75
	18 – Ecriture	4,26
	19 – Tour de rôle	4,72
	20- Trajectoire	4,13
		100 %

Le Tableau 8 montre une diminution du nombre de réponses entre le stimulus initial et le stimulus final. Ceci est dû à la méthode elle-même, générant de la fatigue et de la lassitude à répondre chez les participants. Nous observons également que le Robot Nao (102) et la vidéo du Labyrinthe (100) ont élicité le plus de réponses dans leur axes (respectivement « interface » et « tâche »). En effet, ce sont des éléments plutôt connus des professionnels de santé participant à l'étude : Un robot Nao est présent sur le site hospitalier où est réalisée l'étude du fait de projets de recherche l'utilisant ; Le labyrinthe présenté est similaire à ceux utilisés dans les bilans psychomoteurs.

V.3.1 Catégories

Le Tableau 9 présente la représentativité de chaque catégorie par rapport à notre corpus. Ainsi, nous observons que la catégorie « Sensoriel » rassemble le plus de mots (18,76 % du nombre total de notre corpus) et que la catégorie « Autres » en regroupe le moins (4,15 %). Les catégories « Interfaces-Machines », « Communications » et « Tâches » comportent à peu près le même nombre de mots. Si on ne comptabilise par les répétitions d'un même mot, la catégorie la plus importante est « Sensoriel » (14,09 %) et la catégorie la moins importante est « Autres » (8,15 %).

Tableau 9 Représentativité des catégories par rapport au corpus

Catégorie	En pourcentage de mots (%)	En pourcentage de mots différents (%)
Autisme	7,88	10,94
Sensoriel	18,76	14,09
Usabilité	5,75	8,38
Interfaces-Machines	10,53	13,37
Motricité	12,37	11,91
Communications	10,24	7,29
Tâches	10,18	8,38
Jeux	13,18	9,11
Emotions	6,96	8,38
Autres	4,15	8,15
Total	100 %	100 %

Afin d'observer les principaux termes de chaque catégorie, nous nous sommes focalisés sur les termes ayant une occurrence supérieure ou égale à 10 :

Concernant la catégorie « Autisme », aucun des mots obtenus n'a une fréquence d'apparition supérieure ou égale à 10 (le terme avec la plus grande occurrence est *handicap* (n=6)). Les mots avec les plus grandes occurrences de la catégorie « Sensoriel » sont *tactile* (n=18), *lumière* (n=16), *toucher*, *proprioception*, *sensoriel* (n=15) et *son* (n=10). Dans la catégorie « Usabilité », les termes ne dépassent pas le seuil de fréquences de 10 (les mots avec la plus grande fréquence d'apparition sont *environnement*, *intégration* et *limite* (n=4)). Concernant la catégorie « Interfaces-Machines », le terme *robot* (n=13) a la plus grande occurrence. Pour la catégorie « Motricité », les termes *coordination* (n = 13), *mouvement* (n=11), *exploration* (n=10) et *motricité fine* (n=10) ont les plus grandes fréquences d'apparitions. Dans la catégorie

« Communications » il s'agit des mots *interactions* (n=26), *communication* (n=24), *partager* (n=13), *relation* (n=13), *échange* (n=12) et *langage* (n=10). Pour la catégorie « Tâches », les mots avec les plus grandes fréquences d'apparition sont *apprendre* (n=23), *attention* (n=16) et *graphisme* (n=12). Les mots avec les plus grandes occurrences de la catégorie « Jeux » sont *jeux* (n=37), *ludique* (n=25), *stimulation* (n=20) et *couleurs* (n=14). Dans la catégorie « Emotions », les termes *attirer* et *plaisir* (n=10) ont la plus grande occurrence. Pour la catégorie « Autres », aucun terme n'a une occurrence supérieure ou égale à 10.

La catégorie « Sensoriel » est la plus riche en termes de mots (18,76 %) et de mots différents (14,09 %). En effet, ce résultat n'est pas étonnant vu qu'aux moins deux questions à stimulus écrit (« Sensoriel » et « Toucher ») portaient directement sur cette thématique. De plus la thématique sensorielle, notamment tactile était mentionnée dans le titre de certains stimuli vidéographiques.

Nous observons que la catégorie « Interfaces-Machines » a une grande représentativité aussi bien en termes de mots différents (13,37 %) qu'en termes de nombre de mots (10,53 %) présents. Nous pouvons supposer que les professionnels de santé sont intéressés par les Interfaces et les Machines mais que toutefois leurs représentations et points d'intérêts dans ce domaine divergent. Concernant l'occurrence forte de « robot », cela peut provenir de la connaissance du Robot Nao auprès des professionnels interrogés.

Concernant la catégorie « Autisme » nous observons que le nombre de mots présents est parmi les plus faibles (7,88 % du corpus) des catégories, mais que cette catégorie est parmi les plus importantes en termes de mots différents (10,94 %). Nous pouvons analyser ce résultat comme étant représentatif de la diversité de représentations de l'autisme chez les participants. En effet, les professionnels de santé interrogés n'ont pas la même formation, ne travaillent pas forcément avec les mêmes patients, ni sur les mêmes problématiques.

Les fréquences relativement importantes de la catégorie motricité en termes de nombre de mots (12,37 %) et de nombre de mots différents (11,91 %) peuvent s'expliquer de plusieurs façons. Tout d'abord la prédominance des professionnels psychomotriciens parmi les participants (6 sur 16) et de leurs collègues sensibles aux problématiques liées à la motricité (Educatrice spécialisée et médecins, soit 7 participants en plus). Ensuite, cela peut provenir du nombre de questions orientées directement sur les thématiques de la motricité. Enfin, les particularités motrices sont fortement présentes dans l'autisme et ce de manière hétérogènes (Cf. Chapitre II). Ainsi les professionnels de santé sont sensibles à cette thématique et ceux qui sont les plus concernés (en particulier les psychomotriciens) sont plus nombreux dans notre

cohorte. C'est pourquoi, les termes avec les occurrences les plus fortes dans cette catégorie, *coordination* (n = 13), *mouvement* (n=11), *exploration* (n=10) et *motricité fine* (n=10), relèvent directement des principaux axes de travail des psychomotriciens s'occupant de patients qui ont souvent des retards de développement.

La représentativité importante de la catégorie « Communication » s'interprète aisément vu la prédominance des troubles de la communication sociale dans le syndrome d'autisme.

Pour la catégorie « Jeux », nous pouvons constater qu'elle est importante en termes de mots présents (13,18 %), mais moins importante que les autres catégories en termes de nombre de mots différents (9,11 %). Nous observons aussi que les termes avec les plus fortes occurrences dans cette catégorie sont des termes très généraux autour du jeu. En effet, les patients des professionnels de santé sont principalement des enfants ou des adolescents (Service de Psychiatrie de l'Enfant et de l'Adolescent) et les approches de prise en charge pour ces populations font couramment appel au jeu.

La représentativité importante de la catégorie « Tâche » peut s'expliquer par le fait que le but des professionnels de santé est de faire travailler leurs patients sur des compétences précises pour atteindre leurs objectifs personnels. Par exemple, pour travailler le graphisme, un praticien pourra proposer des tâches de coloriage, de dessin ou d'écriture.

Les faibles représentativités des catégories « Usabilité » et « Emotions » en terme de nombre de mots (respectivement 5,75 % et 6,96 %) et en termes de nombre de mots différents (8,38 %), semble indiquer que ces thématiques sont secondaires dans les représentations des professionnels de santé.

Au vu de ces résultats, une analyse par groupe Métier nous permettra de distinguer les représentations spécifiques à chaque spécialité et d'affiner ainsi la compréhension des résultats de notre étude.

V.3.2 Analyse par groupe Métier

Afin d'affiner notre analyse nous avons établi des rapprochements par corps de métiers : les « Médecins » toutes spécialités confondues, les « Psychomotriciennes », et les « Autres » professions.

La Figure 26 illustre la diversité de points de vue des différents professionnels de santé qui gravitent autour des patients avec TSA. Nous observons que l'unique item réponse le plus

élicité par les trois groupes Métier est *Jeux*. Ceci indique à la fois l'importance des jeux pour les différents participants et la diversité des réponses fournies à nos questions.

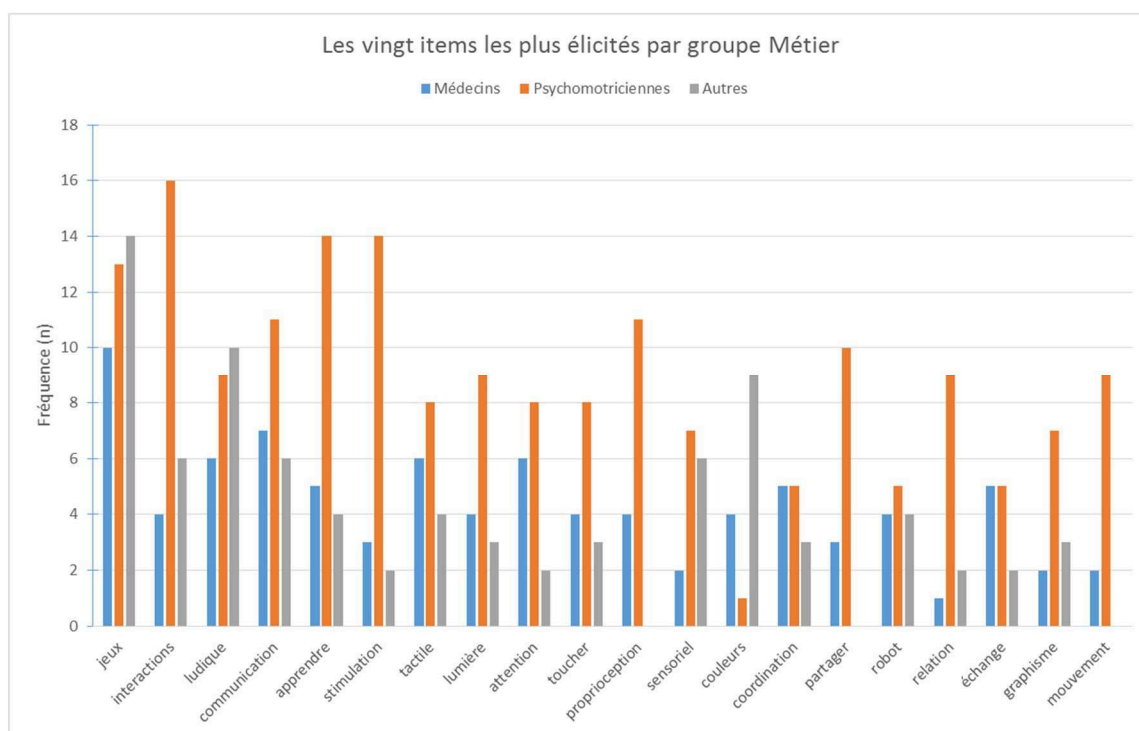


Figure 26 Les items les plus élicités ($n \geq 10$) par groupe Métier

Nous observons que le groupe « Psychomotriciennes » a élicité plus de termes (179) par rapport aux groupes « Médecins » (87) et « Autres » (83). Concernant les 20 termes les plus mentionnés : *Jeux*, *communication* et *ludique* ont été les termes les plus élicités par le groupe « Médecins » (respectivement $n = 10$, 7 et 6), alors que les termes *Interaction*, *apprendre* et *stimulation* ont été les plus mentionnés par le groupe « Psychomotriciennes » (respectivement $n = 16$, 14 et 14). La psychomotricité s'appuie en effet sur l'interaction avec le patient et la stimulation sensori-motrice pour induire de nouveaux apprentissages. Pour le groupe « Autres », les termes *jeux* ($n=14$), *ludique* ($n=10$) et *couleurs* ($n=9$) ont été le plus cités.

On peut noter que la majeure partie des professionnels de santé interviewés travaillent avec des enfants, et donc pratiquent souvent des jeux pour rentrer en relation, ou pour observer leurs patients, ce qui expliquerait la prédominance des termes *ludique* et *interaction*.

Ainsi, nous pouvons retenir de cette analyse que le terme *jeux* est plébiscité par les trois groupes Métier.

La Figure 27 présente les résultats des élicitations pour les stimuli vidéo uniquement

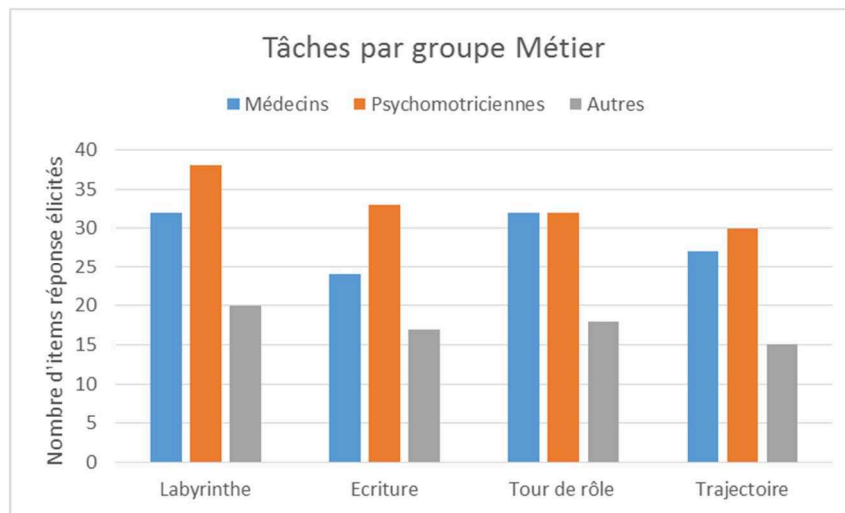


Figure 27 Nombre d'item réponse élicité par tâche présentée

La tâche appelée *Labyrinthe*, représente un singe explorant un labyrinthe pour trouver un régime de banane qui indique la sortie. Elle est amplement inspirée du jeu Donkey Kong. Cette tâche d'exploration spatiale 2D à l'aide de personnage et de stimulation sonore, lorsque le personnage avance dans un mur, a élicité le plus d'items dans les trois groupes Métier.

En effet, le labyrinthe est un jeu plutôt connu et très utilisé. On retrouve ce type de tâches dans certains bilans psychomoteurs ainsi que dans de nombreux jeux pour enfants.

La tâche *Trajectoire* consiste à repasser sur une forme déjà tracée en utilisant un Phantom omni. Il faut noter que cette tâche était présentée à la dernière question de l'étude. Cela explique sans doute le nombre relativement moins élevé d'élancements pour ce stimulus. (Bisseret et al., 1999).

Relation entre termes et groupes Métier

Par la suite, nous avons voulu étudier de manière plus globale les relations entre les différentes variables. Nous avons donc appliqué une analyse factorielle de correspondance simple entre les 20 items les plus élicités et les groupes Métiers. Le résultat est représenté par la Figure 28 et le Tableau 10.

Le tableau des contributions des groupes Métier à l'AFC, Tableau 10, nous indique que le groupe « Médecins » est important pour la construction des axes notamment pour le facteur 2. Le groupe « Autres », est quant à lui, important pour la construction de l'axe 1.

Tableau 10 Contribution des colonnes de notre AFC, les groupes Métier

	Poids (relatif)	F1	F2
Médecins	0,265	0,033	0,702
Psychomotriciennes	0,521	0,383	0,095
Autres	0,214	0,583	0,203

La Figure 28 représente l'analyse factorielle de correspondance simple concernant les mots les plus élicités ($n > 10$) par tous les participants sur toutes les questions. Cette analyse statistique met en avant les différences entre les trois regroupements de métiers qui sont « Médecins », « Psychomotriciennes » et « Autres ».

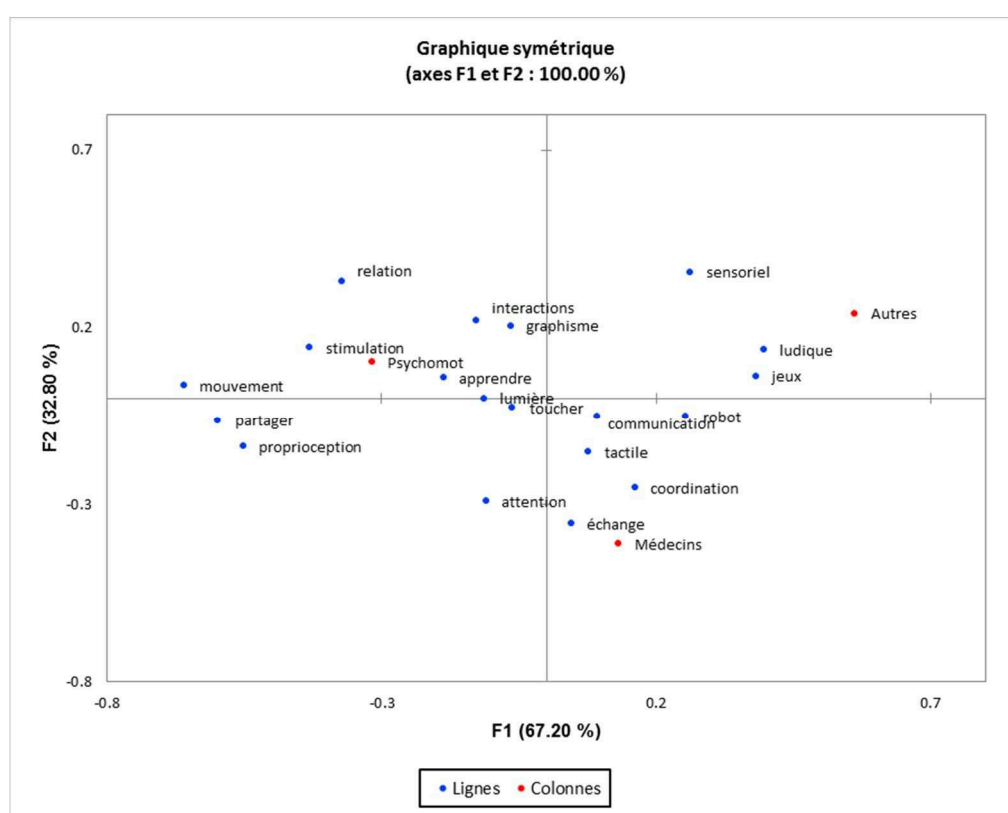


Figure 28 Analyse de Correspondance Factorielle Simple entre les 3 regroupements de professions et les 20 items réponses les plus élicités ($n \geq 10$).

Nous observons que les termes *mouvement* ou *partager* sont opposés à *ludique*. En effet, on peut supposer que les premiers correspondent plus à des tâches où les capacités à travailler des patients sont sollicitées, ce qui rend ces activités *ludiques*.

Les termes *coordination*, *échange*, *attention* qui gravitent autour du groupe « Médecins » reflètent une interaction plus distante avec les patients. Cela peut s'expliquer par le fait que les médecins ont un contact moins fréquent et moins proche avec les patients que les

professionnels paramédicaux qui voient leurs patients avec TSA tous les jours, ou plusieurs fois par semaine sur de longues périodes.

Nous observons aussi que les termes *simulation*, *mouvement*, *apprendre*, *interactions*, *relation* ou *graphisme* sont à proximité du groupe « Psychomotriciennes ». En effet, ces termes reflètent le travail et le rôle des psychomotriciennes auprès des patients avec TSA (Kloeckner et al., 2009; Perrin & Maffre, 2013). Ce travail nécessite une relation proche avec les patients, un accompagnement pour tenter d'entrer en contact avec eux qui passe par la stimulation sensori-motrice et l'apprentissage.

Nous notons que les termes *ludique*, *robot*, *sensoriel*, *jeux* sont présents auprès du groupe « Autres ». Ce groupe est constitué de 4 professionnels : deux psychologues, une éducatrice spécialisée et une orthophoniste. Ces termes pourraient illustrer un intérêt plus prononcé pour les nouvelles technologies propres à ces participants, au-delà de leur appartenance à un groupe professionnel.

V.4 Conclusion

Cette étude exploratoire a été conduite auprès de professionnels de santé s'occupant de patients avec TSA afin de mettre en évidence les représentations qu'ils ont en matière d'interfaces humains-machines tactiles et de tâches applications possibles.

Parmi les 20 termes les plus élicités, 9 d'entre eux décrivent des tâches possibles à réaliser avec des interfaces, 7 correspondent à des caractéristiques techniques et les 5 restants sont relatifs au champ lexical de la sensorialité. Les aspects ludiques, le jeu et l'interaction sont les plus importants d'après nos résultats.

Au-delà des spécifications individuelles, nous avons également observé une certaine variabilité entre les différents groupes métiers considérés.

Au travers de cette approche d'élicitation par association, les éléments mis en exergue reflètent la diversité de préoccupations et des représentations portant sur des personnes avec TSA, possiblement avec déficience mentale et/ou motrice, prises en charge par des professionnels de santé travaillant avec des enfants avec TSA. Ces informations nous permettront de spécifier les futures améliorations de notre interface.

VI. Evaluation de la place des IHM et de notre interface DEMA par des entretiens semi-dirigés de professionnels de santé

VI.1 Introduction

Nous avons organisé des entretiens semi-dirigés avec des professionnels de santé, de toutes spécialités, travaillant avec des patients avec TSA à l'Hôpital de la Pitié Salpêtrière. Notre objectif est, d'une part, d'approfondir notre identification des pratiques des professionnels de santé et de recueillir des informations sur leurs relations avec les interfaces Hommes-Machines. D'autre part, notre objectif est également de présenter le prototype de l'interface DEMA afin de le faire évaluer et de déterminer des points d'améliorations ainsi que des tâches d'applications possibles avec les patients.

Les entretiens semi-dirigés sont des méthodes d'extraction des connaissances assez fréquentes dans les expériences centrées utilisateurs. Les questions ouvertes permettent à l'interviewé de parler de sujets qui lui semblent importants (Bisseret et al., 1999). Cette méthode est complexe et fastidieuse dans son traitement et son analyse des résultats. Toutefois, elle est extrêmement riche en informations.

VI.2 Méthode

VI.2.1 Participants

Cette étude a été déployée, à l'Hôpital de la Pitié Salpêtrière sur douze participantes, professionnels de santé travaillant avec des patients TSA, qui ont accepté de participer à nos entretiens. Elles avaient, au préalable, effectués l'étude en ligne mentionnée dans le précédent chapitre (cf. Chapitre V). Ces professionnels ont eu une brève présentation du projet de l'étude lors d'une réunion interne dans leur service. Les profils des participants, leurs professions et leurs populations de patients peuvent être consultés dans le Tableau 11.

Les participants travaillaient dans les lieux suivants, tous rattachés au service de psychiatrie de l'enfant :

- L'USIDATU (Unité Sanitaire Interdépartementale d'Accueil Temporaire d'Urgence) est une unité d'accueil pour personnes TSA en situations complexes.
- Le centre diagnostic autisme est un centre spécialiste dans l'observation et le diagnostic de l'autisme.
- L'unité de jour correspond à un service de médecine polyvalente accueillant des patients nécessitant une prise en charge diagnostique et thérapeutique ciblée en hospitalisation de courte durée et uniquement en journée (pas d'internat).

Tableau 11 Variables caractéristiques des participants aux entretiens.

Participant	Profession	Type de population	Lieu
1	Psychologue	Enfants et Adultes	USIDATU
2	Pédopsychiatre	Enfants	USIDATU
3	Ergothérapeute	Enfants et Adultes	USIDATU
4	Psychomotricienne	Enfants	Centre diagnostic Autisme, Unité de Jour
5	Pédopsychiatre	Enfants	USIDATU
6	Educatrice spécialisée	Adultes	USIDATU
7	Pédopsychiatre	Adolescents	Hôpital de jour
8	Pédopsychiatre	Enfants	Hôpital de jour
9	Psychomotricienne	Enfants	Libéral
10	Pédopsychiatre	Enfants	Hôpital de jour
11	Psychomotricienne	Enfants	Libéral et institution
12	Orthophoniste	Enfants	Hôpital de jour

VI.2.2 Protocole

Les entretiens ont eu lieu dans un bureau du centre documentaire au niveau -1 du bâtiment de Psychiatrie de l'Enfant et de l'Adolescent, Hôpital de la Pitié Salpêtrière, Paris. Nous avons mené des entretiens semi-dirigés en nous servant d'un protocole préétabli.

Une présentation du sujet de recherche a été faite en début d'entretien, ainsi que la demande d'autorisation d'enregistrement audio de la session. Le dictaphone était placé entre les protagonistes en évidence sur la table. Les participantes étaient confortablement installées dans une salle avec l'intervieweuse. L'interface DEMA était posée sur une autre table dans un coin de la pièce. Les entretiens ont duré en moyenne une heure (voir Tableau 13 pour plus de détails).

Ces entretiens ont été semi-dirigés, les questions étaient réparties selon deux axes : les premières questions avaient pour but de mieux comprendre les pratiques des participantes, leurs difficultés, leurs relations et leurs expériences vis-à-vis des Interfaces Hommes Machines ; le deuxième axe concernait la présentation de l'interface DEMA, leurs premières impressions, leurs prises en main de l'interface et comment elles se représentaient une possible future utilisation de l'interface⁴.

Nous avons utilisé la technique du « *Pourquoi ? Comment ?* ». Le but de cette technique d'entretien semi-dirigé est orienter le sujet à l'aide des questions Pourquoi ? ou Comment ? Ceci incite la personne à expliquer plus en détails ce qu'elle vise à exécuter quand elle agit ou la procédure qu'elle met en œuvre pour réaliser son objectif (Galambos, Black, & Abelson, 2013 ; Graesser, Woll, Kowalski, & Smith, 1980). Lors des entretiens, nous avons appliqué cette méthode après avoir posé notre question principale (voir trame de questions en annexe 3) et pour approfondir les réponses des participants. (Bisseret et al. 1999)

VI.2.3 Analyse des données

Ces entretiens ont été enregistrés par dictaphone avec le consentement des participants. Ils ont été ensuite transcrits manuellement mots pour mots sur des documents de traitement de texte numérique type Microsoft Word. Les hésitations, les phrases non finies et autres réactions ont été transcrites. Ces textes ont ensuite été analysés afin d'identifier des idées, des remarques et informations. La codification s'est effectuée sur une base sémantique, elle a été réalisée manuellement. Notre analyse a été dynamique, à la fois en prenant en compte les caractéristiques actuelles des pratiques et de notre interface, ainsi que les projections d'améliorations possibles.

Cette codification a été ensuite reportée sur les versions numériques des entretiens à l'aide du logiciel MAXQDA 2018. Ainsi, chaque entretien a été lu et analysé plusieurs fois par la même personne afin d'affiner l'identification et la codification de chaque information. Seules les réponses des participants ont été codifiées et comptabilisées.

Par la suite, nous avons appliqué un regroupement sémantique de ces unités de codage. Nous avons défini 3 niveaux de catégories qui structurent et rassemblent l'ensemble des unités de codage identifiées à travers nos douze entretiens. Le premier niveau de classification

⁴ La trame des questions est disponible en Annexe 3

comporte 6 catégories, le second 12 catégories et le troisième en contient 44, voir le Tableau 12. Nous avons exclu 9,8 % de nos unités de codage car les informations relevées étaient de l'ordre du contexte général (5,15 %) et d'idées variées mais peu représentatives du reste du corpus (4,65 %). De même, toutes les interrogations générales des praticiens sur le fonctionnement et la mécanique de l'interface DEMA (2,37 % du corpus) n'ont pas été prises en compte. Au total 88,15 % des unités de codage appliquées aux entretiens ont été utilisées pour notre analyse. L'annexe 1 contient quelques exemples issus du corpus pour illustrer les catégories.

Tableau 12 Classification et définitions des catégories

Catégorie niveau 1 : Définition catégorie niveau 1	Proposition de catégorie niveau 2 : Définition catégorie niveau 2	Catégories niveau 3 : Définition catégorie niveau 3
Pratique : Elle rassemble toutes les unités de codages liées à la description de la pratique des participants c'est-à-dire le métier effectué, le lieu de travail, les activités réalisées (activités qui n'emploient pas d'IHM), les outils (autres que les IHM), les difficultés rencontrées dans leur pratiques, leurs environnements de travail (pluridisciplinaire ou non, localisations diverses, etc...)	Activités : Les activités pratiquées par les praticiens	Activités motrices : Activités portant sur l'utilisation et/ou la stimulation des capacités motrices des patients tels que le dessin, l'écriture etc...
		Activités de socialisation : Activités portant sur l'utilisation et/ou la stimulation des capacités sociales des patients
		Activités cognitives : Activités portant sur l'utilisation et/ou la stimulation des capacités cognitives des patients
		Activités à bases sensorielles : Activités portant sur l'utilisation et/ou la stimulation des capacités sensorielles des patients
		Examens cliniques : Réalisation d'examens cliniques, auscultations, entretiens des patients
		Observations : Parmi les évaluations réalisées par les professionnels de santé, ils mentionnent avoir besoin d'observer les capacités d'adaptation des patients à des situations et des stimulations plus ou moins complexes
	Conditions de travail : les conditions dans lesquelles les praticiens travaillent	Collaborations avec les collègues et partage d'informations : Travail du praticien au sein d'une équipe pluridisciplinaire, notamment lors de l'observation de patients pour avoir deux regards sur un phénomène. Les informations des patients récoltées par chaque praticien sont partagées et mises en commun sur une base de données
	Outils : Les outils employés par les professionnels de santé dans leurs pratiques	Renforceurs (dont alimentaires) : Les praticiens utilisent des renforceurs (récompense) qui peuvent être alimentaire, sociaux ou sensoriels pour stimuler ou valoriser les actions des patients.
		Rituels : Dans leurs manières d'interagir avec les patients au sein de leur pratique, les professionnels de santé mettent en places des rituels tels que toujours commencer par telle stimulation sensorielle
	Besoins :	Adaptation du professionnel au patient : Les professionnels de santé indiquent qu'ils doivent en permanence s'adapter aux patients, que ce soit dans leurs postures, le ton de leurs voix, les activités proposées, les

	Les besoins des professionnels de santé dans leurs pratiques	stimulations employées, l'humeur et les envies du patient au moment de la séance
		Manque de support matériel et technique : Les professionnels de santé indiquent qu'ils peuvent manquer de matériel pour réaliser des activités, mais également d'atelier et outils pour concevoir des activités ou des objets, ainsi que de soutien techniques (ingénieurs, techniciens) pour les réalisations plus complexes
		Manque de temps pour les patients : Les professionnels de santé mentionnent un manque de temps disponible pour mieux prendre en charge les patients que ce soit du temps d'activité, du temps logistiques (réaliser les transmissions, mettre en place des activités), ou du temps d'analyse et d'échange (revu des patients en réunion d'équipe, partage d'informations etc.)
	Besoins pour le travail avec les TSA (la mise en place d'activités, d'outils, de relations) : Les besoins des professionnels de santé lorsqu'ils travaillaient spécifiquement avec des patients TSA	Instaurer la notion de plaisir : Pour les professionnels de santé, il est fondamental, au vu de l'absence de communication et parfois du passif des patients d'instaurer la notion de plaisir dans l'interaction et dans le fait de réaliser certaines actions IHM pour entrer en relation avec les patients avec TSA : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives à l'utilisation des IHM comme outils pour entamer /créer une interaction, une relation avec un patient TSA IHM plus adaptable aux différents patients : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives à la description des IHM comme tant des outils dit numérique, plus facilement adaptable aux préférences des patients TSA
Attitude envers les nouveaux moyens de prise en charge des patients : Cette catégorie se rapporte aux phrases et informations relatives à l'usage de nouveaux moyens de prise en charge des patients TSA	Conciliation entre IHM et Pratique : Dans cette catégorie sont mentionnées les activités réalisées par les professionnels de santé avec des interfaces hommes-machines, mais également les différentes inquiétudes mentionnées quant à l'introduction et l'emploi d'IHM dans leurs activités	Activité sur Tablette et Ordinateur : Activités de patients utilisant des tablettes et/ou des ordinateurs réalisées dans la pratique des professionnels de santé ou dans leur service par d'autres professionnels
		Activité Robot Nao : Activités de patients utilisant le robot Nao réalisée dans la pratique des professionnels de santé ou dans leur service par d'autres professionnels
		Activité Objets Vibrants : Activités de patients utilisant des objets vibrants réalisés dans la pratique des professionnels de santé ou dans leur service par d'autres professionnels
	Ouverture à l'utilisation des IHM : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives à une vision positive de l'usage d'IHM au sein de la pratique des professionnels de santé avec des patients TSA	Ouvert à tester des IHM : Les phrases et éléments qui indiquent que les professionnels de santé sont ouverts à utiliser des IHM dans leurs pratiques
		Idées d'IHM et d'utilisation dans leurs pratiques : Les idées et les projets d'IHM ou de leurs utilisations imaginées, en cours de réalisation ou abandonnés
	Non conciliation des IHM et de leurs pratiques : Cette catégorie correspond à toutes les phrases et informations relatives à une vision négative de l'usage d'IHM au sein de la pratique des professionnels de santé avec des patients TSA	Manque de compétence : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives à un manque de compétence ou de formation des professionnels de santé, créant ainsi un blocage à l'utilisation d'IHM dans leurs pratiques Inquiétude de dépendance aux écrans : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives à une crainte de dépendance aux écrans, créant ainsi un blocage à l'utilisation d'IHM dans leurs pratiques Réfractaires : Cette catégorie reporte toutes les phrases et informations relatives au désintérêt ou au rejet personnel pour les jeux numériques, IHM etc... créant ainsi un blocage à

		l'utilisation d'IHM dans leurs pratiques, notamment pour des appétences personnelles
<p>Attitude envers l'interface DEMA : Cette catégorie correspond aux phrases et informations relatives à l'usage de notre interface DEMA au sein de la pratique des professionnels interrogés avec des patients TSA</p>		<p>Approche à la fois motrice et sensorielle : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives à la désignation de notre interface DEMA comme un outil basé sur des stimulations sensorielles et motrices pour stimuler les patients avec TSA</p>
		<p>Sa polyvalence en termes de tâche et de patients : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives à la désignation de notre interface DEMA comme un outil polyvalent, qui permet de réaliser plusieurs types de tâches et d'adresser plusieurs types de patients. Ainsi toutes les informations relevant d'une interface modulaire (réglable en hauteur, en inclinaison, avec une position d'écran variable), d'un outil intermédiaire entre l'espace 2D et l'espace 3D et d'un actionnement libre de toute contrainte sont présent dans cette catégorie</p>
		<p>Ludique et Attirante : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives à l'apparence ludique et attirante ainsi qu'à une manipulation agréable de l'interface DEMA</p>
		<p>Technologique –industrielle et volumineuse : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives à l'apparence technologique-industrielle et volumineuse de l'interface DEMA</p>
		<p>Sécurité : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives à des notions de sécurité de l'interface DEMA, tels que masquer et protéger certains câbles ou mécanisme, modifier l'esthétique de notre interface pour limiter les possibles tentatives de destructions par les patients avec TSA</p>
		<p>Joystick interchangeable : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives au joystick et le fait qu'il est interchangeable</p>
		<p>Nécessite un petit temps d'adaptation : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives à la nécessité d'un petit temps d'adaptation lors de la première manipulation de l'interface DEMA</p>
		<p>Ajout de stimulations sensorielles variées (vibrotactile, textures, écran, son) : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives à l'ajout stimulations sensorielles sur l'interface DEMA, tels que des vibrations, des textures, un écran, des retours audio...</p>
		<p>Caractéristiques du logiciel complémentaire de l'interface DEMA : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives aux caractéristiques du logiciel complémentaire de l'interface DEMA (enregistrement automatique des données, facilement paramétrable/ergonomique, utilisation autonome par le patient)</p>
<p>Usages Potentiels de l'interface DEMA : Cette catégorie regroupe toutes les unités de codage qui proposent ou valident des suggestions d'activités que l'on pourrait réaliser avec notre interface DEMA, à plus ou moins long terme</p>	<p>Activités potentielles : Cette catégorie regroupe toutes les informations relatives aux activités qui pourraient être réalisées avec l'interface DEMA au sein de la pratique des professionnels avec des patients TSA</p>	<p>Activités graphique (dessin- écriture) : Propositions d'activités liées au dessin, au coloriage, à l'écriture, à la trace</p>
		<p>Activités motrices (retour de force, exploration/gestion de l'espace) : Propositions d'activités stimulant les capacités motrices des patients, notamment des tâches de retour de force, d'exploration de l'espace, de travail des réflexes, de renforcement musculaire, de précision, de coordination œil-main etc...)</p>

		<p>Socialisation : Propositions d'activités de socialisation, visant à développer les capacités sociales des patients</p> <p>Activités de discrimination sensorielles : Propositions d'activités de discrimination sensorielles, visant à développer les capacités sensorielles et les préférences sensorielles des patients</p>
<p>Patients TSA : Cette catégorie regroupe les unités de codage qui concernent directement la relation entre le praticien et son patient notamment des anecdotes, des descriptions comportementales, ainsi que des événements marquants avec les patients</p>	<p>Caractéristiques des patients Les patients sont décrits en termes de caractéristiques vis-à-vis du TSA, en terme de tranche d'âge et en terme de nombre de patients suivit aux moments des entretiens.</p>	
	<p>Difficultés syndrome : Les difficultés liées au syndrome de l'autisme</p>	<p>Hétérogénéité : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et idées en relation avec l'hétérogénéité du syndrome à travers les patients avec TSA</p>
		<p>Auto et hétéro agressivité : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et idées en relation avec troubles du comportement, plus particulièrement l'auto et l'hétéro agressivité que peuvent présenter les patients avec TSA</p>
		<p>Troubles de la communication et des interactions : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et idées en relation avec les troubles de la communication, notamment langagier, et des interactions sociales des patients avec TSA</p>
		<p>Particularités sensorielles (dont tactiles) : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives aux particularités sensorielles des patients avec TSA, dont les particularités tactiles</p>
		<p>Trouble de l'attention : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives aux troubles de l'attention des patients avec TSA</p>
		<p>Intérêts restreints : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives aux Intérêts restreints des patients avec TSA</p>
		<p>Angoisse/ Anxiété : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives aux angoisses des patients avec TSA</p>
	<p>IHM utilisées par les patients : Cette catégorie correspond à toutes les phrases et informations relatives à l'utilisation d'IHM par les patients avant d'être pris en charge par les professionnels interrogés</p>	<p>Utilisation de tablettes par les patients avant la prise en charge : Cette catégorie se rapporte à toutes les phrases et informations relatives à l'utilisation de tablette par les patients avant d'être pris en charge par les professionnels interrogés (pour de la communication alternative principalement)</p>
<p>Profils potentiels des patients utilisant l'interface DEMA : Les unités de codages de cette catégorie présentent les différents types de patients qui pourraient utiliser ou non l'interface DEMA (TSA, déficiences mentales, non verbaux, Accident Vasculaire Cérébrale)</p>		

Des statistiques descriptives ont pu être réalisées grâce au logiciel MAXQDA 2018, les analyses statistiques plus poussées ont été effectuées avec le logiciel Microsoft XLSTAT.

VI.3 Résultats et discussion

Ce travail représente l'analyse de douze heures d'entretiens, soit environ cent soixante-douze pages de transcription et plus de mille quatre cent soixante-dix segments de textes isolés et annotés (pour plus de détails voir le Tableau 13).

Tableau 13 Informations générales sur les entretiens

Durée des entretiens				
Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-Type	Total
23 minutes	1 h 50	1 h	26 min	12 h

Nombre de pages de transcription				
Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Total
5	28	14	6,3	172

Chaque texte a été lu avec attention et chaque idée dégagée a été labellisée dans une unité de codage. Les unités de codage proches sémantiquement ont été réunies dans des catégories comme nous l'avons détaillé dans la section Analyse des données.

VI.3.1.1 Nombre d'occurrences

Mille quatre cent soixante-dix-sept segments de textes de nos entretiens ont été codifiés. Après déduction des éléments non conservés pour l'étude (cf. Analyse des données), notre corpus d'étude contient mille trois cent trois segments de textes codifiés par les cent quarante unités de codage⁵ que nous avons définies et rassemblées en soixante-deux catégories (6 de niveau 1, 12 de niveau 2 et 44 de niveau 3).

Vingt-et-une unités de codage différentes (15 %) sont présentes uniquement dans un seul entretien, et quarante-cinq unités de codage différentes (32 %) sont présentes dans au moins la moitié des entretiens.

Trois unités de codage sont présentes dans tous les entretiens. Elles concernent les informations relatives à l'*Ouverture* des praticiens *aux nouvelles technologies dans leur*

⁵ Le codage de données pertinentes nécessite le choix de l'unité d'analyse, l'unité de codage. Les unités de codage employées ici sont des phrases issues du corpus.

pratique, les éléments descriptifs de leurs *Patients actuels*, et des éléments liés aux questions de *sécurité* de l'interface DEMA.

Tableau 14 Nombre de segments codifiés par entretien

Entretien n°	Nombre de segment codifiés
1	121
2	115
3	106
4	167
5	38
6	153
7	45
8	46
9	117
10	99
11	94
12	202

L'entretien qui contient le plus d'unité de codage en compte 202, celui qui en compte le moins, en compte 38 ; avec des répétitions d'unités de codage dans un même texte (voir le Tableau 14).

VI.3.1.2 Approche en utilisant les données brutes des unités de codages

Nous avons observé les fréquences d'apparition de toutes nos unités de codage identifiées à travers notre corpus d'études. Celles qui sont les plus fréquentes sont *Patients actuels* (3,2 % du corpus), *Difficultés de communication et d'interaction* (2,9 %), *sécurité* de l'interface DEMA (2,6 %), à l'*Ouverture aux IHM* (2,5 %), et *Manque de support technique et matériel* (2,2 %).

Les patients des professionnels de santé interrogés sont sensiblement proches : c'est-à-dire des personnes, enfants ou adultes, avec Trouble du Spectre de l'Autisme plutôt de bas niveau de fonctionnement.

Ainsi, on observe que des traits d'autisme sévère sont très fortement mentionnés tels que *Difficultés de communication et d'interaction* des patients avec TSA (2,9 %), *Troubles du comportement* (1,6 %) et *Particularités sensorielles* (1,3 %). Ces difficultés sont respectivement mentionnées dans neuf, dix et huit entretiens sur douze.

Des traits plus généraux de la population avec Trouble du Spectre de l'Autisme sont également mentionnée tels que *Hétérogénéité* (2 %) et le *Besoin d'adaptation du praticien au*

patient (2,1 %) car ce sont les *Patients avec TSA qui mènent, décident de l'interaction et de l'activité* (2 %). Ces unités de codages sont respectivement mentionnées dans onze, neuf et sept entretiens sur douze.

Ainsi notre panel est cohérent et homogène ; et les réponses fournies sont riches et diversifiées.

VI.3.2 Analyse catégorielle

Nous avons regroupé les différentes unités de codage en 62 catégories définies dans la section Analyses des données. Le Tableau 15 présente notre arborescence de catégories ainsi que leurs représentativités (en pourcentage).

Tableau 15 Détails des catégories en termes de pourcentage d'unité de codage et de segments de texte.

Catégorie niveau 1	Catégorie niveau 2	Catégorie niveau 3	Pourcentage d'unité de codage par rapport au total des unités de codage de la catégorie de niveau 2	Pourcentage d'unité de codage par rapport au total codage du corpus
Pratique	Activités	Activités motrices	2,11	2,07
		Activités de socialisation	20,54	1,77
		Activités cognitives	21,43	1,84
		Activités à bases sensorielles	7,14	0,61
		Examens cliniques	20,54	1,77
		Observations	6,25	0,54
		Total	100	8,60
	Conditions de travail	Collaborations avec les collègues et partage d'informations	100	4,53
	Outils	Renforceurs (dont alimentaires)	48,65	1,38
		Rituels	51,35	1,46
		Total	100	2,84
	Besoins	Adaptation du professionnel au patient	66,95	6,06
		Manque de support matériel et technique	27,97	2,53
		Manque de temps pour les patients	5,08	0,46
		Total	100	9,06
	Besoins pour le travail avec les TSA	Instaurer la notion de plaisir	19,23	0,38
		IHM pour entrer en relation avec les patients avec TSA	23,08	0,46
		IHM plus adaptable aux différents patients	57,59	1,15
		Total	100	2
Attitude envers les nouveaux moyens de prise en charge des patients	Conciliation entre IHM et Pratique	Activité sur Tablette et Ordinateur	70,59	1,84
		Activité Robot Nao	14,71	0,38

		Activité Objets Vibrants	14,71	0,38
		Total	100	2,61
	Ouverture à l'utilisation des IHM	Ouvert à tester des IHM	60,00	2,53
		Idées d'IHM et d'utilisation dans leurs pratiques	40,00	1,69
		Total	100	4,22
	Non conciliation des IHM et de leurs pratiques	Manque de compétence	15,79	0,46
		Inquiétude de dépendance aux écrans	13,16	0,38
		Réfractaires	71,05	2,07
		Total	100	2,92
	Attitude envers l'interface DEMA		Approche à la fois motrice et sensorielle	6,08
Sa polyvalence en termes de tâche et de patients			34,01	11,59
Ludique et Attirante			7,88	2,69
Technologique –industrielle et volumineuse			5,18	1,77
Sécurité			11,49	3,91
Joystick interchangeable			6,31	2,15
Nécessite un petit temps d'adaptation			2,70	0,92
Ajout de stimulations sensorielles variées (vibrotactile, textures, écran, son)			12,61	4,30
Caractéristiques du logiciel complémentaire de l'interface DEMA			13,74	4,68
Total		100	34,08	
Usages Potentiels de l'interface DEMA	Activités potentielles	Activités graphique (dessin-écriture)	24,79	2,30
		Activités motrices (retour de force, exploration/gestion de l'espace)	58,68	5,45
		Socialisation	11,57	1,07
		Activités de discrimination sensorielles	4,96	0,46
		Total	100	9,29
Patients TSA	Caractéristiques des patients		100	3,61
	Difficultés syndrome	Hétérogénéité	15,66	2
		Auto et hétéro agressivité	15,66	2
		Troubles de la communication et des interactions	22,89	2,92
		Particularités sensorielles (dont tactiles)	22,89	2,92
		Trouble de l'attention	7,83	1
		Intérêts restreints	8,43	1,07
		Angoisse/ Anxiété	6,63	0,84
		Total	100	12,74

	IHM utilisées par les patients	Utilisation tablette par des patients avant la prise en charge	100	0,69
Profils potentiels des patients utilisant l'interface DEMA			100	2,84
Total				100 %

Dans les paragraphes suivant les pourcentages mentionnés correspondent au pourcentage par rapport au total des unités de codages de la catégorie supérieure.

La pratique

Il ressort de l'analyse en détail de chaque entretien que les participants pratiquent des activités variées avec leurs patients telles que des activités motrices (**24,11 %**), des activités de socialisation (**20,54 %**), des activités cognitives (**21,43 %**), des activités à base sensorielle (**7,14 %**), des examens cliniques (**20,54 %**) et quelques de observations (**6,25 %**).

Les professionnels de santé ayant participé à notre étude travaillent en équipe pluridisciplinaire (**15,28 %**). Cet aspect de leur travail est important au vu de sa représentation dans le corpus.

Pour réaliser leurs pratiques, **48,65 %** d'entre eux indiquent avoir recours à des renforçateurs positifs tels que des aliments, des applaudissements, un accès à un jeu que le patient aime. Ils emploient également des rituels (**51,35 %**) notamment pour canaliser l'attention des patients. Les professionnels de santé présentent différents besoins de manière générale vis-à-vis de leur pratique, principalement d'adaptation au patient (**66,95 %**). Dans l'adaptation de leurs activités et de leurs matériels, les professionnels de santé indiquent un certain manque de soutien technique et matériel (**27,97 %**), par exemple pour la réalisation d'objets connectés ou l'achat de tablette.

Les difficultés d'attention, d'angoisse, de communication et d'interaction liées à l'autisme incitent, les professionnels de santé à instaurer un certain plaisir (**19,23 %**) pour le patient dans sa relation avec eux. Le jeu, la satisfaction d'avoir réussi, de faire ce qui plaît au patient est un point important de la mise en place d'une prise en charge d'une personne avec TSA. Ce type de relation est probablement plus présent chez les professionnels réalisant des interventions quotidiennes avec des patients avec TSA, mais ces professionnels étaient peu nombreux dans nos participants. Les professionnels de santé manifestent un certain intérêt pour l'utilisation des IHM avec les patients TSA notamment pour rentrer en relation (**23,08 %**), souvent par le jeu, avec eux. De même, les professionnels de santé considèrent que les IHM

sont facilement adaptables aux différents patients (**57,59 %**) que ce soit en termes de syndrome, de compétences sensori-motrice ou d'activités réalisables facilement.

Attitude envers les nouveaux moyens de prise en charge des patients

Parmi les outils, des IHM et des nouvelles technologies tels que des tablettes et des ordinateurs (**70,59 %**), le robot Nao (**14,71 %**) ou des objets vibrants (**14,71 %**) sont déjà employés par les professionnels de santé ou d'autres membres de leur service.

60 % des participants expriment des attitudes positives vis-à-vis de l'utilisation des IHM dans leurs pratiques. Aussi, **40 %** mentionnent des projets ou des idées d'utilisations qui sont souvent abandonnées ou non entamées par faute de moyen.

Certains ne voient pas de conciliation, à l'heure actuelle, entre les IHM et leurs pratiques notamment par manque de compétence (**15,79 %**), une inquiétude vis-à-vis de la dépendance des patients aux écrans (**13,16 %**) ou parce que leurs appétences personnelles va à l'encontre des nouvelles technologies ou qu'ils n'ont pas pensé à les utiliser (**71,05 %**).

Attitude envers l'interface DEMA

Parmi les points positifs énoncés par les professionnels de santé, on trouve la polyvalence en termes de tâches possibles et de patients auxquels elle peut être proposée (**34,01 %** de la catégorie mais surtout **10,22 %** du corpus). En effet, étant donné les fortes variabilités interindividuelles des patients et le peu de moyens, un outil polyvalent intéresse fortement les professionnels de santé, notamment si l'on rajoute des stimulations sensorielles variées (**12,61 %**) et que l'on prend en compte son joystick interchangeable (**6,31 %**). Ils valorisent son approche à la fois motrice et sensorielle (**6,08 %**) mais surtout, elle leur paraît ludique et attirante (**7,88 %**).

Toutefois des inquiétudes sont relevées concernant l'interface DEMA, notamment sont aspect volumineux (**5,18 %**). Il faut néanmoins relativiser cet avis car pour certains participants, il s'agissait d'un point positif. En effet, l'interface DEMA permettrait selon eux de canaliser des grands mouvements de bras des patients ayant des troubles psychomoteurs. Les questions de sécurité (**11,49 %**) ont également été mentionnées (exemple : rajouter des protections sur certains mécanismes apparents, fixer l'interface au sol ou sur un support plus conséquent). Aussi, les participants ont mentionné des risques de destruction du fait de la curiosité des patients ou à cause de troubles du comportement. Il a également été relevé la nécessité d'un petit temps d'adaptation (**2,70 %**).

Globalement les professionnels de santé ont une attitude positive et accueillante de l'interface DEMA (si on fait la somme de la représentativité des éléments positifs de l'interface sur le corpus).

Usages Potentiels de l'interface DEMA

Les professionnels de santé interrogés indiquent qu'ils utiliseraient l'interface DEMA pour des activités majoritairement motrices (**58,68 %** de la catégorie et **4,80 %** du corpus) telles que l'exploration de l'espace de travail. Ce type d'usage, tels que des jeux de réflexes, d'adresse et de canalisation des mouvements ; s'inscrit comme une première approche consistant à stimuler les compétences motrices de l'utilisateur via l'interface DEMA. Dans un second temps, les usages de l'interface peuvent évoluer en ajoutant des stimulations sensorielles adaptées comme par exemple du retour de force « artisanal », c'est-à-dire en mettant directement des objets dans l'espace de travail et en utilisant le joystick pour les pousser vers un bord ; aboutissant ainsi à une approche globale sensori-motrice. D'autre part, des activités de graphie telles que le dessin ou l'écriture (**24,79 %**), des activités de socialisations type « tour de rôle » (**11,57 %**) ou des activités de discriminations sensorielles (**4,96 %**) sont proposées.

Patients TSA

Les professionnels de santé interrogés nous ont décrit leurs patients actuels (**21,17 %** de la catégorie et **3,18 %** du corpus) soit en termes de caractéristiques cliniques, soit en termes de tranche d'âge, soit en termes de nombre. Ils mentionnent également que certains patients utilisaient déjà des tablettes avant qu'ils ne les prennent en charge (**5,16 %**), notamment comme moyen de communication alternatif.

Parmi les difficultés liées aux symptômes mentionnées par les professionnels de santé, les troubles de la communication et des interactions ainsi que les particularités sensorielles sont les plus mentionnées (**21,47 %**). S'en suivent les troubles du comportement tels que l'auto et l'hétéro agressivité (**14,86 %**). Il est à noter que la patientèle des professionnels de santé interrogés est constituée de cas sévères qui sont souvent accueillis à l'hôpital dans des périodes où leurs proches ne parviennent plus à s'en occuper. L'hétérogénéité du syndrome (**14,86 %**) est également prononcée et rajoute à la complexité de la prise en charge de ces patients.

Profils potentiels des patients utilisant l'interface DEMA

Cette interface pourrait être utilisable en l'état, et à plus long termes après quelques améliorations, avec plusieurs profils de patients avec TSA mais pas uniquement. Par exemple,

elle pourrait être utilisée par des populations déficientes intellectuelles non verbales sans autisme ou des personnes ayant eu des accidents vasculaires cérébraux.

VI.3.3 Analyse par groupe Métier

Nous avons regroupé ces entretiens en fonction des spécialités Métiers. Nous avons pu distinguer trois groupes : le groupe « Médecins » toutes spécialités confondues, le groupe « Psychomotriciennes » et le groupe « Autres » incluant l'ergothérapeute, l'orthophoniste, l'éducatrice spécialisée et la psychologue. Ainsi le groupe « Médecins » représente cinq participantes, le groupe « Psychomotriciennes » en compte trois et le groupe « Autres » en contient quatre.

Nous avons observé que la répartition du nombre de segments codifiés pour les entretiens du groupe « Médecins » est de 346 segments de textes (26,5 %), pour le groupe « Psychomotriciennes » il est de 377 (29 %), et enfin les entretiens de groupe « Autres » contiennent 580 segments de textes (44,5 %).

Grâce à cette distinction Métier nous avons établi la Figure 29 qui montre les 20 unités de codage les plus fréquentes en fonction des groupes Métier.

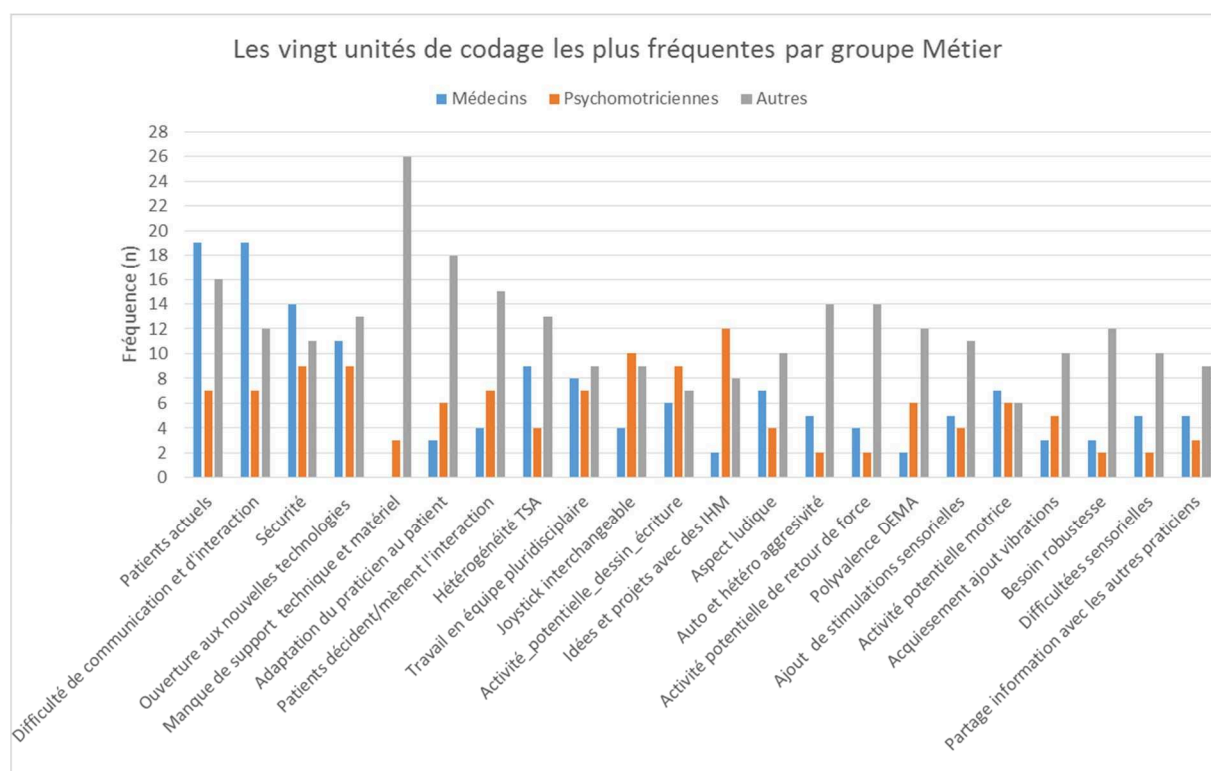


Figure 29 Fréquence des vingt unités de codage les plus utilisées par groupe Métier.

Nous observons que les informations sur *Patients actuels* (n=19) et *Difficultés de communication et d'interaction* (n=19) sont les plus mentionnées par le groupe « Médecins ». Les médecins, pratiquant majoritairement des auscultations (palpations, interactions tactiles) et des entretiens (interactions orales) afin d'établir le diagnostic ainsi que le programme de suivi des patients, sont directement confrontés à différents types de problèmes de communication avec les patients atteints de TSA. Par exemple, il est difficile de comprendre les douleurs, le sens des actions, ou même ausculter un patient si celui-ci ne peut s'exprimer et mettre des mots sur leurs sensations. Certains bilans nécessitent de faire intervenir les parents des patients atteints de TSA pour aider à leur évaluation (cf. Chapitre 2), pour comprendre ce qui se passe au niveau viscéral, musculaire ou émotionnel. L'absence de communication directe avec le patient pose souvent de réels problèmes.

Le *Joystick interchangeable* (n=10) et les *Idées et projet avec des IHM* (n=12) sont les éléments les plus codifiés dans le groupe « Psychomotriciennes ». Le *Joystick interchangeable* concerne la possibilité de créer un joystick par impression 3D, permettant ainsi différents types de forme et de prise en main. Cette possibilité est intéressante pour travailler la préhension, la précision et la motricité fine avec des patients de tous niveaux.

D'autre part, le groupe « Psychomotriciennes » présente plus d'occurrences du code *Idées d'IHM et d'utilisation dans leurs pratiques* que les autres groupes. Les entretiens suggèrent qu'elles se sont appropriées mentalement différentes IHM, et en particulier celle qui leur était présentée. Elles ont évoqué des cas d'utilisations et des activités réalisables avec leurs patients.

Pour le groupe « Autres », ce sont le *Manque de support matériel et technique* (n=26) et l'*Adaptation du professionnel au patient* (n=18) qui sont les plus mentionnées. Le groupe « Autres » est composé d'une orthophoniste, d'une ergothérapeute, d'une éducatrice spécialisée et d'une psychologue. Elles sont quotidiennement au contact des patients avec TSA, et elles cherchent en permanence les moyens de motiver les patients sur différentes activités. Elles indiquent que bien souvent les outils disponibles dans le commerce ne sont pas adaptés à leurs populations et qu'elles ont besoin de construire des supports et/ou des outils mais qu'elles n'ont pas forcément accès aux matériaux nécessaires, aux outils ou à un lieu de fabrication, n'ont pas toujours les compétences techniques nécessaires, ni le budget.

Nous retenons de cette analyse que les professionnels de santé ont des réflexions différentes: pour les Médecins les aspects de communication et d'interaction avec les patients

sont prépondérants ; pour les Psychomotriciennes il s'agit plus de déterminer comment intégrer les nouvelles technologies et les IHM dans leurs pratiques avec les patients ayant un TSA ; enfin, pour le groupe « Autres » les besoins en supports techniques et matériels sont prépondérants et ils ont déjà des idées d'applications et de tâches.

VI.4 Conclusion

Les nouvelles technologies et notamment les IHM sont déjà ponctuellement présentes dans les hôpitaux et dans certaines activités des patients avec TSA. A l'issue de notre analyse, nous observons que les professionnels de santé, tels que les psychomotriciennes ou les éducatrices spécialisées, emploient déjà des interfaces hommes-machines. Toutefois, leurs utilisations restent limitées par manque de matériel, de soutien technique, et parfois, de formation. Néanmoins, tous les professionnels de santé interrogés sont ouverts à l'utilisation des interfaces hommes-machines et prêts à tester de nouveaux supports. Ceux qui pouvaient être réticent pour raisons personnelles, reconnaissent des bénéfices potentiels si leurs utilisations restent ponctuelles et complémentaires de la pratique actuelle. Ils observent également que c'est un moyen indirect pour interagir avec les patients et que, par ailleurs, ceux-ci n'y sont pas hostiles en général.

Notre interface DEMA est largement bien accueillie par les professionnels de santé, qui toutes spécialités confondues, y voient des bénéfices et des intérêts pour leurs pratiques et/ou leurs patients. De même, une variété de tâches est proposée avec notre interface en l'état ou avec quelques améliorations. Enfin, elle semble pertinente pour des patients avec TSA mais également pour d'autres pathologies. Elle est ludique, facile d'utilisation et adaptable à chacun. Toutefois, il reste un certain travail d'intégration à accomplir pour permettre son utilisation au plus grand nombre

De plus, notre interface paraît pertinente pour des tâches liées à la motricité, à l'exploration, répondant ainsi à une partie des problématiques des professionnels de santé. En effet, l'interface DEMA pourrait être un moyen d'amorcer la relation et l'interaction avec les professionnels de santé, mais elle paraît peu utilisable pour des tâches de communication et d'interaction Humain-Humain. Egalement, elle pourrait permettre une exploration plus rapide et simplifier des préférences sensorielles et motrices des participants mais ne donnerait pas d'informations physiologiques sur l'état de celui-ci lors des stimulations. Or, dans

l'établissement des profils des participants, cela semble complémentaire. Ainsi, notre interface est pertinente mais principalement pour des tâches à buts moteurs et sensoriels, laissant de côté tout un pan fondamental des problématiques des TSA, la communication et l'interaction.

A travers ces témoignages, nous observons que les besoins et les attentes des différents professionnels de santé orientent vers la conception d'une interface très modulaire et adaptable. En l'état actuel, notre prototype semble intéresser les professionnels de santé dans des tâches de graphie ou de coloriage. Les besoins d'intégration tels que masquer les câbles, rajouter de couleurs ou un cache de protection intermédiaire dépendent des profils des utilisateurs avec TSA potentiels.

VII. Simon Tactile et Simon Social Tactile

VII.1 Introduction

Nous souhaitons développer de nouvelles interfaces homme-machines à destination de personnes ayant des difficultés de communication sociale et des déficiences intellectuelles. En effet, l'industrie des jeux vidéo et des nouvelles technologies proposent peu d'interfaces adaptées pour cette population. Etant donné l'importance que prend ce mode de divertissement dans nos sociétés, ces personnes se retrouvent ainsi en situation de manque potentiel d'opportunité d'intégration sociale. Notre but est de leur proposer de nouveaux types de jeux qui soient également l'occasion de participer à des activités sociales. Ces jeux ayant un but d'inclusion sociale, ils doivent aussi avoir un intérêt pour les personnes au développement typique.

Les interfaces tactiles sont plébiscitées comme moyen pour gérer la communication entre plusieurs utilisateurs d'une même interface (Karon E. MacLean, 2008b). Par exemple, des chercheurs se sont intéressés à la conception de périphériques tactiles pour aider les utilisateurs à réguler leurs tours de rôle (Chan, MacLean, & McGrenere, 2008) ou pour communiquer en utilisant des gestes (Heikkinen et al., 2009). Comme illustré dans l'état de l'art sur les interfaces haptiques et tactiles pour l'autisme, les projets dans le domaine sont très hétérogènes et balbutiants. Avant de se lancer dans un développement d'interfaces tactiles pour stimuler la collaboration avec des personnes avec autisme, il semblait intéressant de se pencher sur les mécanismes fondamentaux à l'œuvre dans l'action conjointe et de les étudier spécifiquement dans le domaine tactile.

Les actions conduites conjointement par deux personnes ou plus sont l'objet d'intenses débats dans le domaine des sciences cognitives. Gallotti et Frith (2013) avancent l'idée de l'existence d'un mode de fonctionnement spécifique, qu'ils appellent le « we-mode » (p. 160), et qui se manifesterait spécifiquement lorsque plusieurs individus effectuent des actions collaboratives. Ces auteurs considèrent que le « we-mode » est sous-tendu par notre tendance naturelle et spontanée à être influencé par les actions d'autrui.

Afin d'étudier ce facteur social dans les interactions hommes machines tactiles, nous sommes inspirés d'une expérience bien connue en psychologie cognitive : l'effet Simon Social (Sebanz, Knoblich, & Prinz, 2003a). Cet effet vise à observer l'influence d'un facteur

social sur un effet Simon. L'effet Simon (Simon & Wolf, 1963) est un effet de perturbation, un peu comme l'effet Stroop (Stroop, 1935) ou l'effet Eriksen (Eriksen, 1995). Il se manifeste par une augmentation des temps de réaction lorsque le participant doit répondre avec un membre (main ou pied) situé du côté opposé à celui où la stimulation apparaît et cela, bien que la position de la stimulation dans l'espace n'ait pas de lien avec le but de la tâche. Par exemple, dans la modalité visuelle, l'effet Simon consiste à placer un participant devant un écran où des cercles bleus ou verts apparaissent soit sur la partie gauche de l'écran, soit sur la partie droite (Hommel, Colzato, & van den Wildenberg, 2009). Puis, le participant doit répondre aussi vite que possible aux deux types de cibles de manière latéralisée, par exemple : appui sur une touche avec la main gauche pour le cercle vert et avec la main droite pour le cercle bleu. Les temps de réponses sont d'autant plus rapides que la cible apparaît du même côté que la main censée y répondre. En effet l'attention est stimulée par la position des cibles sur l'écran et crée ainsi un effet d'amorçage sur l'endroit où le participant doit répondre.

Inspiré de l'effet Simon, un effet complémentaire a été mis en évidence dans le domaine social, il s'agit de l'effet Simon Social (Sebanz, Knoblich, & Prinz, 2003b). Lorsqu'on administre à un participant une consigne unique où il ne doit répondre qu'à un seul type de cible (ex : main droite pour le cercle bleu), l'interférence sur les temps de réponse disparaît. Par contre, si on place le participant à côté d'un partenaire qui doit répondre à l'autre cible (ex : main gauche pour le cercle vert), l'effet Simon réapparaît. Certains auteurs interprètent cela comme une tendance automatique à être influencé par l'action d'autrui. Les études ont montré que l'effet Simon social dépendait du degré d'interdépendance perçu entre les partenaires (Colzato, de Bruijn, & Hommel, 2012; Iani, Anelli, Nicoletti, Arcuri, & Rubichi, 2011; Ruys & Aarts, 2010). L'effet s'accroît lorsque le partenaire est considéré amical et coopératif par le participant, en comparaison à un partenaire intimidant et compétitif (Hommel, Colzato, & van den Wildenberg, 2009; Iani et al., 2011). L'effet Simon social a été classiquement expliqué par notre tendance spontanée à nous représenter les actions d'autrui en les simulant dans notre propre système sensori-moteur (Sebanz et al., 2003b; Sebanz, Knoblich, Prinz, & Wascher, 2006). Néanmoins, des hypothèses alternatives plus récentes mettent en exergue l'agencement spatial des partenaires par rapport aux stimuli (Dittrich, Dolk, Rothe-Wulf, Klauer, & Prinz, 2013; Dittrich, Rothe, & Klauer, 2012; Guagnano, Rusconi, & Umiltà, 2010) et les perturbations attentionnelles causées par les actions du partenaire (Dolk, Hommel, Prinz, & Liepelt, 2013; Klempova & Liepelt, 2016). Bien qu'il existe plusieurs cadres théoriques permettant de rendre compte de l'effet Simon social, celui-ci a été reproduit de manière robuste

dans divers conditions expérimentales et a été utilisé dans de multiples études pour examiner les réseaux neuronaux associés avec l'action conjointe (Costantini et al., 2013; de la Asuncion, Docx, Morrens, Sabbe, & de Bruijn, 2015; Dolk, Liepelt, Villringer, Prinz, & Ragert, 2012; Sebanz et al., 2006; Sebanz, Rebbechi, Knoblich, Prinz, & Frith, 2007; Tsai, Kuo, Hung, & Tzeng, 2008). Pour autant, à notre connaissance, jusqu'à présent, cet effet a été principalement étudié pour des stimulations visuelles et auditives, mais jamais dans la modalité tactile.

Un nombre restreint d'études ont expérimenté l'effet Simon standard dans la modalité tactile et leurs résultats étaient unanimes à confirmer l'effet d'interférence escompté (Hasbroucq & Guiard, 1992; Medina, McCloskey, Coslett, & Rapp, 2014; Salzer, Aisenberg, Oron-Gilad, & Henik, 2014a). Dans l'expérience de Hasbroucq et Guiard (1992), les participants recevaient des tapotements mécaniques sur les index et pouces des deux mains et répondaient plus rapidement avec la main sur laquelle le tapotement avait été appliqué. Medina, McCloskey, Coslett et Rapp (2014) utilisaient des stimulations vibrotactiles sur le majeur de chaque main et les participants devaient répondre en relâchant des pédales positionnées sous leurs pieds. Ces derniers répondaient plus rapidement lorsque le doigt percevant la stimulation était congruent, au sens somatotopique, avec le pied relâchant la pédale. Salzer, Aisenberg, Oron-Gilad et Henik (2014b) appliquaient des stimuli vibrotactiles sur les parties droite et gauche du torse. Ces auteurs ont à nouveau observé une interférence lorsque les participants devaient répondre avec la main opposée au côté où la stimulation avait été perçue.

Dans l'expérience présentée ci-après, les participants recevaient des stimulations vibrotactiles sur les extrémités de leurs index et devaient répondre en appuyant sur des pédales avec leurs pieds. Le protocole suivait un plan expérimental classiquement utilisé pour démontrer l'effet Simon social qui consiste à comparer trois tâches : (1) Une tâche « Simon standard » où les participants recevaient deux stimuli tactiles distincts sur leurs index et devaient répondre avec leurs pieds ; (2) Une tâche dite « go/nogo individuel » où les participants recevaient les mêmes stimuli que dans la tâche de Simon standard, mais où ils ne devaient répondre qu'à un seul des deux stimuli ; (3) Une tâche dite « go/nogo social » où les participants réalisaient la même tâche qu'en situation de « go/nogo individuel », mais avec un partenaire assis à côté d'eux qui répondait au stimulus auquel les participants ne devaient pas répondre. L'hypothèse était qu'un effet de congruence sur les temps de réponse entre le côté où était appliqué le stimulus et le pied utilisé pour répondre serait observé dans les tâches « Simon standard » et « go/nogo social », mais pas dans la tâche « go/nogo individuel ». La tâche

« go/nogo social » a été répétée dans deux blocs successifs pour examiner si l'effet Simon social escompté était susceptible de diminuer avec le temps.

Le but à terme de ce travail consiste à mieux comprendre comment les stimulations tactiles pourraient être utilisées dans le cadre du développement d'interfaces humain-machine pour faciliter les tâches collaboratives avec des personnes avec autisme. Comme préalable, le protocole expérimental présenté dans ce chapitre consistait à tester chez les personnes typiques, si les mécanismes basiques sous-tendant la collaboration multi-utilisateur étaient aussi effectifs dans la modalité tactile qu'ils l'étaient dans les modalités visuelle ou auditive. Néanmoins, afin de collecter des données permettant d'élaborer des hypothèses spécifiques pour l'autisme, les participants remplissaient le questionnaire de Quotient Autistique (AQ : Autism-Spectrum Quotient) (Baron-Cohen, Wheelwright, Skinner, Martin, & Clubley, 2001), qui évalue les traits associés au spectre d'autisme dans la population générale. Ce questionnaire fournissait une métrique qu'il était prévu de corrélérer avec l'amplitude de l'effet d'interférence escompté dans la tâche « go/nogo social ». Bien qu'une précédente étude n'ait pas trouvé d'altération de l'effet Simon social dans l'autisme (Sebanz, Knoblich, Stumpf, & Prinz, 2005), au vu des difficultés sociales liées au syndrome, l'hypothèse expérimentale était celle d'une corrélation négative entre l'amplitude de l'effet Simon social et l'intensité des traits autistiques chez les participants typiques.

En objectif secondaire, l'influence de l'amplitude des vibrations tactiles a été analysée dans la tâche « Simon standard » afin de caractériser le type d'actionneurs utilisés. Il était attendu que le stimulus de plus grande amplitude serait détecté plus rapidement. Par ailleurs, il a été préalablement montré que la congruence ou incongruence entre stimulus et réponse lors d'un essai donné influence le temps de réponse de l'essai suivant (Hommel, Proctor, & Vu, 2004). Aussi, à titre exploratoire, cette étude inclut également des analyses des séquences de paires d'essais successifs afin d'observer l'influence de l'amplitude et de la congruence lors d'un essai sur les temps de réponse à l'essai suivant.

En résumé, les hypothèses ci-dessous ont été considérées :

Hypothèses sur l'influence du partenaire :

- 1) Effet Simon social : Les performances lors des essais congruents seraient supérieures à celles des essais incongruents dans les tâches « Simon standard » et « go/nogo social », mais pas dans la tâche « go/nogo individuel ».

- 2) Diminution de l'effet Simon social avec l'entraînement : La différence entre temps de réponse dans les essais congruents et incongruents diminuerait lors du deuxième bloc de la tâche « go/nogo social ».
- 3) Corrélation avec les traits autistiques : La différence en temps de réponse entre les essais incongruents et congruents dans la tâche « go/nogo social » serait corrélée avec la mesure de quotient autistique (AQ).

Hypothèses sur l'effet Simon standard :

- 1) Effet de l'amplitude : Les performances en réponse au stimulus fort seraient supérieures à celles du stimulus faible.
- 2) Effet de l'essai précédent : Les performances lors d'un essai donné seraient influencées par la congruence/incongruence et l'amplitude de l'essai précédent.

Dans un premier temps nous expliquons toute la conception technique de l'expérience, puis nous détaillons le protocole expérimental. Nous finissons en explicitant les résultats obtenus et discutons leurs implications.

VII.2 Conception et développement mécatronique

Le protocole de l'effet Simon Social est très étudié et standardisé dans le domaine visuel, au point que des solutions commerciales et open source permettent de redéployer ce protocole. Toutefois, l'expérience n'ayant pas été, à notre connaissance, réalisée dans la modalité tactile, pour la partie sociale, nous avons dû réaliser un développement technologique en conséquence. Nous en présentons les principaux éléments mécatroniques dans la section suivante.

VII.2.1 Cahier des charges

La réalisation de cette expérience repose sur trois éléments principaux : la stimulation, la réponse, et le temps. Une stimulation adéquate, perceptible et différenciable. Une réponse du participant claire et identifiable. Une mesure du temps précise et synchronisée.

Au travers de la littérature l'adaptation tactile technique de ce protocole n'est pas uniforme. En effet, Hasbroucq et Guiard (Hasbroucq & Guiard, 1992) ont utilisé des stimulations mécaniques, sur les extrémités des doigts des participants, avec des intensités de stimulation variant de 0,6 N et 0,2 N. La réponse des participants était enregistrée via la pression de boutons pressoir participants. Le temps milliseconde était mesuré par un

chronomètre. Salzer et al (Salzer et al., 2014a), ont employé des actionneurs vibrants positionnés sur le dos des participants fixés à l'aide de bandes élastiques. La fréquence des vibrations est de 250 Hz avec un temps d'exposition de 500 ms soit de manière continue ou soit en pulse de 50 ms.

Medina et al ont également utilisé des actionneurs vibrants attachés sur le côté palmaire du segment distal de chaque majeur des mains de leurs participants, Le stimulus, avec deux niveaux d'intensité, correspond à une vibration forte de 250 ms à 250 Hz à 40 dB au-dessus du seuil de détection typique. Quant au stimulus faible, il s'agissait d'une vibration de 250 ms à 250 Hz à 25 dB au-dessus du seuil de détection typique. Les réponses ont été enregistrées à l'aide de pédales avec une collecte des données quand ceux-ci les relâchaient.

Notre mise en place de ce protocole a eu deux visées. La première, de l'employer chez les typiques pour expérimenter le protocole et identifier des premiers résultats. La seconde, de la déployer sur une population atteinte de TSA, si les résultats obtenus sur la première population confirment nos hypothèses. Les vibrations étant couramment utilisées avec des bons résultats chez les personnes avec autisme nous avons choisi d'utiliser des actionneurs vibrants. Pour des raisons de taille, robustesse, coût et de capacité à découpler la fréquence de résonance de l'amplitude nous avons choisi de travailler avec des actionneurs résonnants linéaires de Precision MicroDrive. Une section dédiée est consacrée à la caractérisation des actionneurs sélectionnés. Ainsi notre cahier des charges pour la réalisation mécatronique de cette expérience se résume à : fournir des stimulations vibrantes, distinguables, avec des actionneurs fiables ; et également à enregistrer les réponses des participants de manière fiable et robuste. De plus, il nous faut un système d'affichage synchrone avec les stimulations et les réponses des participants ainsi qu'une mesure du temps de réponse optimale.

En effet, le participant va recevoir une stimulation vibrotactile sur un de ses deux index, il doit identifier cette stimulation comme étant de faible ou de forte intensité, et répondre le plus rapidement possible sur la pédale correspondant à l'intensité de la stimulation (cf. VII.3.3 pour plus de détails).

Les actionneurs employés ont besoin d'une alimentation 5V et une amplitude entre 1 et 3 V pour pouvoir fonctionner. Nous avons choisi d'employer des pédales d'arrêt d'urgence en raison de leur finesse de détection et résilience mécanique à l'usage pour enregistrer les réponses des participants. D'autre part, il a fallu développer une interface utilisateur affichant

les éléments visuels de notre protocole tels qu'une croix blanche sur fond noir, servant de point de fixation du regard et de l'attention en début d'essai (cf. Figure 38 déroulement d'un essai) ou encore les messages visuels (« bonne réponse » ou « mauvaise réponse ») de retours aux participants. L'envoi et la réception des signaux des LRA ainsi que de pédale d'arrêt d'urgence, de même que l'affichage visuel ont été synchronisés et gérés par un programme informatique que nous avons développé, expressément, pour notre expérience.

VII.2.2 Architecture générale

Ce programme général, a eu pour tâche de faire l'interface entre les différents éléments susmentionnés de notre expérience, de générer aléatoirement la succession de paires de type de stimulus et localisation du stimulus, et ceci par essai et par participant. Il a également eu pour tâche de vérifier la concordance avec la réponse du participant, d'enregistrer les temps de réponse et le nombre d'erreurs. Ce programme a été réalisé en python 3.5 et avec la librairie Thread. Nous avons utilisé la librairie Pygame pour développer l'affichage visuel. Les signaux activant les actionneurs vibrants et indiquant l'utilisation des pédales de réponses ont été traités avec les cartes d'acquisitions National Instrument à l'aide de scripts en python. La Figure 30 présente l'architecture mécatronique de notre setup expérimentale. La Figure 31 représente une version simplifiée du diagramme d'action séquentiel de notre setup lors de l'expérience Simon Social, pour un participant. Nous avons également développé une interface graphique pour optimiser les passations de l'expérience. Ainsi la génération aléatoire de la séquence de signaux, la position de stimulation, la sauvegarde des données par participant, par essai, leurs temps de réponses et pédales de réponses sont directement contrôlés par cette interface.

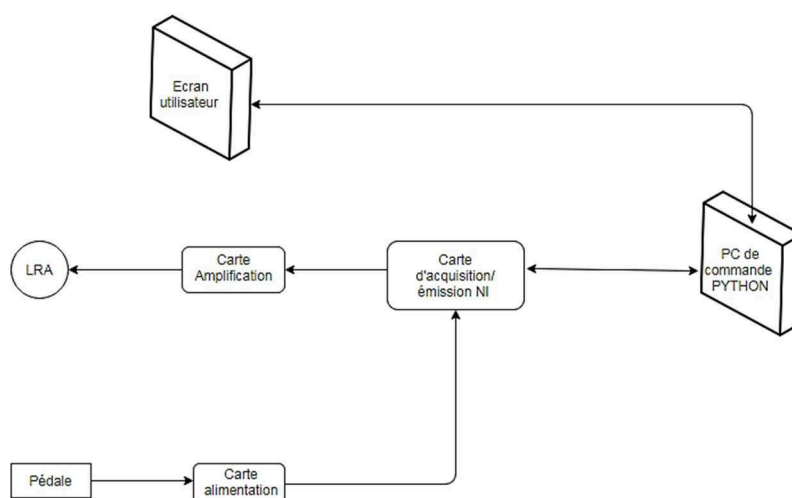


Figure 30 Schéma bloc de l'interface Simon Social

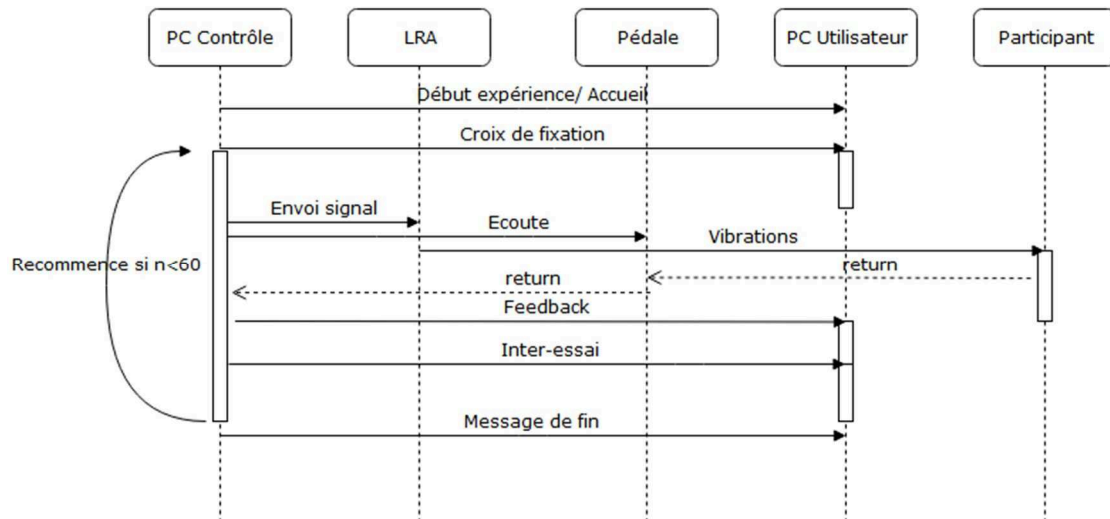


Figure 31 Diagramme d'action séquentiel du système

VII.2.3 Démonstrateur final

- **LRA et Amplification signal**

Pour pouvoir concevoir une interface à retour tactile, il nous a fallu déterminer un retour mécanique adapté. Pour différentes raisons mentionnées ci-dessus, nous avons choisi un retour vibrant. Il existe plusieurs actionneurs vibrants ou moteurs vibrants, dans le commerce. Nous distinguons, notamment les Eccentric Mass Rotative(ERM), les Linear Resonant Actuators (LRA) ou les moteurs piézoélectriques. La Figure 32 présente la composition des ERM. Le Tableau 16 est un tableau comparatif des propriétés des actionneurs vibrants les plus commercialisés et utilisés.

La Figure 33 présente la composition d'un LRA et la Figure 34 présente le principe des actionneurs piézoélectriques. Au vu de notre cahier des charges précédemment explicité, les actionneurs résonants linéaires nous ont semblé les plus adaptés : en effet, le découplage entre la fréquence et l'amplitude nous a paru pertinent pour réaliser deux stimulations tactiles nettement distinguables avec un actionneur à temps de réponse rapide, synchronisable et compact.

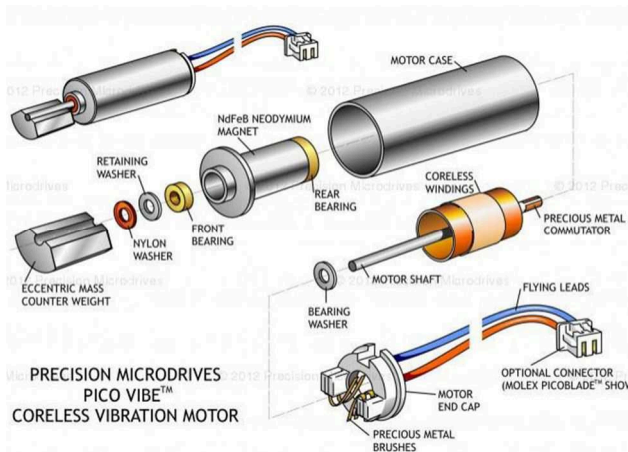


Figure 32 Schéma des ERM,
Source : [Precision MicroDrive]

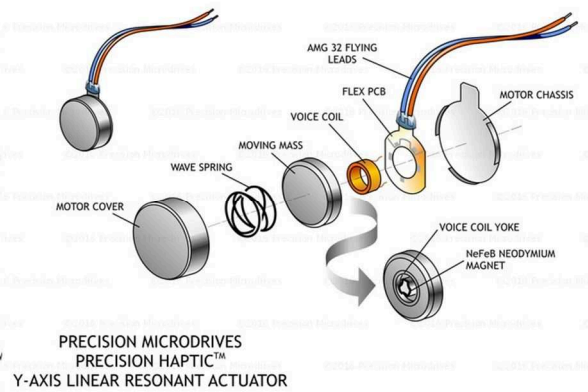


Figure 33 Schéma d'un LRA
Source : [Precision MicroDrive]

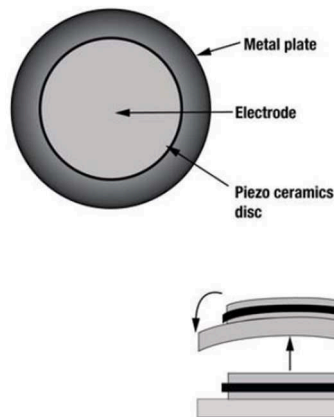


Figure 34 Schéma d'un actionneur piézoélectrique
Source : [Precision MicroDrive]

Les LRA sont alimentés par un signal sinusoïdal. Afin d'avoir un meilleur rendu, nous avons introduit une amplification de notre signal. Afin de protéger nos cartes de puissance, d'optimiser notre expérience Simon Social Tactile, en la rendant facilement déplaçable et rapide à mettre en place, nous avons réalisé des carters de protection, choisi une alimentation de carte par voie USB et utilisé des connecteurs rapides.

Tableau 16 Tableau comparatif des actionneurs vibrants

Source : [Precision MicroDrive]

	ERM	LRA	PIEZO
Type de mouvement	Rotation	Linéaire	Linéaire
Facteur forme	Barre	Rondelle	Rondelle
Taille approximative	11 x 4,5 dia. mm	10 x 3,6 mm	3,5 x 3,5 x 42 mm
Alimentation électrique	130-160 mA RMS @3V	65 -70 mA RMS @3V	300 mA RMS @ 3V
Intervalle de fréquence	90-200Hz	150-200Hz, fréquence unique	150-300Hz
Temps de réponse	40-80 ms	20-30 ms	< 1 ms
Pros	<ul style="list-style-type: none"> - Vibrations forte, bon pour alertes - Ne requiert pas beaucoup d'électronique 	<ul style="list-style-type: none"> -Peut être utilisé sur un appareil multifonction : on peut synchroniser les retours audios et tactiles - Amplitude et fréquence peuvent être découplées - Forme compact et plate 	<ul style="list-style-type: none"> -Temps de réponse très rapide - Retour tactile de très bonne qualité
Cons	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de réponse lent, - Pas adaptés pour des retours de bonne qualité - Peu compact 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus rapide que les ERM - Vibrations moyennes - Fréquence de résonance fixe 	<ul style="list-style-type: none"> - Besoins d'une électronique de puissance sophistiquée et onéreuse

VII.2.3.1 Caractérisation mécanique des actionneurs (LRA)

Nous commencerons cette section en présentant le principe de fonctionnement des actionneurs LRA. Puis dans un second temps nous présenteront le protocole utilisé pour la caractérisation mécanique de ces actionneurs à l'aide d'un vibromètre. Le but de cette caractérisation est de déterminer les modèles analytiques des actionneurs LRA, qui mettent en relation le déplacement induit et le signal envoyé. Par la suite, nous présenterons les résultats obtenus et nous conclurons sur l'adaptation de ces actionneurs à notre cas d'application.

VII.2.3.1.1 Matériel

Afin de mesurer les déplacements induits par le signal envoyé à notre actionneur, nous avons employé le vibromètre laser qui utilise l'effet doppler pour quantifier la vitesse de

déplacement de la membrane supérieur de notre actionneur. L'intégration en position est calculée par le vibromètre.

Deux actionneurs LRA de la catégorie C10 de Precision MicroDrive ont été utilisés pour réaliser cette caractérisation mécanique.

VII.2.3.1.2 Protocole

Après avoir mis en route le vibromètre laser et nettoyé la surface de la plateforme de mesure, nous avons positionné un actionneur LRA C10 sous le faisceau laser en respectant la distance nécessaire pour l'utilisation du laser, comme indiqué dans le manuel d'utilisation. Nous avons réalisé des tests préliminaires pour vérifier les résultats observés et pour calibrer notre expérimentation. Puis nous avons effectué deux types de séries de mesures.

Notre expérience consistait à effectuer une variation d'amplitude A_0 du signal sinusoïdal envoyée à l'actionneur LRA pour une fréquence donnée. La variation d'amplitude A_0 était de 0 à 3 V par pas de 0,5 V. Nous avons répété cette mesure pour plusieurs fréquences d'excitation allant de 175 à 235 Hz par pas de 10 Hz.

Nous avons donc appliqué cette série de mesures sur deux actionneurs LRA identiques (l'un après l'autre) pour vérifier l'homogénéité de leurs caractéristiques. Nous les nommons C10-1 et C10-2.

Paramètres d'expérimentation et calibration

Nous avons employé les différents paramètres suivant lors de nos essais de calibration :

Fréquence d'échantillonnage, $f_{ech} = 10 \text{ kHz}$

Durée du sweep, $t_{sweep} = 1 \text{ sec}$; soit une précision de 1 Hz

Durée du sinus = 1 sec (tps d'enlever le mode transitoire)

Calibration : vitesse à 10 mm/s/V ; soit un déplacement à $1 \mu\text{m}$

N = le nombre d'échantillons

φ_r La phase de résonance

f la fréquence de résonance/fréquence excitée

Expérience : Fréquence de résonance fixée, envoi d'un signal sinus, variation de l'amplitude A_0 entre 0 et 5 V par pas de 0,5. Les fréquences observées vont de 175 à 235 Hz par pas de 10 Hz.

Notre signal d'entrée des LRA est défini comme suit :

$$N = t_{\text{sweep}} * f_{\text{ech}}$$

$$t = \frac{N}{f_{\text{ech}}}$$

$$\varphi_r = 2\pi f$$

$$A_0 \text{sig} = \frac{(A_0(1 + \sin(\varphi_r)))}{2} + 1,10 \text{ et } A_0 \text{sig}[-1] = 1,10 + \frac{A_0}{2}$$

Nous avons défini un offset dans notre signal d'où l'ajout de 1,10 et la modification de la valeur finale de notre signal, afin de revenir proche de zéro pour l'excitation suivant. La valeur de correction a été obtenue durant la phase de calibration. Le signal est divisé par deux afin de garder uniquement l'enveloppe positive pour exciter le LRA, indication donnée dans la description technique.

VII.2.3.1.3 Résultats

Déplacement en fonction de la tension à fréquence fixe

La Figure 35 représente le déplacement en μm de la membrane supérieure du LRA C10-1 en fonction de différentes tensions du signal d'entrée et ce pour des fréquences constantes. Chaque fréquence est définie par une couleur comme indiqué dans la légende. Les courbes avec marqueurs représentent les déplacements maximum enregistré et les courbes sans marqueurs représentent les déplacements minimaux, et ce par fréquence. Ces déplacements minimum et maximum par fréquence sont mesurés en micromètres (μm).

Nous observons que, quelle que soit la fréquence excitée, les courbes de déplacements minimaux et maximaux suivent respectivement les mêmes tendances. Avant 0,5 V, les déplacements sont quasi nuls. Puis nous observons une croissance quasiment linéaire des déplacements de 0,5 V à 2 V, avec une croissance plus marquée à 205 Hz. Lorsqu'une tension avoisinant 2 V est appliquée au C10-1, les déplacements maximaux décroissent légèrement de manière linéaire. Pour les valeurs minimales des déplacements par fréquence, on observe une croissance linéaire symétrique. On observe un écart de déplacement maximal de 8 μm à 2,5 V pour une fréquence de 205 Hz.

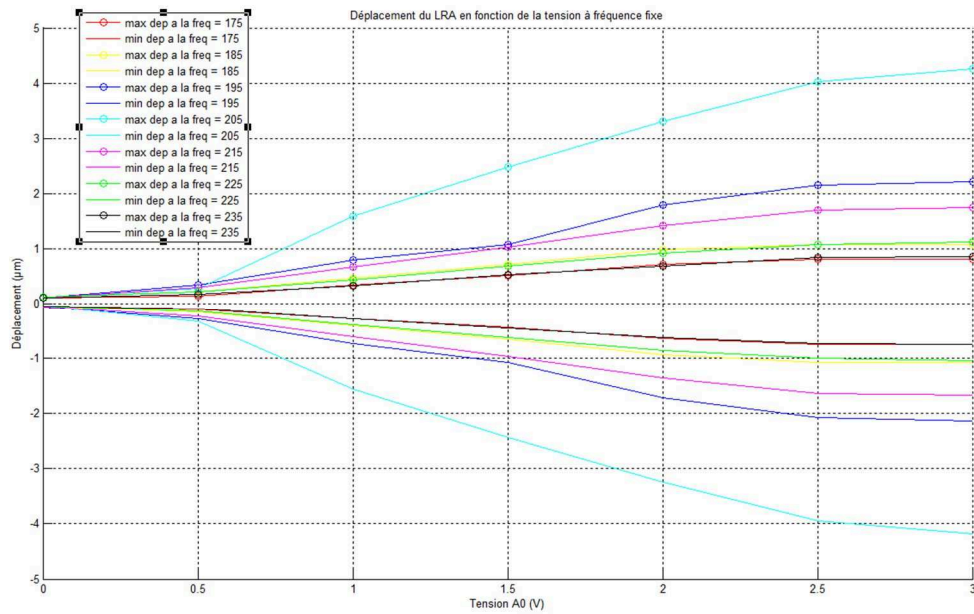


Figure 35 Déplacement de la membrane supérieure du LRA C10-1 en fonction de la tension en Volt, à fréquence fixe en Hz

Le graphique ci-dessus (Figure 36) représente le déplacement de la membrane supérieure d'un deuxième LRA, C10-2. Les courbes présentées suivent une tendance légèrement différente que celle de notre précédent actionneur. On peut observer que les courbes représentant les déplacements maximaux par fréquence suivent une croissance quasi linéaire avec une tendance plus faible après 2,5 V. On observe un écart de déplacement maximal de 8 μm à 3 V pour une fréquence de 205 Hz.

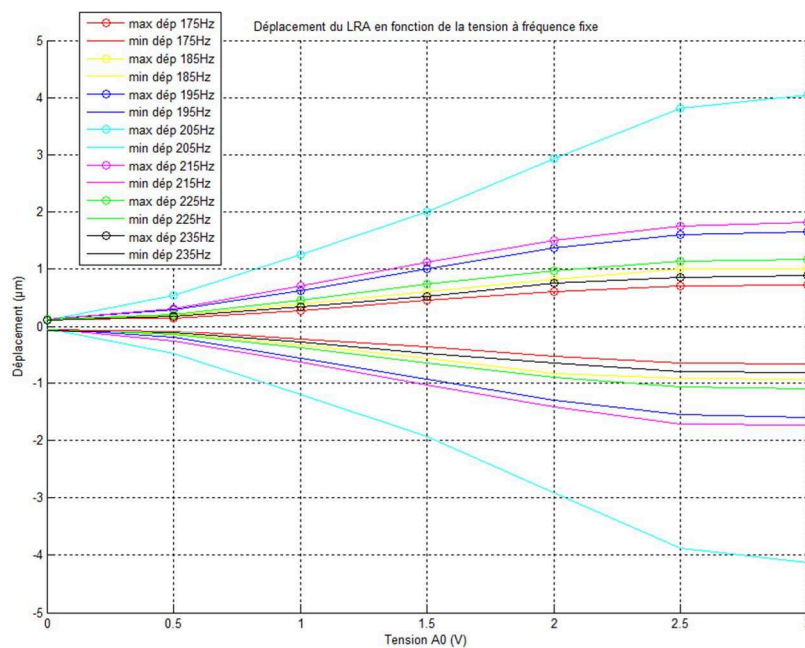


Figure 36 Déplacement de la membrane supérieure du LRA C10-2 en fonction de la tension en Volt, à fréquence fixe en Hz

Nous notons un léger écart de performance en déplacement, entre les deux actionneurs, de l'ordre $0.1 \mu\text{m}$ à $2,5 \text{ V}$, voir Figure 37. Nous observons que, quelles que soient les fréquences excitées, les tendances de déplacement de la membrane supérieure de l'actionneur sont très similaires. Nous notons également un changement des tendances autour de $2,5 \text{ V}$ quelle que soit la fréquence d'excitation. Ainsi, nous avons choisi de sélectionner les tensions de 1 V et 3 V à 205 Hz pour définir deux signaux d'excitations distinguables pour stimuler les LRA C10.

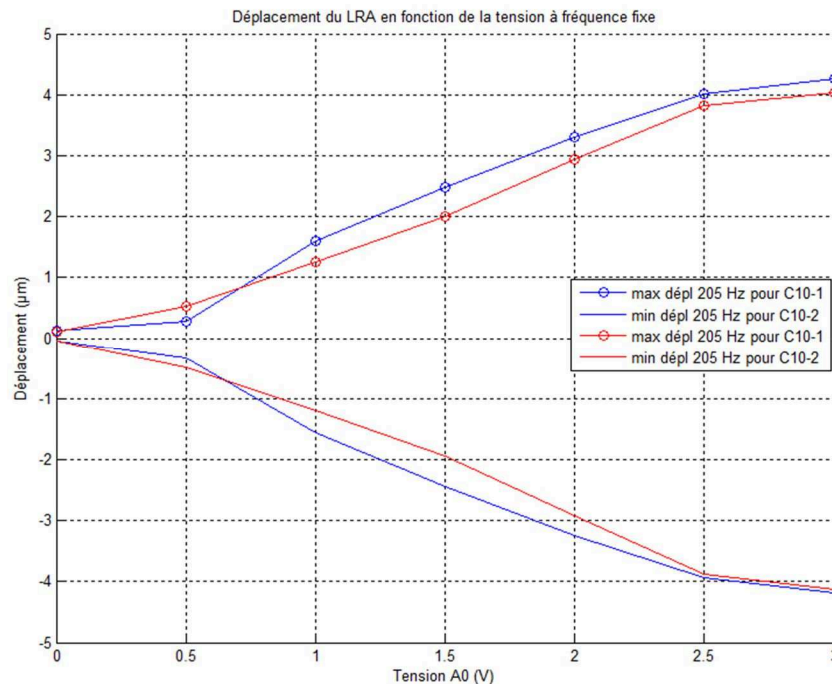


Figure 37 : Comparaison des déplacements de C10-1 et C10-2

VII.3 Etude expérimentale

VII.3.1 Participants

Le protocole expérimental a été appliqué à 28 participants adultes typiques (14 femmes et 14 hommes). Leurs âges se situaient entre 21 et 39 ans, avec une moyenne de $27,4 \text{ ans}$ ($ET = 5.1$). Une analyse de puissance a été réalisée avant l'expérience pour estimer la taille minimale de l'échantillon requise sur la base des données rapportées par des études précédentes (Hommel, Colzato, & Van Den Wildenberg, 2009; Liepelt, Wenke, Fischer, & Prinz, 2011a). Le calcul a été effectué avec l'application G*Power (Faul, Erdfelder, Lang, & Buchner, 2007) en fixant le seuil de signification à $0,05$ et la puissance à $0,9$. Les résultats donnaient une taille minimale de 16. Les participants étaient exempts de symptômes psychiatriques ou neurologiques connus, de déficits visuels ou auditifs non corrigés et d'une utilisation récente de toute substance pouvant

nuire à la concentration. Cette recherche était conforme aux principes de la Déclaration d'Helsinki et a été examinée et approuvée par le comité d'éthique de l'Université Paris-Descartes. Un consentement éclairé a été obtenu de chaque participant inclus dans l'étude.

VII.3.2 Matériel

Les stimulations tactiles étaient produites par deux actionneurs LRA de Precision MicroDrive™. Chaque actionneur LRA était fixé sur une bande de silicone collée sur une table. Les deux actionneurs étaient positionnés sur un axe parallèle au bord de la table. Les participants étaient assis confortablement sur une chaise face à la table, entre les deux LRA, et plaçaient les extrémités de leurs index droit et gauche sur les LRA correspondant au même côté. Les stimulations vibrotactiles étaient générées à 205 Hz avec deux amplitudes de déplacement possibles : 1,5 μm pour le stimulus dit « faible » et 4 μm pour le stimulus dit « fort ». La vibration de chaque stimulus était continue et durait 250 ms. Les participants répondaient aux stimuli tactiles en appuyant sur des pédales placées sous la table : une pédale à leur gauche et une pédale à leur droite. Chaque pédale était associée à une amplitude de vibration donnée (soit faible, soit forte) qui était indiquée sur la pédale. Pour que les participants ne soient pas influencés par le son des vibrations, ils portaient des écouteurs anti-bruit qui diffusaient du bruit rose. Le sens du toucher était donc l'unique modalité sensorielle sur laquelle ils pouvaient compter pour distinguer les deux amplitudes de vibration.

VII.3.3 Procédure

Les participants étaient assis à côté de l'expérimentateur, à sa droite. Un écran d'ordinateur était placé sur la table entre le participant et l'expérimentateur. Les instructions étaient fournies verbalement et par écrit. La version écrite était accessible tout au long de l'expérience. Les participants avaient pour consigne de répondre aussi vite qu'ils le pouvaient aux stimuli tactiles. Ils devaient placer leurs pieds symétriquement par rapport à leur corps. Leurs pieds étaient séparés par une distance équivalente à la taille de leurs hanches ou la distance d'une épaule à l'autre, selon la posture qui leur était la plus naturelle. Les pédales étaient placées à côté de chaque pied, soit dessous, soit à côté, selon l'agencement le plus confortable et permettant d'appuyer le plus facilement sur la pédale pour chaque participant. Les stimuli faible et fort étaient ensuite présentés aux participants sur chaque LRA. Pour la moitié des participants, la pédale marquée « fort » (devant être pressée pour le stimulus fort) était

positionnée sur leur droite, et la pédale « faible » sur leur gauche. La configuration inverse était utilisée pour l'autre moitié des participants.

Comme dans Salzer et al. (2014), chaque essai commençait par une croix de fixation qui était affichée au centre de l'écran pendant 250 ms. Lorsque la croix de fixation disparaissait, l'une des LRA délivrait un stimulus vibrotactile pendant 250 ms. A partir du début du stimulus vibrotactile, les participants avaient jusqu'à 1 500 ms pour répondre en appuyant sur l'une des deux pédales. Après la réponse des participants, un message "Correct" ou "Incorrect" était affiché pendant 300 ms. Aucun message n'apparaissait lorsque les participants n'avaient pas répondu dans les temps. Le message de feedback était suivi d'un écran noir qui durait jusqu'au prochain essai. La durée de l'intervalle entre essais variait aléatoirement entre 1 000 et 1 500 ms. La Figure 38 résume le flux des événements au cours d'un essai.

L'expérience était composée de 5 blocs séparés par de courtes pauses. Le premier bloc servait à entraîner les participants à percevoir les deux différentes stimulations vibrotactiles. Il contenait 60 essais qui n'étaient pas inclus dans les analyses. Les quatre blocs suivants comprenaient chacun 120 essais et étaient utilisés pour collecter les données expérimentales, c'est-à-dire le temps de réaction et le nombre d'erreurs.


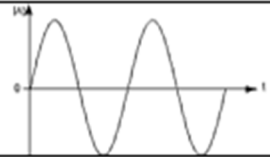

Event	Fixation cross	Tactile stimuli	Participant's response	Feedback	Inter-trial interval
				Correct	
Duration	250ms	250ms		300ms	1 725- 2 250ms
		1 500ms			

Figure 38 Déroulement d'un essai

Le temps de réaction a été mesuré à partir du début du stimulus jusqu'à la réponse du participant. Au cours de chaque bloc, les LRA produisaient un nombre égal de stimuli d'amplitude faible et forte et ceux-ci étaient également répartis à gauche et à droite. Les positions gauche / droite et les amplitudes faibles / fortes des stimuli étaient aléatoirement contrebalancées. Comme expliqué ci-dessus, les participants devaient répondre aux stimuli faible ou fort avec leur pied gauche ou droit selon l'endroit où les pédales marquées « faible » et « fort » avaient été placées. Lorsque le stimulus apparaissait du même côté que la pédale à

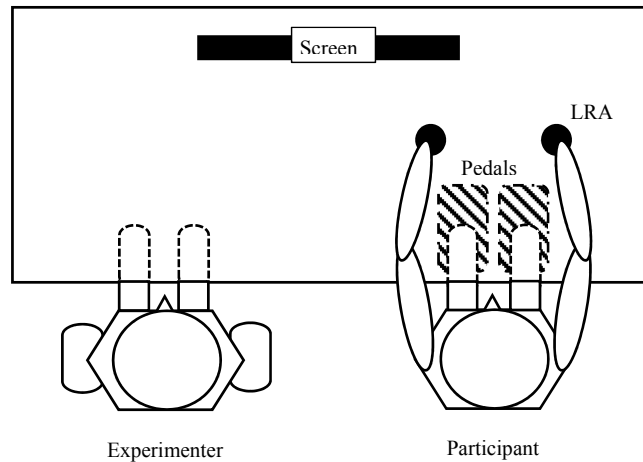
pousser, l'essai était dit « congruent ». Il était dit « incongruent » lorsque le stimulus apparaissait du côté opposé.

Les quatre blocs expérimentaux présentaient trois tâches différentes (Figure 39) : un bloc était dédié à la tâche Simon standard, un bloc à la tâche go/nogo individuel et deux blocs pour la tâche go/nogo social. Deux blocs successifs étaient attribués pour la tâche go/nogo social, car nous voulions vérifier si l'effet Simon social escompté était susceptible de diminuer avec l'entraînement. L'ordre séquentiel des tâches était contrebalancé entre les participants en utilisant la méthode du Carré Latin.

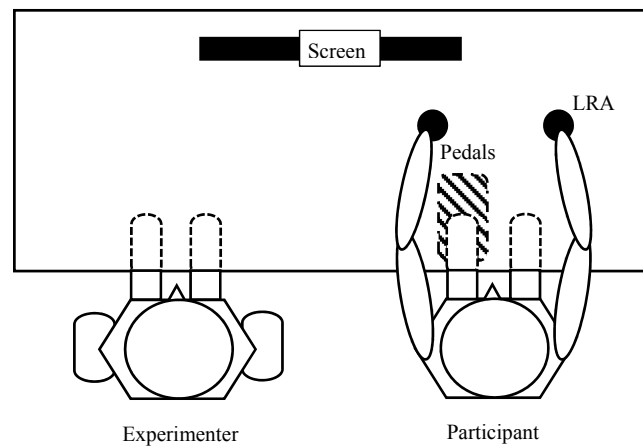
Dans la tâche de Simon standard, les participants devaient répondre aux deux amplitudes de stimuli (faible et forte) en appuyant sur la pédale correspondante. Dans les tâches go/nogo individuel et social, les participants répondaient soit exclusivement aux stimuli de faible amplitude pendant les 60 premiers essais du bloc et aux stimuli de forte amplitude pour les 60 essais suivants, ou bien répondaient d'abord aux stimuli de forte amplitude, puis aux stimuli de faible amplitude. L'ordre dans lequel les participants devaient répondre soit à l'amplitude faible, soit à l'amplitude forte au cours du bloc était contrebalancé entre les participants. La position de la pédale sur laquelle ils devaient appuyer pour l'un ou l'autre stimulus était également contrebalancée entre les participants.

La seule différence entre la condition go/nogo individuel et la condition go/nogo social était due au fait que l'expérimentateur prenait part à la tâche pendant la condition go/nogo social. Dans cette condition, l'expérimentateur répondait à l'amplitude à laquelle le participant ne devait pas répondre. Par exemple, si le participant devait répondre aux stimuli de faible amplitude, l'expérimentateur répondait aux stimuli de forte amplitude et vice versa. Les instructions spécifiaient explicitement que le participant et l'expérimentateur devaient coopérer dans l'exécution de la tâche. L'expérimentateur plaçait les extrémités de ses doigts sur une deuxième paire de LRA qui reproduisaient les mêmes stimuli vibrotactiles que ceux envoyés au participant. L'expérimentateur utilisait le même pied que le participant pour appuyer sur la pédale de réponse. L'expérimentateur était la même personne pour tous les participants. Comme il s'agissait d'une femme, le genre des participants a été pris en compte dans l'analyse statistique. L'expérimentateur s'était entraîné pour répondre de manière similaire pour tous les participants et s'assurait de ne pas s'adapter aux performances des participants.

Standard Simon



Individual Go/nogo



Social Go/nogo

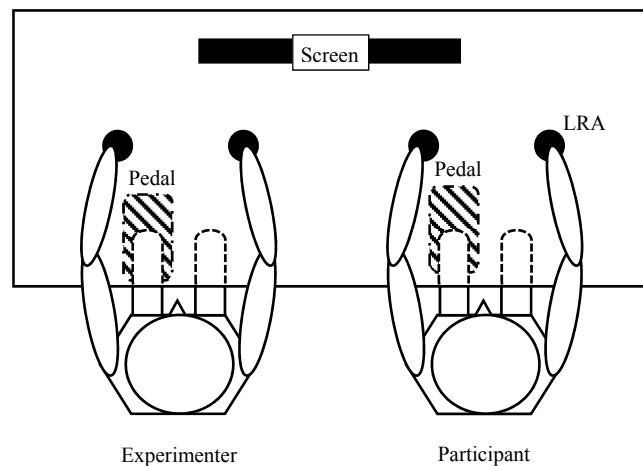


Figure 39 Vue de dessus des configurations expérimentales pour les trois tâches.

Dans chaque tâche, le participant recevait deux stimuli tactiles de deux LRA. En haut : tâche Simon standard : le participant répondait à deux stimuli avec deux pédales ; Milieu : Tâche go/nogo individuel : le participant répondait à un seul stimulus avec une seule pédale ; Bas : Tâche go/nogo social : L'expérimentateur et le participant répondaient chacun à un stimulus différent avec une seule pédale chacun. La position de la pédale dans les tâches go/nogo individuel et social était contrebalancée entre les participants. LRA : Linear Resonant Actuator

A la fin de l'expérience, il était demandé aux participants de remplir le questionnaire de Quotient Autistique (QA)(Baron-Cohen et al., 2001). L'AQ est un instrument psychométrique utilisé pour dépister les traits autistiques dans la population générale. L'AQ est constituée de questions liées aux compétences sociales et communicatives, à l'imagination et à la flexibilité. Un exemple de la version française du QA est disponible dans l'annexe 4. Les figures ci-dessous illustrent l'expérience avec une participante.



Figure 40 Dispositif utilisé durant l'expérience durant la tâche de Simon standard en modalité tactile.



Figure 41 Autre vue de la passation de l'expérience Simon Tactile

VII.3.4 Résultats et discussion

Cette section présente les résultats concernant les hypothèses sur l'influence du partenaire dans un premier temps, puis les analyses exploratoires sur la tâche Simon standard dans un deuxième temps. Les analyses ont été réalisées avec le logiciel Statistica (www.statsoft.com).

VII.3.4.1 Influence du partenaire

VII.3.4.1.1 Effet Simon

Les temps de réponses et erreurs ont été analysés en utilisant des analyses de la variance (ANOVA) à mesures répétées avec deux facteurs intra-sujets et un facteur d'ajustement. Le premier facteur était le bloc expérimental. Il était composé de quatre conditions : le bloc de la tâche « Simon standard », le bloc de tâche « go/nogo individuel » et les deux blocs successifs de la tâche « go/nogo social », appelés par la suite « 1^{er} bloc social go/nogo » et « 2^{ème} bloc social go/nogo ». Le deuxième facteur était la congruence de l'essai. Les essais congruents étaient ceux où le stimulus apparaissait du même côté que la pédale de réponse. Les essais incongruents étaient ceux où le stimulus apparaissait du côté opposé à la pédale de réponse. Le facteur d'ajustement était le genre des participants afin de rendre compte d'un possible effet du genre de l'expérimentatrice dans la tâche go/nogo social. Les tests post-hoc étaient effectués en utilisant la procédure de Tukey.

VII.3.4.1.2 Nombres d'erreurs

Nous avons collecté le nombre d'essais erronés dans chaque bloc. Comme il y avait 120 essais par bloc, cette variable oscille entre 0 et 120. Un essai était considéré comme erroné quand le participant actionnait la mauvaise pédale ou ne donnait aucune réponse durant le temps alloué (1,5 s). Il y avait généralement peu d'erreurs, entraînant un effet plancher sur la distribution du nombre d'erreurs. Afin de normaliser la distribution, nous avons utilisé la transformation Box Cox (Sakia, 1992) avant d'appliquer l'ANOVA. Nous avons trouvé un effet significatif du facteur de bloc, $F(3,78) = 5,90$, $p = 0,001$, $\eta^2 = 0,18$. Les t-tests post hoc ont montré que les participants ont fait significativement moins d'erreurs dans le 1^{er} bloc « go/nogo social » que dans le bloc « Simon standard » ($p = 0,030$). Le nombre d'erreurs était également plus faible dans le 2^{ème} bloc « go/nogo social » que dans le bloc « Simon standard » ($p = 0,003$) et dans le bloc « go/nogo individuel » ($p = 0,023$). Le nombre d'erreurs dans chaque bloc est

tracé dans la Figure 42. Nous n'avons pas trouvé d'effet de congruence ou de genre, ni aucune interaction entre les facteurs.

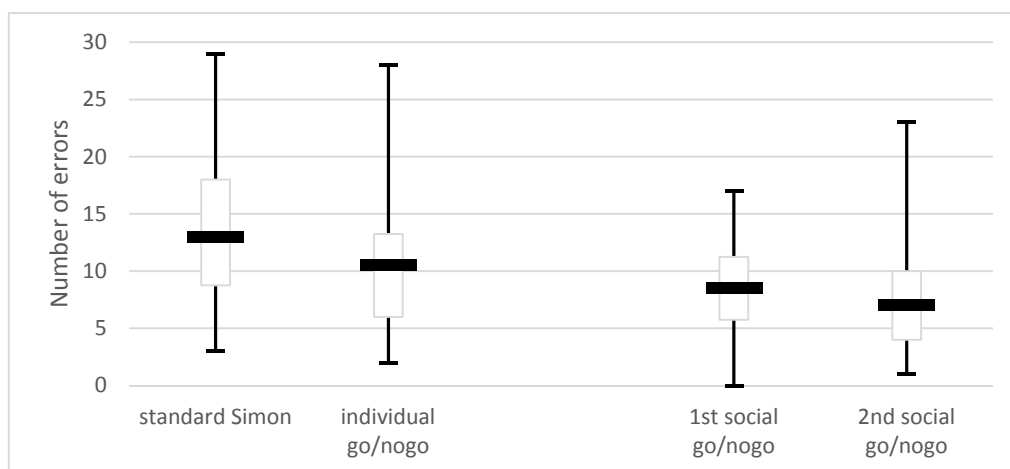


Figure 42 Le nombre d'essais erronés dans chaque bloc expérimental. Comme la distribution des données n'était pas normale, des boîtes à moustaches ont été utilisées pour représenter la médiane (lignes horizontales en gras), les 25e et 75e percentiles (boîtes) et les valeurs minimales et maximales (barres d'erreur).

VII.3.4.1.3 Temps de réponse

Appliquée aux temps de réponse, l'ANOVA donne un effet principal significatif du bloc expérimental, $F(3,78) = 13,16$ $p < 0,0001$ $\eta^2 = 0,34$, un effet principal significatif de la congruence, $F(1,26) = 13,55$ $p = 0,001$ $\eta^2 = 0,34$, et une interaction significative entre le bloc expérimental et la congruence, $F(3,78) = 2,76$ $p = 0,048$ $\eta^2 = 0,10$. Les temps de réponse dans les essais congruents étaient significativement plus courts que dans les essais incongruents. Cependant, cet effet est modulé par l'interaction entre le bloc expérimental et la congruence. Les tests post-hoc montraient que les participants étaient significativement plus rapides dans les essais congruents que dans les essais incongruents uniquement dans le bloc « Simon standard » ($p < 0,001$). Il n'y avait pas de différence significative entre les essais congruents et incongruents dans le bloc « go/nogo individuel » ($p = 0,24$) et les deux blocs « go/nogo social » (1^{er} go/nogo social : $p = 0,27$; 2^{ème} go/nogo social : $p = 0,99$). En ce qui concerne l'effet principal du facteur bloc, les tests post-hoc montraient que les réponses dans les blocs « go/nogo social » étaient significativement plus rapides que dans le bloc « Simon standard » ($p < 0,001$) et dans le bloc « go/nogo individuel » ($p < 0,005$). Les temps de réponse dans le 1^{er} bloc « go/nogo social » ne différaient pas de ceux du 2^{ème} bloc « go/nogo social » ($p > 0,99$). L'effet

du genre n'était pas significatif, et il n'y avait pas d'interactions significatives entre le genre et les autres facteurs. Les données de temps de réponse sont représentées sur la Figure 43

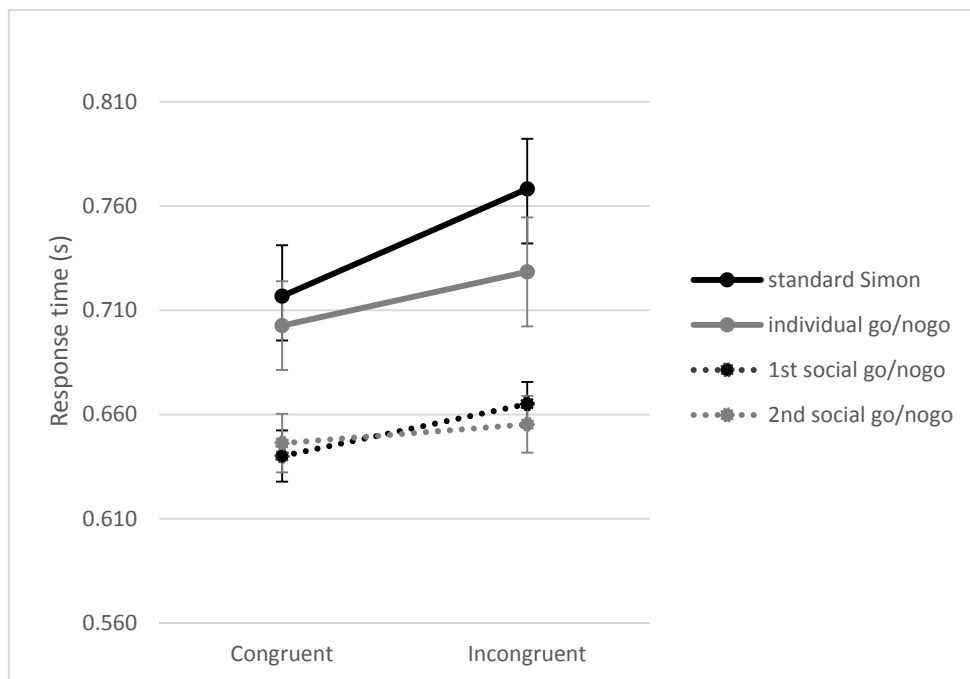


Figure 43 Temps de réponses pour les essais congruents et incongruents des quatre blocs expérimentaux. Les barres d'erreur représentent les erreurs standards.

VII.3.4.1.4 Corrélations avec les temps de réponses de l'expérimentatrice

Compte tenu des performances plus élevées qu'il n'était attendu dans les blocs « go/nogo social », des analyses complémentaires ont été effectuées afin de caractériser l'effet du partenaire. Des coefficients de corrélations ont été calculés entre les temps de réponse de l'expérimentateur et ceux des participants pendant chacun de ces deux blocs. Les corrélations de Pearson étaient significatives pour le 1^{er} bloc « go/nogo social », $r = 0,74$ $p < 0,001$, et aussi pour le 2^{ème} bloc « go/nogo social », $r = 0,90$ $p < 0,001$. Les analyses complémentaires consistaient également à vérifier s'il y avait des différences significatives de performances entre l'expérimentateur et les participants au cours des deux blocs « go/nogo social ». Pour cela, une ANOVA à mesures répétées avec deux facteurs internes a été conduite. Le premier facteur était le partenaire (expérimentateur vs participant) et le second facteur était le bloc (1^{er} vs 2^{ème} bloc « go/nogo social »). L'ANOVA n'a montré aucune différence entre les partenaires, $F(1,27) = 3,01$ $p = 0,09$, ni entre les blocs, $F(1,27) = 0,65$ $p = 0,43$. L'interaction entre les deux facteurs n'était pas non plus significative, $F(1,27) = 1,04$ $p = 0,32$.

VII.3.4.1.5 Corrélation avec le Quotient Autistique

Comme expliqué précédemment, il s'agissait de tester si l'amplitude de l'effet Simon social était corrélée avec les scores d'AQ. Les scores d'AQ des participants allaient de 7 à 35 (le score maximum possible est de 50) avec une moyenne de 18,2 ($ET = 6,9$). L'amplitude de l'effet Simon social a été calculée comme la différence entre les temps de réponse dans les essais incongruents et congruents. Pour isoler l'effet social d'un éventuel effet d'entraînement, le 2^{ème} bloc « go/nogo social » a été ignoré et seul le 1^{er} bloc a été pris en compte. Le coefficient de corrélation de Pearsons n'était pas significatif : $r = 0,28$ $p = 0,15$.

VII.3.4.2 Analyse de l'effet Simon standard

Ici sont présentées les analyses concernant uniquement la tâche « Simon standard » où un effet significatif de la congruence a été trouvé. Afin de caractériser davantage cet effet, les effets de l'amplitude et de l'essai précédent sont analysés.

VII.3.4.2.1 Analyse de l'amplitude

Les temps de réponse ont été analysés en utilisant des analyses de variance à mesures répétées (ANOVA) avec deux facteurs : Le premier facteur était l'amplitude de la stimulation (faible vs fort) et le deuxième facteur était la congruence de l'essai (congruent vs incongruent). L'ANOVA indiquait un effet significatif de l'amplitude, $F(1, 26) = 5,07$ $p = 0,033$ $\eta^2 = 0,16$. Les temps de réponse étaient plus longs pour l'amplitude faible (voir figure 28). Comme précédemment, un effet significatif de la congruence était observé, $F(1, 26) = 18,522$ $p < 0,001$ $\eta^2 = 0,42$ avec des temps de réponse plus longs pour les essais incongruents (voir Figure 44). Aucune interaction n'a été trouvée entre l'amplitude et la congruence.

Comme le nombre d'erreurs n'étaient pas normalement distribué, un test de Friedman non-paramétrique a été utilisé à la place de l'ANOVA. Ce test comparait les nombres d'erreurs pour les quatre combinaisons des modalités de congruence et d'amplitude (congruent faible, incongruent faible, congruent fort, incongruent fort). Ce test ne montrait aucune différence significative.

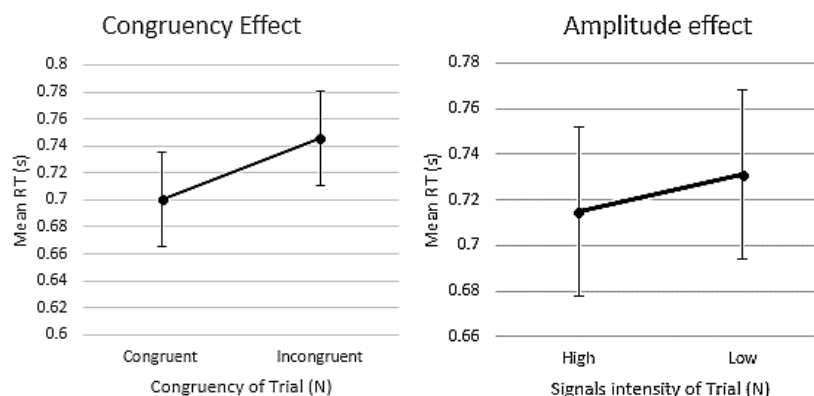


Figure 44 Temps de réaction moyen en fonction de la congruence, et en fonction de l'intensité du signal, avec écart type.

VII.3.4.2.2 Analyse de l'influence de l'essai précédent

Une ANOVA à mesures répétées a été employée pour analyser les performances lors d'un essai donné en fonction des congruences et l'amplitude de cet essai et de l'essai précédent. Avant d'effectuer ces analyses, un test de Friedman a été appliqué sur le nombre d'occurrences de chaque configuration de paires successives d'essais afin de vérifier qu'elles étaient comparables. Il y avait 16 configurations possibles de paires d'essais successifs. En effet, les facteurs de congruence et d'amplitude donnent quatre configurations possibles (congruent faible, incongruent faible, congruent fort et incongruent fort) pour l'essai courant et les mêmes quatre configurations pour l'essai précédent. Ainsi, le nombre de configurations possibles pour la paire d'essais est égal à $4 \times 4 = 16$. Le test de Friedman sur le nombre d'occurrences n'était pas significatif ($p = 0,09$). Il était donc raisonnable de supposer que les configurations étaient comparables.

Une ANOVA à mesures répétées a été menée sur les temps de réponse avec les quatre facteurs suivants : congruence de l'essai courant, amplitude de l'essai courant, congruence de l'essai précédent, amplitude de l'essai précédent. Elle montrait des effets significatifs pour la congruence de l'essai courant, $F(1, 26) = 4,57$ $p = 0,042$ $\eta^2 = 0,15$, la congruence de l'essai précédent, $F(1, 26) = 7,95$ $p = 0,009$ $\eta^2 = 0,23$, et l'amplitude de l'essai précédent, $F(1, 26) = 4,54$ $p = 0,04$ $\eta^2 = 0,15$. Les temps de réponse étaient plus longs lorsque l'essai courant ou l'essai précédent était incongruent. Les réponses étaient également plus lentes lorsque l'essai précédent était de faible amplitude. L'ANOVA a également montré des interactions entre la congruence de l'essai courant et la congruence de l'essai précédent, $F(1, 26) = 23,15$ $p < 0,0001$ $\eta^2 = 0,47$,

l'amplitude de l'essai courant et l'amplitude de l'essai précédent, $F(1,26) = 5,04$ $p = 0,03$ $\eta^2 = 0,16$, et l'ensemble des quatre facteurs, $F(1, 26) = 10,07$ $p = 0,004$ $\eta^2 = 0,28$. Des tests post-hoc utilisant la procédure HSD de Tukey ont montré que même si l'essai courant était congruent, les temps de réponse augmentaient si l'essai précédent avait été incongruent ($p < 0,001$). Nous avons également effectué un test de Friedman sur les nombres d'erreurs qui n'étaient pas normalement distribués en raison d'un effet plancher. Ce test n'a pas révélé d'effet significatif ($p = 0,31$).

VII.3.4.3 Discussion

VII.3.4.3.1 Influence du partenaire

Les résultats de la présente étude confirment l'existence d'un effet Simon pour des stimulations tactiles mais notre hypothèse de réapparition de cet effet lorsque l'action a été distribuée entre deux partenaires a été invalidée. Les participants ont répondu plus rapidement aux essais congruents qu'aux essais incongruents dans le bloc « Simon standard » où ils devaient réagir à deux amplitudes de stimulations vibrotactiles différentes. L'interférence dans les temps de réponses due à l'incongruence spatiale entre le stimulus et la réponse était absente dans les blocs « go/nogo social » où le participant effectuait la tâche conjointement avec un partenaire. En d'autres termes, la congruence entre stimulus et réponse n'avait pas plus d'effet dans la tâche go/nogo qu'elle soit réalisée en individuel ou avec un partenaire. Ce résultat suggère que la représentation des actions d'un partenaire dans son propre système sensori-moteur (Sebanz et al., 2003b) ou schéma codage spatial (Dittrich, Bossert, Rothe-Wulf, & Klauer, 2017; Dolk et al., 2013) ne se produit pas aussi spontanément quand les stimulations sont dans la modalité sensorielle tactile que lorsqu'elles sont dans les modalités visuelles ou auditives.

Les percepts tactiles ne peuvent pas être partagés entre les individus aussi facilement que dans les domaines visuel ou auditif. En effet le sens du toucher dépend du contact cutané local avec un objet. Il est donc plus personnel et n'offre pas un environnement sensoriel qui peut être directement partagé. Dans la tâche « go/nogo social » de notre expérience, les deux partenaires recevaient les mêmes stimulations vibrotactiles, mais elles provenaient de sources différentes (bien qu'identiques du point de vue du matériel utilisé). Le manque d'espace sensoriel partagé peut avoir gêné la tendance naturelle des participants à activer les représentations sensori-motrices des actions de leurs partenaires. Cette interprétation est

cohérente avec les données d'imageries neuronales qui soulignent le rôle important des mécanismes d'attention partagée dans l'effet Simon Social (Costantini et al., 2013). En résumé, l'effet Simon Social semble exiger un cadre sensoriel commun qui n'est pas facilement disponible dans la modalité tactile.

Le quotient autistique-spectre (QA) ne corrélait pas avec la différence de temps de réponse entre les essais incongruents et congruents dans la condition « go/nogo social ». Ce résultat n'est pas surprenant étant donné l'absence d'effet Simon social. En outre, Sebanz, Knoblich, Strumpf et Prinz (2005) rapportent que l'effet Simon social était préservé chez les personnes avec autisme.

Néanmoins, il y avait un effet de la condition d'action conjointe induite par la tâche « go/nogo social ». Les performances augmentaient indépendamment de la congruence des stimuli, comme montré par des temps de réponses plus courts dans les blocs « go/nogo social » en comparaisons des blocs « Simon standard » et « go/nogo individuel ». Cette diminution du temps de réponse ne s'est pas faite au détriment de la précision. Le nombre d'essais erronés était en réalité plus faible dans les deux blocs « go/nogo social » que dans le bloc « Simon standard ». De plus, il y avait moins d'erreurs dans le 2^{ème} bloc « go/nogo social » que dans le bloc « go/nogo individuel », bien que cette diminution puisse aussi être attribuée à un effet d'entraînement.

En outre, les temps de réponses des participants étaient corrélés avec ceux de l'expérimentatrice. Les participants semblent donc avoir ajusté leur temps de traitement à celui de l'expérimentatrice qui était leur partenaire. On pourrait penser que les participants utilisaient une stratégie où ils se servaient des réponses de l'expérimentatrice, c'est-à-dire en ne répondant que lorsque l'expérimentatrice ne répondait pas et en inhibant leur réponse lorsque l'expérimentatrice répondait. Une telle stratégie aurait conduit les participants à attendre la réponse de l'expérimentatrice, ou une absence de réponse, avant d'initier une réponse. Si tel était le cas, alors leurs temps de réponses auraient été supérieurs à la plage des temps de réponses de l'expérimentatrice. Cependant, les temps de réponses des participants n'étaient pas significativement différents de ceux de l'expérimentatrice. De plus, prêter ainsi attention à la réponse de l'expérimentatrice aurait dû augmenter la charge cognitive dans la tâche « go/nogo social » par rapport à la tâche « go/nogo individuel », ce qui contredit le fait que le temps de traitement était réduit dans la tâche « go/nogo social ».

Les résultats montraient que l'exécution de la tâche avec un partenaire augmentait les performances. Un résultat similaire a été rapporté dans l'étude de l'effet Simon Social par Liepelt et al. (2011b) qui ont trouvé un effet principal de la condition d'action conjointe, bien que, dans leur cas, cet effet ait également interagi avec l'effet de congruence et n'ait donc pas été davantage souligné. L'amélioration des performances observées dans notre expérience ne peut pas être simplement attribuée à la présence d'une autre personne aux côtés du participant. En effet, l'expérimentatrice était assise à côté des participants dans toutes les conditions expérimentales. La seule variation introduite par la condition « go/nogo social » était que l'expérimentatrice participait à la tâche. L'amélioration des performances dans cette condition peut s'expliquer par l'effet classique de la facilitation sociale induit par l'engagement dans une même activité qu'un partenaire (Zajonc, 1965).

Dans la présente expérience, comme les participants devaient coopérer avec l'expérimentatrice dans la tâche « go/nogo social », ils ont pu la considérer comme une référence à laquelle ils devaient s'ajuster. Cela pourrait expliquer la corrélation significative entre leurs temps de réponse et les temps de réponse de l'expérimentatrice. D'autres recherches seraient utiles pour vérifier si l'amélioration observée des performances dans la tâche « go/nogo social » aurait également eu lieu si le partenaire avait été un autre participant choisi au hasard. Une telle modification du protocole permettrait en outre de tester le partenariat homme-homme, ce qui n'était pas possible dans la présente étude étant donné que l'expérimentatrice était une femme. L'influence du genre sur les résultats serait alors plus complètement examinée. Malgré ces limites, la présente étude contribue aux connaissances actuelles sur l'action conjointe en montrant que l'effet Simon social est entravé lorsque les stimulations sont dans la modalité tactile. L'hypothèse émise pour expliquer cette absence d'effet incrimine un manque d'espace sensoriel partagé. Cette hypothèse pourrait être testée dans des expériences futures où les stimulations tactiles seraient fournies aux deux partenaires via les mêmes dispositifs vibrotactiles. Pour autant, une telle configuration serait peu utile pour la conception d'interfaces tactiles collaboratives, car elle implique que les partenaires restent en contact étroit les uns avec les autres. Une autre façon de compenser le manque de représentation sensori-motrice des actions du partenaire pourrait être de compléter les interfaces tactiles destinées à la collaboration multi-utilisateurs avec les messages dans les modalités visuelles ou auditives. Des recherches antérieures sur la conception de telles interfaces indiquent en effet que les utilisateurs préféraient la communication multimodale plutôt qu'uniquement tactile (Chan et al., 2008; Heikkinen et al., 2009).

VII.3.4.3.2 Facteurs influençant l'effet Simon Standard

Avec notre dispositif expérimental utilisant des LRA sur l'extrémité des index et des pédales de réponse, les résultats montraient un effet de la congruence spatiale entre stimulus et réponse ainsi que de l'amplitude du signal. Nos résultats sont cohérents avec la littérature (Hasbroucq & Guiard, 1992; Medina, McCloskey, Branch, et al., 2014; Salzer et al., 2014b). En ce qui concerne l'amplitude du signal, Medina et al. ont observé une différence entre les intensités faibles et fortes des stimuli similaire à celle trouvée dans cette étude. Ils rapportaient également des interactions entre la congruence et l'amplitude. Toutefois, Hasbroucq et Guiard (1992) n'ont pas trouvé une telle interaction et la présente étude non plus. L'interaction entre la congruence et l'amplitude s'avère donc plus faible ou même inexistante en fonction du dispositif utilisé.

L'analyse de paires d'essais successifs montrait que les performances sur un essai étaient modulées par la congruence et l'amplitude de l'essai précédent. Lorsque l'essai précédent avait été incongruent, le temps de réponse à l'essai en cours avait tendance à augmenter, que ce dernier soit congruent ou incongruent. En outre, les réponses étaient plus longues lorsque la vibration de l'essai précédent était de faible amplitude.

Ces résultats complètent ceux de Medina et al. (2014) qui étaient principalement pertinents pour des situations de conduite où le conducteur doit relâcher l'accélérateur. Une autre fonctionnalité intéressante pour l'industrie automobile consiste à alerter les conducteurs d'objets ou d'êtres vivants se rapprochant (piétons, enfants, arbres etc.) pour provoquer une réaction rapide sur les freins. Nos résultats suggèrent qu'un tel signal tactile de collision devrait être placé du même côté du conducteur que la pédale de frein.

VII.4 Conclusion

Le présent travail a permis de contribuer aux recherches actuelles concernant le design de stimulations tactiles pour le développement d'interface. Nous avons reproduit l'effet Simon dans le domaine tactile en utilisant uniquement deux niveaux de stimulations vibrotactiles qui ont été appliquées sur les index. Des effets de congruence et d'amplitude ont été trouvés avec des temps de réponses plus rapides pour les signaux d'une part congruent, d'autre part d'amplitude forte.

D'autre part, l'étude présentée ci-dessus suggère que l'effet Simon social se manifeste de manière moins évidente dans le domaine tactile que dans les modalités visuelles ou auditives. Ce résultat et l'absence de corrélation avec le Quotient Autistique rendent peu pertinentes des expérimentations similaires sur des personnes avec autisme. En outre, ces résultats invitent à considérer avec précaution le développement d'interfaces se basant uniquement sur des signaux vibrotactiles pour des applications de communication.

L'absence de corrélation entre le Quotient Autistique et les différents facteurs de notre étude, ne nous ont pas poussés à tenter cette expérimentation sur des personnes atteintes de Trouble du Spectre de l'Autisme. Le QA vise à estimer les traits d'Autisme Asperger et les Haut potentiels. Au vue du protocole expérimental, il aurait donc fallu recruter des adultes Asperger correctement diagnostiqués, ce qui aurait été long et difficile pour des résultats plus qu'incertains et dont le bénéfice paraît vague et réduit.

Conclusion et perspectives

L'objectif de ces travaux de recherches exploratoires sur les interfaces tactiles menés par le Commissariat à l'Energie Atomique et aux énergies renouvelables (CEA) et Sorbonne Université (SU), était de proposer et de concevoir une interface tactile ludo-éducative pour les personnes avec Trouble du Spectre de l'Autisme, en appliquant une démarche centrée utilisateur. Ce projet a été réalisé travers l'analyse des besoins des personnes avec TSA et des professionnels de santé, et de l'apport potentiel de la stimulation tactile en utilisant une approche expérimentale.

Une première phase exploratoire a consisté en des échanges avec des professionnels de santé et des experts en technologies travaillant dans le domaine du Trouble du Spectre de l'Autisme. Une revue systématique de la littérature a ensuite été menée. Ce travail préliminaire a permis de valider l'intérêt et le besoin d'une approche permettant la stimulation sensorimotrice basée sur des interfaces tactiles dans une démarche de conception centrée utilisateur pour concevoir une interface à destination des personnes avec Trouble du Spectre de l'Autisme.

Par la suite nous avons exploré deux pistes, l'une kinesthésique, l'autre tactile, avec deux méthodes différentes :

Pour la piste kinesthésique, une méthode de conception mécatronique exploratoire, nous a permis de développer un prototype d'interface avec un développement stabilisé. Cette interface est pour l'instant purement kinesthésique mais a été conçu pour pouvoir accueillir à la fois des actionnements mécaniques et/ou des stimulations multi-sensorielles. Nous avons pu faire tester et évaluer ce prototype par des professionnels de santé qui l'ont majoritairement bien accueilli. Ce travail a également permis de cerner la perception qu'ont les professionnels de santé vis-à-vis des IHM pour les TSA. Ces analyses ont montré qu'ils sont ouverts, voire en demande d'IHM adapté à leur patientèle. Celle-ci est très réceptive aux IHM dont l'utilisation en complément des pratiques professionnelles actuelles pourrait aider sur certaines problématiques rencontrées à la fois par les patients et les professionnels. Cette approche est novatrice, dans le sens où les démarches de conception mécatroniques centrées utilisateur pour les personnes avec TSA sont relativement rares comme l'a montré notre revue systématique de la littérature. L'interface qui en résulte montre un fort potentiel pour les personnes avec TSA. Quand on considère l'ensemble des interfaces tactiles ou haptiques existantes, cette interface DEMA est la seule à proposer un espace de travail conséquent (format A3) tout en offrant une

liberté de mouvement sur le plan horizontal. De par sa conception, elle peut aisément être complétée par divers actionneurs et capteurs prodiguant des stimulations sensorielles supplémentaires, et permettant également de réaliser de nombreuses tâches. Son design vient combler un manque dans l'exploration de l'espace horizontal. En effet, elle permet de réaliser une transition entre l'espace en trois dimensions et une feuille A4 posée sur une plan horizontale ; avec la possibilité de canaliser, ou non, les mouvements du membre supérieurs.

L'autre piste, qui était davantage focalisée sur les simulations tactiles, a été abordée avec une méthode expérimentale. L'objectif était de mieux comprendre les fondements de l'interaction sociale dans la modalité tactile. L'expérimentation basée sur le paradigme de « Simon Social » suggère que la modalité tactile n'est pas aussi propice aux activités collaboratives que les modalités visuelles ou auditives. A fortiori, une tâche collaborative fondée uniquement sur cette modalité ne serait pas adaptée pour des personnes avec TSA. Ces résultats indiquent donc qu'il serait potentiellement difficile de réaliser des interfaces uniquement vibrotactiles pour développer la collaboration ou la communication chez les personnes avec TSA. Cette étude fondamentale sur la boucle perception-action dans des tâches sociales n'avait, à notre connaissance, jamais été réalisé auparavant dans le domaine tactile.

De manière globale, aux vues de l'hétérogénéité des problématiques rencontrées chez les personnes avec TSA, il faut envisager soit de réaliser une interface modulaire et polyvalente, soit plusieurs interfaces, avec chacune une tâche dédiée. Nous penchons pour la première option, notre interface DEMA ayant été perçue comme fortement modulaire par les professionnels interrogés lors de son évaluation. En effet, en termes de patients concernés, de professionnels concernés, de tâches réalisables, de coût et de positionnement par rapport aux outils existant, notre interface est adaptée et prometteuse

A l'issue de nos travaux, plusieurs perspectives ont pu être identifiées. En effet, il nous paraîtrait intéressant de coupler notre interface DEMA avec des stimulations vibrotactiles diffusées dans le joystick pour être en contact avec les mains des utilisateurs. Ceux-ci pourraient servir de signaux d'alerte pour prévenir l'utilisateur en cas d'erreur dans une tâche à effectuer. L'expérience sur l'effet Simon indiquait que les stimulations vibrotactiles étaient plus vite traitées lorsqu'elles étaient prodiguées du côté de la réponse motrice attendue.

Egalement, après complétion de l'interface avec les ajouts proposés, il conviendrait de réaliser des tests avec des patients ayant un TSA pour parachever son évaluation. L'interface

conçue pourrait à terme être utilisée pour d'autres pathologies que l'autisme, par exemple le polyhandicap et les troubles psychomoteurs.

Bibliographie

- Alahakone, A. U., & Senanayake, S. M. N. A. (2009). Vibrotactile feedback systems: Current trends in rehabilitation, sports and information display (pp. 1148–1153). Presented at the International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE/ASME.
<https://doi.org/10.1109/AIM.2009.5229741>
- Amar, D., Goléa, A., Wolff, M., Gattegno, M. P., & Adrien, J.-L. (2012). Apports des tablettes tactiles pour jeunes adultes présentant une déficience mentale ou un trouble autistique: études de cas (pp. 169–172). Presented at the Proceedings of the 2012 Conference on Ergonomie et Interaction homme-machine, ACM Press.
<https://doi.org/10.1145/2652574.2653429>
- American Psychiatric Association. (2013). Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders(DSM-5), 2013.
- Amirabdollahian, F., Robins, B., Dautenhahn, K., & Ji, Z. (2011). Investigating tactile event recognition in child-robot interaction for use in autism therapy. In *Engineering in medicine and biology society, EMBC, 2011 annual international conference of the IEEE* (pp. 5347–5351). IEEE. Retrieved from
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6091323
- Andersen, P. A., & Leibowitz, K. (1978). The development and nature of the construct touch avoidance. *Environmental Psychology and Nonverbal Behavior*, 3(2), 89–106.
- Apostle-Mitchell, M., & MacDonald, G. (1997). An innovative approach to pain management in critical care: therapeutic touch. *Official Journal of the Canadian Association of Critical Care Nurses*, 8(3), 19–22.
- Asch, G. (1999). *Les Capteurs en instrumentation industrielle*. Paris: Dunod.
- Ashley, M. (1979). *La peau et le toucher. Éditions Du Seuil*.

- Ayres, A. J. (1989). Sensory integration and praxis tests (SIPT). *Los Angeles : Western Psychological Services.*
- Baranek, G. T. (1999). Autism during infancy : A retrospective video analysis of sensory-motor and social behaviors at 9–12 months of age. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 29(3), 213–224.
- Baranek, G. T., David, F. J., Poe, M. D., Stone, W. L., & Watson, L. R. (2006). Sensory Experiences Questionnaire : discriminating sensory features in young children with autism, developmental delays, and typical development. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 47(6), 591–601. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2005.01546.x>
- Baranek, G. T., Watson, L. R., Boyd, B. A., Poe, M. D., David, F. J., & McGuire, L. (2013). Hyporesponsiveness to social and nonsocial sensory stimuli in children with autism, children with developmental delays, and typically developing children. *Development and Psychopathology*, 25(02), 307–320. <https://doi.org/10.1017/S0954579412001071>
- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Skinner, R., Martin, J., & Clubley, E. (2001). The Autism-Spectrum Quotient (AQ) : Evidence from Asperger Syndrome/High-Functioning Autism, Males and Females, Scientists and Mathematicians. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 31(1), 5–17. <https://doi.org/10.1023/A:1005653411471>
- Benali-Khoudja, M. (2002). *Thèse sur le rendu tactile, Une étude physiologique et un état de l'art technologique sur le rendu tactile.* Fontenay-aux-roses.
- Benali-Khoudja, M., Hafez, M., Alexandre, J.-M., & Kheddar, A. (2004). Tactile interfaces: a state-of-the-art survey. In *Int. Symposium on Robotics* (Vol. 31, pp. 23–26). Citeseer. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.105.2158&rep=rep1&type=pdf>

- Ben-Sasson, A., Hen, L., Fluss, R., Cermak, S. A., Engel-Yeger, B., & Gal, E. (2009). A Meta-Analysis of Sensory Modulation Symptoms in Individuals with Autism Spectrum Disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 39(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10803-008-0593-3>
- Bisseret, A., Sebillotte, S., & Falzon, P. (1999). *Techniques pratiques pour l'étude des activités expertes*. Octarès.
- Blakemore, S.-J., Tavassoli, T., Calò, S., Thomas, R. M., Catmur, C., Frith, U., & Haggard, P. (2006). Tactile sensitivity in Asperger syndrome. *Brain and Cognition*, 61(1), 5–13. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2005.12.013>
- Bolanowski, S. J., Gescheider, G. a, Verrillo, R. T., & Checkosky, C. M. (1988). Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(5), 1680–1694. <https://doi.org/10.1121/1.397184>
- Bonanni, L., Vaucelle, C., Lieberman, J., & Zuckerman, O. (2006). TapTap: a haptic wearable for asynchronous distributed touch therapy. In *CHI'06 extended abstracts on Human factors in computing systems* (pp. 580–585). ACM. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1125573>
- Brewster, S. S. A., & Brown, L. M. L. M. (2004). Tactons: structured tactile messages for non-visual information display. *AUIC'04 Proceedings of the Fifth Conference on Australasian User Interface*, 15–23.
- Bullinger, A., de Santa Ana, I., Grivel, P., Millan, R., Scheidegger, P., Schmid Pons, N., & Tschopp, C. (1996). II - Le bilan sensori-moteur de l'enfant : éléments théoriques et cliniques. *Enfance*, 49(1), 41–50. <https://doi.org/10.3406/enfan.1996.2984>
- Burke, D., Hagbarth, K.-E., Löfstedt, L., & Wallin, B. G. (1976). The responses of human muscle spindle endings to vibration of non-contracting muscles. *The Journal of Physiology*, 261(3), 673.

- Burns, C. O., Dixon, D. R., Novack, M., & Granpeesheh, D. (2017). A Systematic Review of Assessments for Sensory Processing Abnormalities in Autism Spectrum Disorder. *Review Journal of Autism and Developmental Disorders*, 4(3), 209–224.
<https://doi.org/10.1007/s40489-017-0109-1>
- Buzzi, M. C., Buzzi, M., Rapisarda, B., Senette, C., & Tesconi, M. (2013). Teaching Low-Functioning Autistic Children: ABCD SW (pp. 43–56). Presented at the European Conference on Technology Enhanced Learning, Springer.
- Calas, A., Boulouis, H.-J., Perrin, J.-F., Plas, C., & Vanneste, P. (2016). *PRECIS DE PHYSIOLOGIE 2ED*. Doin-John Libbey Eurotext.
- Caro, K., Tentori, M., Martinez-Garcia, A. I., & Zavala-Ibarra, I. (2015). FroggyBobby: An exergame to support children with motor problems practicing motor coordination exercises during therapeutic interventions. *Computers in Human Behavior*.
<https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.05.055>
- Carterette, E. C., & Friedman, M. P. (1974). *Psychophysical judgment and measurement*. New York: Academic Press.
- Cascio, C., McGlone, F., Folger, S., Tannan, V., Baranek, G., Pelphrey, K. A., & Essick, G. (2008). Tactile Perception in Adults with Autism : a Multidimensional Psychophysical Study. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 38(1), 127–137.
<https://doi.org/10.1007/s10803-007-0370-8>
- Cermak, S. A., & Ben-Sasson, A. (2007). Sensory Processing Disorders in Children with Autism. *Growing Up with Autism : Working with School-Age Children and Adolescents*, 95.
- CFAURY. (2017, February 5). Les codeurs incrémentaux. Retrieved from <http://arduino.blaisepascal.fr/index.php/2017/02/05/les-codeurs-incrementaux/>

- Cha, J., Eid, M., Rahal, L., & Saddik, A. E. (2008). HugMe : An interpersonal haptic communication system. In *Haptic Audio visual Environments and Games, 2008. HAVE 2008. IEEE International Workshop on* (pp. 99–102). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4685306
- Chan, A., MacLean, K., & McGrenere, J. (2008). Designing haptic icons to support collaborative turn-taking. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66(5), 333–355. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2007.11.002>
- Changeon, G., Graeff, D., Anastassova, M., & Lozada, J. (2012). Tactile emotions : A vibrotactile tactile gamepad for transmitting emotional messages to children with autism. In *Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication* (pp. 79–90). Springer. Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-31401-8_8
- Chien, M.-E., Jheng, C.-M., Lin, N.-M., Tang, H.-H., Taele, P., Tseng, W.-S., & Chen, M. Y. (2015). iCAN: A tablet-based pedagogical system for improving communication skills of children with autism. *International Journal of Human-Computer Studies*, 73, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2014.06.001>
- Collins, A. M., & Quillian, M. R. (1969). Retrieval time from semantic memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 8(2), 240–247. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(69\)80069-1](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(69)80069-1)
- Colzato, L. S., de Bruijn, E. R. A., & Hommel, B. (2012). Up to “Me” or Up to “Us”? The Impact of Self-Construal Priming on Cognitive Self-Other Integration. *Frontiers in Psychology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00341>
- Costa, S., Resende, J., Soares, F. O., Ferreira, M. J., Santos, C. P., & Moreira, F. (2009). Applications of simple robots to encourage social receptiveness of adolescents with

- autism. In *Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 5072–5075). Minneapolis, Minnesota, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5334269>
- Costantini, M., Vacri, A. D., Chiarelli, A. M., Ferri, F., Romani, G. L., & Merla, A. (2013). Studying social cognition using near-infrared spectroscopy: the case of social Simon effect. *Journal of Biomedical Optics*, 18(2), 025005. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.18.2.025005>
- Coulard, R., Poirier, J., & Racadot, J. (1980). *Précis d'histologie humaine*. Paris; Québec: Masson ; Presse de l'Université Laval.
- Dawson, G., Osterling, J., Meltzoff, A. N., & Kuhl, P. (2000). Case study of the development of an infant with autism from birth to two years of age. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 21(3), 299–313.
- de Ajuriaguerra, J. (1989). La peau comme première relation. Du toucher aux caresses. *La psychiatrie de l'enfant*, Volume 32(2), 325–349.
- de la Asuncion, J., Docx, L., Morrens, M., Sabbe, B., & de Bruijn, E. R. A. (2015). Neurophysiological evidence for diminished monitoring of own, but intact monitoring of other's errors in schizophrenia. *Psychiatry Research*, 230(2), 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2015.08.043>
- de Leva, P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, 29(9), 1223–1230. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(95\)00178-6](https://doi.org/10.1016/0021-9290(95)00178-6)
- de Urturi Breton, Z. S., Hernández, F. J., Zorrilla, A. M., & Zapirain, B. G. (2012). Mobile communication for intellectually challenged people: A proposed set of requirements for interface design on touch screen devices. *Communications in Mobile Computing*, 1(1), 1.

- Degenne-Richard, C. (2014). *Evaluation de la symptomatologie sensorielle des personnes adultes avec autisme et incidence des particularités sensorielles sur l'émergence des troubles du comportement*. Paris 5.
- Delobel, M., Van Bakel, M.-E., Klapouszczak, D., Vignes, C., Maffre, T., Raynaud, J.-P., ... Cans, C. (2013). Prévalence de l'autisme et autres troubles envahissants du développement : données des registres français de population. Générations 1995–2002. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 61(1), 23–30.
<https://doi.org/10.1016/j.neurenf.2012.09.007>
- Dewey, D., Cantell, M., & Crawford, S. G. (2007). Motor and gestural performance in children with autism spectrum disorders, developmental coordination disorder, and/or attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 13(02). <https://doi.org/10.1017/S1355617707070270>
- Dibiase, R., & Gunnoe, J. (2004). Gender and culture differences in touching behavior. *The Journal of Social Psychology*, 144(1), 49–62.
- Dijkerman, H. C., & de Haan, E. H. F. (2007). Somatosensory processes subserving perception and action. *Behavioral and Brain Sciences*, 30(02), 189–201.
<https://doi.org/10.1017/S0140525X07001392>
- Dittrich, K., Bossert, M.-L., Rothe-Wulf, A., & Klauer, K. C. (2017). The joint flanker effect and the joint Simon effect: On the comparability of processes underlying joint compatibility effects. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(9), 1808–1823. <https://doi.org/10.1080/17470218.2016.1207690>
- Dittrich, K., Dolk, T., Rothe-Wulf, A., Klauer, K. C., & Prinz, W. (2013). Keys and seats: Spatial response coding underlying the joint spatial compatibility effect. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 75(8), 1725–1736. <https://doi.org/10.3758/s13414-013-0524-z>

- Dittrich, K., Rothe, A., & Klauer, K. C. (2012). Increased spatial salience in the social Simon task: A response-coding account of spatial compatibility effects. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(5), 911–929. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0304-1>
- Dix, A. J., Finlay, J. E., Abowd, G. D., & Beale, R. (1998). *Human-computer interaction*. London, UK: Pearson Education Limited.
- Dolk, T., Hommel, B., Prinz, W., & Liepelt, R. (2013). The (not so) social Simon effect: a referential coding account. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39(5), 1248.
- Dolk, T., Liepelt, R., Villringer, A., Prinz, W., & Ragert, P. (2012). Morphometric gray matter differences of the medial frontal cortex influence the social Simon effect. *NeuroImage*, 61(4), 1249–1254. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.03.061>
- Dsouza, A. J., Barretto, M., & Raman, V. (2010). Uncommon Sense: Interactive sensory toys that encourage social interaction among children with autism. In *IDC Workshop on Interactive Technologies for Children with Special Needs* (Vol. 12). Retrieved from <http://homepage.divms.uiowa.edu/~hourcade/idc2012-specialneeds/dsouza.pdf>
- Dunbar, R. I. M. (2010). The social role of touch in humans and primates: Behavioural function and neurobiological mechanisms. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(2), 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.07.001>
- Dunn, W. (1994). Performance of typical children on the sensory profile: An item analysis. *American Journal of Occupational Therapy*, 48(11), 967–974.
- Dunn, W. (1997). The impact of sensory processing abilities on the daily lives of young children and their families: A conceptual model. *Infants and Young Children*, 9, 23–35.
- Dunn, W. (1999). *Sensory profile: User's manual*. Psychological Corporation San Antonio, TX.

- Dunn, W., Myles, B. S., & Orr, S. (2002). Sensory processing issues associated with Asperger syndrome: A preliminary investigation. *American Journal of Occupational Therapy*, 56(1), 97–102.
- Duong, L., Andargie, M., Chen, J., Giakoumidis, N., & Eid, M. (2014). Aegis: A biofeedback adaptive alarm system using vibrotactile feedback (pp. 293–298). Presented at the Proceedings International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2014.6860755>
- Durango, I., Carrascosa, A., Gallud, J. A., & Penichet, V. M. R. (2017). Interactive fruit panel (IFP): a tangible serious game for children with special needs to learn an alternative communication system. *Universal Access in the Information Society*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10209-016-0517-5>
- Eastman Kodak Company (Ed.). (2004). *Kodak's ergonomic design for people at work* (2nd ed). Hoboken, NJ: Wiley.
- Emck, C., Bosscher, R., Beek, P., & Doreleijers, T. (2009). Gross motor performance and self-perceived motor competence in children with emotional, behavioural, and pervasive developmental disorders: a review. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 51(7), 501–517.
- Endsley, M. R. (2016). *Designing for situation awareness: An approach to user-centered design*. CRC press.
- Eriksen, C. W. (1995). The flankers task and response competition: A useful tool for investigating a variety of cognitive problems. *Visual Cognition*, 2(2–3), 101–118. <https://doi.org/10.1080/13506289508401726>
- Ermer, J., & Dunn, W. (1998). The sensory profile: a discriminant analysis of children with and without disabilities. *The American Journal of Occupational Therapy: Official Publication of the American Occupational Therapy Association*, 52(4), 283–290.

- Escobedo, L., Ibarra, C., Hernandez, J., Alvelais, M., & Tentori, M. (2014). Smart objects to support the discrimination training of children with autism. *Personal and Ubiquitous Computing*, 18(6), 1485–1497. <https://doi.org/10.1007/s00779-013-0750-3>
- Falcão, T. P., & Price, S. (2012). Independent exploration with tangibles for students with intellectual disabilities (p. 236). Presented at the 11th International Conference on Interaction Design and Children, Bremen, Germany: ACM Press.
<https://doi.org/10.1145/2307096.2307134>
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175–191. <https://doi.org/10.3758/BF03193146>
- Fechner, G. T. (1877). *In Sachen der Psychophysik*. Breitkopf und Härtel. Retrieved from <https://books.google.fr/books?id=V8lNaXjfkOIC>
- Ferrell, W. R., Gandevia, S. C., & McCloskey, D. I. (1987). The role of joint receptors in human kinaesthesia when intramuscular receptors cannot contribute. *The Journal of Physiology*, 386(1), 63–71. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1987.sp016522>
- Field, T. (2010). Touch for socioemotional and physical well-being: A review. *Developmental Review*, 30(4), 367–383. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2011.01.001>
- Filgueiras, T. S., Lima, A. C. O., Baima, R. L., Oka, G. T. R., Queiroz Cordovil, L. A., & Bastos, M. P. (2016). Vibrotactile sensory substitution on personal navigation: Remotely controlled vibrotactile feedback wearable system to aid visually impaired (pp. 1–5). Presented at the International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), IEEE. <https://doi.org/10.1109/MeMeA.2016.7533768>
- Fombonne, E. (2003). Epidemiological Surveys of Autism and Other Pervasive Developmental Disorders: An Update. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 33(4), 365–382. <https://doi.org/10.1023/A:1025054610557>

- Foss-Feig, J. H., Heacock, J. L., & Cascio, C. J. (2012). Tactile responsiveness patterns and their association with core features in autism spectrum disorders. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 6(1), 337–344. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2011.06.007>
- Freeman, B. J., Ritvo, E. R., & Schroth, P. C. (1984). Behavior Assessment of the Syndrome of Autism: Behavior Observation System. *Journal of the American Academy of Child Psychiatry*, 23(5), 588–594. [https://doi.org/10.1016/S0002-7138\(09\)60352-6](https://doi.org/10.1016/S0002-7138(09)60352-6)
- Galambos, J. A., Black, J. B., & Abelson, R. P. (2013). *Knowledge Structures*. London: Taylor and Francis.
- Gallace, A., & Spence, C. (2010). Touch and the body: The role of the somatosensory cortex in tactile awareness. *Psyche: An Interdisciplinary Journal of Research on Consciousness*.
- Gallotti, M., & Frith, C. D. (2013). Social cognition in the we-mode. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(4), 160–165. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.02.002>
- Gibson, James J. (1962). Observations on active touch. *Psychological Review*, 69(6), 477.
- Gibson, James Jerome. (1966). The senses considered as perceptual systems.
- Glazebrook, C. M., Elliott, D., & Lyons, J. (2006). A kinematic analysis of how young adults with and without autism plan and control goal-directed movements. *Motor Control*, 10(3), 244–264.
- Golden, C. J. (1980). The Luria-Nebraska neuropsychological battery: manual.
- Goodwin, G. M., McCloskey, D. I., & Matthews, P. B. C. (1972). Proprioceptive Illusions Induced by Muscle Vibration: Contribution by Muscle Spindles to Perception? *Science*, 175(4028), 1382–1384. <https://doi.org/10.1126/science.175.4028.1382>
- Gowen, E., & Hamilton, A. (2013). Motor Abilities in Autism: A Review Using a Computational Context. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 43(2), 323–344. <https://doi.org/10.1007/s10803-012-1574-0>

- Graesser, A. C., Woll, S. B., Kowalski, D. J., & Smith, D. A. (1980). Memory for typical and atypical actions in scripted activities. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning & Memory*, 6(5), 503–515. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.6.5.503>
- Grandin, T. (1992). An Inside View of Autism. In E. Schopler & G. B. Mesibov (Eds.), *High-Functioning Individuals with Autism* (pp. 105–126). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2456-8_6
- Green, D., Charman, T., Pickles, A., Chandler, S., Loucas, T., Simonoff, E., & Baird, G. (2009). Impairment in movement skills of children with autistic spectrum disorders. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 51(4), 311–316. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2008.03242.x>
- Greenspan, S. I., & Wieder, S. (1997). Developmental patterns and outcomes in infants and children with disorders in relating and communicating: A chart review of 200 cases of children with autistic spectrum diagnoses. *Journal of Developmental and Learning Disorders*, 1, 87–142.
- Grunwald, M. (Ed.). (2008). *Human Haptic Perception: Basics and Applications*. Basel: Birkhäuser Basel. <https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7612-3>
- Grynszpan, O., Weiss, P. L. T., Perez-Diaz, F., & Gal, E. (2014). Innovative technology-based interventions for autism spectrum disorders: a meta-analysis. *Autism: The International Journal of Research and Practice*, 18(4), 346–361. <https://doi.org/10.1177/1362361313476767>
- Guagnano, D., Rusconi, E., & Umiltà, C. A. (2010). Sharing a task or sharing space? On the effect of the confederate in action coding in a detection task. *Cognition*, 114(3), 348–355. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.10.008>
- Guerrero, L., Colomer, Y., Guàrdia, M. D., Xicola, J., & Clotet, R. (2000). Consumer attitude towards store brands. *Food Quality and Preference*, 11(5), 387–395.

- Gumtau, S., Newland, P., Creed, C., & Kunath, S. (2005). MEDiate - a responsive environment designed for children with autism (pp. 23–25). Presented at the Proceeding Accessible Design'05 Proceedings of the 2005 international conference on Accessible Design in the Digital World, Dundee, Scotland: BCS Learning & Development Ltd. Swindon, UK ©2005.
- Haghi, M., Thurow, K., & Stoll, N. (2017). A multi-layer multi-sensor wearable device for physical and chemical environmental parameters monitoring (CO & NO₂) (pp. 137–141). Presented at the International Conference on Smart Systems and Technologies (SST), IEEE. <https://doi.org/10.1109/DT.2017.8024285>
- Hasbroucq, T., & Guiard, Y. (1992). The effects of intensity and irrelevant location of a tactile stimulation in a choice reaction time task. *Neuropsychologia*, 30(1), 91–94. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(92\)90017-G](https://doi.org/10.1016/0028-3932(92)90017-G)
- Hayward, V., Astley, O. R., Cruz-Hernandez, M., Grant, D., & Robles-De-La-Torre, G. (2004). Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, 24(1), 16–29. <https://doi.org/10.1108/02602280410515770>
- Hayward, V., & Maclean, K. (2007). Do it yourself haptics: part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 14(4), 88–104. <https://doi.org/10.1109/M-RA.2007.907921>
- Heikkinen, J., Rantala, J., Olsson, T., Raisamo, R., Lylykangas, J., Raisamo, J., ... Ahmaniemi, T. (2009). Enhancing personal communication with spatial haptics: Two scenario-based experiments on gestural interaction. *Journal of Visual Languages & Computing*, 20(5), 287–304. <https://doi.org/10.1016/j.jvlc.2009.07.007>
- Hensel, H. (1973). Cutaneous Thermoreceptors. In D. Albe-Fessard, K. H. Andres, J. A. V. Bates, J. M. Besson, A. G. Brown, P. R. Burgess, ... Y. Zotterman, A. Iggo (Ed.), *Somatosensory System* (Vol. 2, pp. 79–110). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-65438-1_4

- Hertenstein, M. J., Holmes, R., McCullough, M., & Keltner, D. (2009). The communication of emotion via touch. *Emotion*, 9(4), 566.
- Hirstein, W., Iversen, P., & Ramachandran, V. S. (2001). Autonomic responses of autistic children to people and objects. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 268(1479), 1883–1888. <https://doi.org/10.1098/rspb.2001.1724>
- Hofvander, B., Delorme, R., Chaste, P., Nydén, A., Wentz, E., Ståhlberg, O., ... Gillberg, C. (2009). Psychiatric and psychosocial problems in adults with normal-intelligence autism spectrum disorders. *BMC Psychiatry*, 9(1), 35.
- Hölzl, M., Denker, G., Meier, M., & Wirsing, M. (2009). Constraint-Muse: A soft-constraint based system for music therapy. In *International Conference on Algebra and Coalgebra in Computer Science* (pp. 423–432). Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-03741-2_29
- Hommel, B., Colzato, L. S., & Van Den Wildenberg, W. P. (2009). How social are task representations? *Psychological Science*, 20(7), 794–798.
- Hommel, B., Colzato, L. S., & van den Wildenberg, W. P. M. (2009). How Social Are Task Representations? *Psychological Science*, 20(7), 794–798.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02367.x>
- Hommel, B., Proctor, R. W., & Vu, K.-P. L. (2004). A feature-integration account of sequential effects in the Simon task. *Psychological Research*, 68(1), 1–17.
<https://doi.org/10.1007/s00426-003-0132-y>
- Iani, C., Anelli, F., Nicoletti, R., Arcuri, L., & Rubichi, S. (2011). The role of group membership on the modulation of joint action. *Experimental Brain Research*, 211(3–4), 439. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2651-x>

- Ino, S., Shimizu, S., Odagawa, T., Sato, M., Takahashi, M., Izumi, T., & Ifukube, T. (1993). A tactile display for presenting quality of materials by changing the temperature of skin surface (pp. 220–224). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.1993.367718>
- Jacobson, R., D. (2009). Haptic or Touch-based Knowledge. *International Encyclopedia of Human Geography*, 13–18.
- Johnson, K. O., & Phillips, J. R. (1981). Tactile spatial resolution. I. Two-point discrimination, gap detection, grating resolution, and letter recognition. *Journal of Neurophysiology*, 46(6), 1177–1192. <https://doi.org/10.1152/jn.1981.46.6.1177>
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., & Mack, S. (2013). *Principles of neural science [Texte imprimé]*. New York : Chicago : San Francisco [etc.] : McGraw-Hill Medical. cop. 2013. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,url,shib,uid&db=catt04138a&AN=upmc.383898&lang=fr&site=eds-live>
- Kanner, L. (1943). Autistic disturbance of affective contact. *Nervous child*, 2, 217-250.
- Kern, J. K., Trivedi, M. H., Garver, C. R., Grannemann, B. D., Andrews, A. A., Savla, J. S., ... Schroeder, J. L. (2006). The pattern of sensory processing abnormalities in autism. *Autism*, 10(5), 480–494. <https://doi.org/10.1177/1362361306066564>
- Kientz, M. A., & Dunn, W. (1997). A comparison of the performance of children with and without autism on the Sensory Profile. *American Journal of Occupational Therapy*, 51(7), 530–537.
- Klempova, B., & Liepelt, R. (2016). Do you really represent my task? Sequential adaptation effects to unexpected events support referential coding for the joint Simon effect. *Psychological Research*, 80(4), 449–463. <https://doi.org/10.1007/s00426-015-0664-y>
- Kloeckner, A., Jutard, C., Bullinger, A., Nicoulaud, L., Tordjman, S., & Cohen, D. (2009). Intérêt de l'abord sensorimoteur dans les pathologies autistiques sévères I :

- introduction aux travaux d'André Bullinger. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 57(2), 154–159. <https://doi.org/10.1016/j.neurenf.2008.12.002>
- Landa, R., & Garrett-Mayer, E. (2006). Development in infants with autism spectrum disorders: a prospective study: Development in infants with autism spectrum disorders. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 47(6), 629–638. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2006.01531.x>
- Larguier des Bancelles, J. (1902). Frey et Metzner Le seuil de discrimination tactile dans l'excitation successive de deux points de la peau. *L'Année Psychologique*, 296–299.
- Le Corre, F. (2014). Distinguishing the senses: individuation and classification.
- Le, H. H., Loureiro, R. C., Dussopt, F., Phillips, N., Zivanovic, A., & Loomes, M. J. (2014). Soundscape and haptic cues in an interactive painting: a study with autistic children. In *Biomedical Robotics and Biomechatronics (2014 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on)* (pp. 375–380). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6913805
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19(3), 342–368.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (2009). Haptic perception: A tutorial. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71(7), 1439–1459.
- Lee, J., & Obinata, G. (2015). Interactive educational material for children with ASD (pp. 1–6). Presented at the 26th International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, Nagoya, Japan: IEEE. <https://doi.org/10.1109/MHS.2015.7438262>
- Lee, J.-H., Choi, E., Song, M., & Shin, B.-S. (2014). Dreamware: edutainment system for children with developmental disability. *Multimedia Tools and Applications*, 68(2), 305–319. <https://doi.org/10.1007/s11042-012-1089-x>

- Lee, M. H., & Nicholls, H. R. (1999). Review Article Tactile sensing for mechatronics—a state of the art survey. *Mechatronics*, 9(1), 1–31.
- Leekam, S. R., Nieto, C., Libby, S. J., Wing, L., & Gould, J. (2007). Describing the Sensory Abnormalities of Children and Adults with Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 37(5), 894–910. <https://doi.org/10.1007/s10803-006-0218-7>
- Liepelt, R., Wenke, D., Fischer, R., & Prinz, W. (2011a). Trial-to-trial sequential dependencies in a social and non-social Simon task. *Psychological Research*, 75(5), 366–375. <https://doi.org/10.1007/s00426-010-0314-3>
- Liepelt, R., Wenke, D., Fischer, R., & Prinz, W. (2011b). Trial-to-trial sequential dependencies in a social and non-social Simon task. *Psychological Research*, 75(5), 366–375. <https://doi.org/10.1007/s00426-010-0314-3>
- Lipsky, D. (2011). *From anxiety to meltdown how individuals on the Autism spectrum deal with anxiety, experience meltdowns, manifest tantrums, and how you can intervene effectively*. London; Philadelphia: Jessica Kingsley Publishers. Retrieved from <http://site.ebrary.com/lib/uqat/Doc?id=10493425>
- Little, L. M., Ausderau, K., Sideris, J., & Baranek, G. T. (2015). Activity Participation and Sensory Features Among Children with Autism Spectrum Disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 45(9), 2981–2990. <https://doi.org/10.1007/s10803-015-2460-3>
- Liu, T., & Breslin, C. M. (2013). Fine and gross motor performance of the MABC-2 by children with autism spectrum disorder and typically developing children. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 7(10), 1244–1249. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2013.07.002>

- Lord, C., Risi, S., Lambrecht, L., Cook, E. H., Leventhal, B. L., DiLavore, P. C., ... Rutter, M. (2000). The Autism Diagnostic Observation Schedule—Generic: A Standard Measure of Social and Communication Deficits Associated with the Spectrum of Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 30(3), 205–223.
<https://doi.org/10.1023/A:1005592401947>
- Lord, Catherine, Rutter, M., & Le Couteur, A. (1994). Autism Diagnostic Interview-Revised: a revised version of a diagnostic interview for caregivers of individuals with possible pervasive developmental disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 24(5), 659–685.
- MacLean, Karon E. (2008a). Haptic Interaction Design for Everyday Interfaces. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 4(1), 149–194.
<https://doi.org/10.1518/155723408X342826>
- MacLean, Karon E. (2008b). Haptic Interaction Design for Everyday Interfaces. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 4(1), 149–194.
<https://doi.org/10.1518/155723408X342826>
- MacLean, K.E., & Hayward, V. (2008). Do It Yourself Haptics: Part II [Tutorial]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 15(1), 104–119. <https://doi.org/10.1109/M-RA.2007.914919>
- Marco, E. J., Hinkley, L. B., Hill, S. S., & Nagarajan, S. S. (2011). *Sensory processing in autism: a review of neurophysiologic findings*. Nature Publishing Group. Retrieved from <http://www.nature.com/pr/journal/v69/n5-2/full/pr9201193a.html>
- Mari, M., Castiello, U., Marks, D., Marraffa, C., & Prior, M. (2003). The reach-to-grasp movement in children with autism spectrum disorder. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 358(1430), 393–403.

- Maville, J. A., Bowen, J. E., & Benham, G. (2008). Effect of Healing Touch on Stress Perception and Biological Correlates: *Holistic Nursing Practice*, 22(2), 103–110.
<https://doi.org/10.1097/01.HNP.0000312659.21513.f9>
- Mayhew, D. J. (1999). *The usability engineering lifecycle: a practitioner's handbook for user interface design*. San Francisco, Calif: Morgan Kaufmann Publishers.
- McAlonan, G. M., Daly, E., Kumari, V., Critchley, H. D., van Amelsvoort, T., Suckling, J., ... Murphy, D. G. M. (2002). Brain anatomy and sensorimotor gating in Asperger's syndrome. *Brain: A Journal of Neurology*, 125(Pt 7), 1594–1606.
- McIntosh, D., Miller, L., Shyu, V., & Dunn, W. (1999). Development and validation of the short sensory profile. *Sensory Profile Manual*, 59–73.
- McIntosh, D. N., Miller, L. J., Shyu, V., & Hagerman, R. J. (1999). Sensory-modulation disruption, electrodermal responses, and functional behaviors. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 41(9), 608–615.
- McPhillips, M., Finlay, J., Bejerot, S., & Hanley, M. (2014). Motor Deficits in Children With Autism Spectrum Disorder: A Cross-Syndrome Study: Motor deficits in children with ASD. *Autism Research*, 7(6), 664–676. <https://doi.org/10.1002/aur.1408>
- Medina, J., McCloskey, M., Branch, H., & Rapp, B. (2014). Somatotopic representation of location: Evidence from the Simon effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40(6), 2131–2142.
<https://doi.org/10.1037/a0037975>
- Medina, J., McCloskey, M., Coslett, H. B., & Rapp, B. (2014). Somatotopic representation of location: Evidence from the Simon effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40(6), 2131–2142.
<https://doi.org/10.1037/a0037975>

- Miller, L. J., Anzalone, M. E., Lane, S. J., Cermak, S. A., & Osten, E. T. (2007). Concept Evolution in Sensory Integration: A Proposed Nosology for Diagnosis. *American Journal of Occupational Therapy*, 61(2), 135–140.
<https://doi.org/10.5014/ajot.61.2.135>
- Ming, X., Brimacombe, M., & Wagner, G. C. (2007). Prevalence of motor impairment in autism spectrum disorders. *Brain and Development*, 29(9), 565–570.
- Minshew, N. J., & Hobson, J. A. (2008). Sensory Sensitivities and Performance on Sensory Perceptual Tasks in High-functioning Individuals with Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 38(8), 1485–1498. <https://doi.org/10.1007/s10803-007-0528-4>
- Montagna, W. (1956). The Structure and Function of. *Skin*.
- Morrison, I., Löken, L. S., & Olausson, H. (2010). The skin as a social organ. *Experimental Brain Research*, 204(3), 305–314. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-2007-y>
- Mustafa, M., Arshad, H., & Zaman, H. B. (2013). Framework Methodology of the Autism Children -- Vibratory Haptic Interface (AC-VHI) (pp. 201–206). Presented at the International Conference on Advanced Computer Science Applications and Technologies(ACSAT), IEEE. <https://doi.org/10.1109/ACSAT.2013.47>
- Nakano, T., Kato, N., & Kitazawa, S. (2012). Superior haptic-to-visual shape matching in autism spectrum disorders. *Neuropsychologia*, 50(5), 696–703.
- Nazarali, N., Glazebrook, C. M., & Elliott, D. (2009). Movement planning and reprogramming in individuals with autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 39(10), 1401–1411.
- Nogier, J.-F. (2009). *Ergonomie du logiciel et design web: le manuel des interfaces utilisateur*. Paris: Dunod.

- Ochoa, J., & Torebjörk, E. (1989). Sensations evoked by intraneural microstimulation of C nociceptor fibres in human skin nerves. *The Journal of Physiology*, 415(1), 583–599. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1989.sp017737>
- Olson, M., & Sneed, N. (1995). Anxiety and therapeutic touch. *Issues in Mental Health Nursing*, 16(2), 97–108.
- O’neill, M., & Jones, R. S. (1997). Sensory-perceptual abnormalities in autism: a case for more research? *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 27(3), 283–293.
- OpenStax. (n.d.). Retrieved from [https :
//cnx.org/contents/FPtK1zmf@8.25 :fEI3C8Ot@10/Preface](https://cnx.org/contents/FPtK1zmf@8.25:fEI3C8Ot@10/Preface), CC BY 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30147919>
- Organisation internationale de normalisation, I. (2010, March). ISO 9241-210:2010 Ergonomics of human-system interaction - Part 210: Human-centred design for interactive systems. *Organisation Internationale de Normalisation, Online Browser Platform*. Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-210:ed-1:v1:fr>
- Ornitz, E. M., Guthrie, D., & Farley, A. H. (1977). The early development of autistic children. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 7(3), 207–229.
- Pernon, E., Pry, R., & Baghdadli, A. (2007). Autism: tactile perception and emotion. *Journal of Intellectual Disability Research*, 51(8), 580–587. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2006.00931.x>
- Perrin, J., & Maffre, T. (2013). *Autisme et psychomotricité*. de Boeck Solal.
- Pérusse-Lambert, A. (2016). Engaging children with autism in a shape perception task using a haptic force feedback interface. In *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Multimodal Interaction* (pp. 532–535). ACM. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2997614>

- Pérusse-Lambert, A., Anastassova, M., Boukallel, M., Chetouani, M., & Grynszpan, O. (2018). Interfaces haptiques et tactiles pour l'autisme: une revue systématique. *Enfance*, (1), 65–90.
- Phelan, J. E. (2009). Exploring the use of touch in the psychotherapeutic setting: A phenomenological review. *Psychotherapy: Theory, Research, Practice, Training*, 46(1), 97.
- Pinborough-Zimmerman, J., Bakian, A. V., Fombonne, E., Bilder, D., Taylor, J., & McMahon, W. M. (2012). Changes in the administrative prevalence of autism spectrum disorders: contribution of special education and health from 2002–2008. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 42(4), 521–530.
- Postman, L., Bruner, J. S., & McGinnies, E. (1948). Personal values as selective factors in perception. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, 43(2), 142.
- Prado, C. (2013). Le coût économique et social de l'autisme. *Droit, Déontologie & Soin*, 13(1), 46–50.
- Pusponegoro, H. D., Efar, P., Soedjatmiko, Soebadi, A., Firmansyah, A., Chen, H.-J., & Hung, K.-L. (2016). Gross Motor Profile and Its Association with Socialization Skills in Children with Autism Spectrum Disorders. *Pediatrics & Neonatology*. <https://doi.org/10.1016/j.pedneo.2016.02.004>
- Puts, N. A. J., Wodka, E. L., Tommerdahl, M., Mostofsky, S. H., & Edden, R. A. E. (2014). Impaired tactile processing in children with autism spectrum disorder. *Journal of Neurophysiology*, 111(9), 1803–1811. <https://doi.org/10.1152/jn.00890.2013>
- Quilliam, T. A. (1978). The structure of finger print skin. *Active Touch*, 1–18.
- Ramnarine-Singh, S. (1999). The surgical significance of therapeutic touch. *AORN Journal*, 69(2), 358–369.

- Reitan, R. M., & Wolfson, D. (1994). A selective and critical review of neuropsychological deficits and the frontal lobes. *Neuropsychology Review*, 4(3), 161–198.
- Remland, M. S., Jones, T. S., & Brinkman, H. (1995). Interpersonal distance, body orientation, and touch: Effects of culture, gender, and age. *The Journal of Social Psychology*, 135(3), 281–297.
- Révész, G. (1950). Psychology and art of the blind.
- Reynier, F., & Hayward, V. (1993). Summary of the Kinesthetic and Tactile Function of the Human Upper Extremities. *McGill Research Center for Intelligent Machines, McGill University, Montreal, Canada*.
- Richard, D., Camps, J.-F., & Eugène, D. (2013). *Neurosciences - Tout le cours en fiches: 190 fiches de cours, cas cliniques, QCM corrigés et bonus web*. Retrieved from <http://sbiproxy.uqac.ca/login?url=http://international.scholarvox.com/book/88815581>
- Riener, A., & Ferscha, A. (2008). Raising Awareness about Space via Vibro-Tactile Notifications. In D. Roggen, C. Lombriser, G. Tröster, G. Kortuem, & P. Havinga (Eds.), *Smart Sensing and Context* (Vol. 5279, pp. 235–245). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88793-5_18
- Rinehart, N. J., Bradshaw, J. L., Brereton, A. V., & Tonge, B. J. (2001). Movement preparation in high-functioning autism and Asperger disorder: a serial choice reaction time task involving motor reprogramming. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 31(1), 79–88.
- Ringland, K. E., Zalapa, R., Neal, M., Escobedo, L., Tentori, M. E., & Hayes, G. R. (2014a). SensoryPaint: a natural user interface supporting sensory integration in children with neurodevelopmental disorders (pp. 1681–1686). Presented at the CHI, One of a CHInd, Toronto, ON, Canada: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2559206.2581249>

- Ringland, K. E., Zalapa, R., Neal, M., Escobedo, L., Tentori, M., & Hayes, G. R. (2014b). SensoryPaint: a multimodal sensory intervention for children with neurodevelopmental disorders (pp. 873–884). Presented at the UBIComp'14, Seattle, WA, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2632048.2632065>
- Riquelme, I., Hatem, S. M., & Montoya, P. (2016). Abnormal Pressure Pain, Touch Sensitivity, Proprioception, and Manual Dexterity in Children with Autism Spectrum Disorders. *Neural Plasticity*, 2016, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2016/1723401>
- Robins, B., Amirabdollahian, F., Ji, Z., & Dautenhahn, K. (2010). Tactile interaction with a humanoid robot for children with autism: A case study analysis involving user requirements and results of an initial implementation (pp. 704–711). Presented at the 19th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, Principe di Piemonte-Viareggio, Italy: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2010.5598641>
- Robins, B., & Dautenhahn, K. (2014). Tactile Interactions with a Humanoid Robot: Novel Play Scenario Implementations with Children with Autism. *International Journal of Social Robotics*, 6(3), 397–415. <https://doi.org/10.1007/s12369-014-0228-0>
- Robins, B., Dautenhahn, K., & Dickerson, P. (2012). Embodiment and Cognitive Learning—Can a Humanoid Robot Help Children with Autism to Learn about Tactile Social Behaviour? In *Social Robotics* (pp. 66–75). Springer. Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-34103-8_7
- Rochat, P., & Senders, S. (1991). Active Touch in Infancy : Action Systems in Development. In *Newborn attention: Biological constraints and the influence of experience* (pp. 412–442). Retrieved from <http://www.psychology.emory.edu/cognition/rochat/lab/ActiveTouchinInfancy.pdf>

- Rosch, E. (1975). Cognitive representations of semantic categories. *Journal of Experimental Psychology: General*, 104(3), 192–233. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.104.3.192>
- Ruys, K. I., & Aarts, H. (2010). When competition merges people's behavior: Interdependency activates shared action representations. *Journal of Experimental Social Psychology*, 46(6), 1130–1133. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2010.05.016>
- Ryan, S. (2010). 'Meltdowns', surveillance and managing emotions; going out with children with autism. *Health & Place*, 16(5), 868–875. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2010.04.012>
- Sacrey, L.-A. R., Germani, T., Bryson, S. E., & Zwaigenbaum, L. (2014). Reaching and grasping in autism spectrum disorder: a review of recent literature. *Frontiers in Neurology*, 5, 6.
- Sakia, R. (1992). The Box-Cox transformation technique: a review. *The Statistician*, 169–178.
- Salter, T., Davey, N., & Michaud, F. (2014). Designing & developing QueBall, a robotic device for autism therapy. In *Robot and Human Interactive Communication, 2014 RO-MAN: The 23rd IEEE International Symposium on* (pp. 574–579). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6926314
- Salter, T., Werry, I., & Michaud, F. (2008). Going into the wild in child–robot interaction studies: issues in social robotic development. *Intelligent Service Robotics*, 1(2), 93–108. <https://doi.org/10.1007/s11370-007-0009-9>
- Salzer, Y., Aisenberg, D., Oron-Gilad, T., & Henik, A. (2014a). In Touch With the Simon Effect *The first two authors contributed equally. *Experimental Psychology*, 61(3), 165–179. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000236>
- Salzer, Y., Aisenberg, D., Oron-Gilad, T., & Henik, A. (2014b). In Touch With the Simon Effect *The first two authors contributed equally. *Experimental Psychology*, 61(3), 165–179. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000236>

- Sampath, H., Agarwal, R., & Indurkha, B. (2013). Assistive technology for children with autism - lessons for interaction design (pp. 325–333). Presented at the Proceedings of the 11th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction, ACM Press.
<https://doi.org/10.1145/2525194.2525300>
- Sebanz, N., Knoblich, G., & Prinz, W. (2003a). Representing others' actions: just like one's own? *Cognition*, 88(3), B11–B21. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(03\)00043-X](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(03)00043-X)
- Sebanz, N., Knoblich, G., & Prinz, W. (2003b). Representing others' actions: just like one's own? *Cognition*, 88(3), B11–B21. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(03\)00043-X](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(03)00043-X)
- Sebanz, N., Knoblich, G., Prinz, W., & Wascher, E. (2006). Twin Peaks: An ERP Study of Action Planning and Control in Coacting Individuals. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(5), 859–870. <https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.5.859>
- Sebanz, N., Knoblich, G., Stumpf, L., & Prinz, W. (2005). Far from action-blind: Representation of others' actions in individuals with Autism. *Cognitive Neuropsychology*, 22(3–4), 433–454. <https://doi.org/10.1080/02643290442000121>
- Sebanz, N., Rebbel, D., Knoblich, G., Prinz, W., & Frith, C. D. (2007). Is it really my turn? An event-related fMRI study of task sharing. *Social Neuroscience*, 2(2), 81–95.
<https://doi.org/10.1080/17470910701237989>
- Segond, H., & Maris, S. (2008). IHM de suppléance sensorielle visuo-tactile pour aveugles et autistes (pp. 93–100). Presented at the Proceeding IHM '08 Proceedings of the 20th Conference on l'Interaction Homme-Machine, ACM Press.
<https://doi.org/10.1145/1512714.1512732>
- Seo, J. H., Sungkajun, A., & Suh, J. (2015). Touchology: Towards Interactive Plant Design for Children with Autism and Older Adults in Senior Housing (pp. 893–898). Presented at the Proceeding CHI EA '15 Proceedings of the 33rd Annual ACM

- Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing System, Seoul, Korea: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2702613.2732883>
- Sherrington, C. S. (1906). Observations on the scratch-reflex in the spinal dog. *The Journal of Physiology*, 34(1–2), 1–50.
- Shim, L., Liu, P., Politis, I., Regener, P., Brewster, S., & Pollick, F. (2015). Evaluating multimodal driver displays of varying urgency for drivers on the autistic spectrum (pp. 133–140). Presented at the Proceeding AutomotiveUI '15 Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2799250.2799261>
- Shimoga, K. B. (1993). A survey of perceptual feedback issues in dexterous telemanipulation. II. Finger touch feedback (pp. 271–279). Presented at the Virtual Reality Annual International Symposium, 1993., 1993 IEEE, IEEE.
- Sigman, M. (1994). What Are the Core Deficits in Autism? In *Atypical cognitive deficits in developmental disorders: implications for brain function* (Hillsdale NJ, Lawrence Erlbaum Associates, pp. 139–158). National Institute of Neurological Disorders and Stroke: Broman, S. H. (ed); Grafman, J. (ed).
- Simm, W., Ferrario, M. A., Gradinar, A., & Whittle, J. (2014). Prototyping ‘clasp’: implications for designing digital technology for and with adults with autism (pp. 345–354). Presented at the ACM Conference on Designing Interactive Systems, Vancouver, BC, Canada: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2598510.2600880>
- Simon, J. R., & Wolf, J. D. (1963). CHOICE REACTION TIME AS A FUNCTION OF ANGULAR STIMULUS-RESPONSE CORRESPONDENCE AND AGE. *Ergonomics*, 6(1), 99–105. <https://doi.org/10.1080/00140136308930679>
- Sinha, N., Kumar, P., Singh, M. P., & Singh, J. P. (2015). Driver Alert System for Accident Avoidance (pp. 1293–1297). Presented at the Fifth International Conference on

- Communication Systems and Network Technologies, IEEE.
<https://doi.org/10.1109/CSNT.2015.260>
- Söchting, E., Hartl, J., Riederer, M., Schönauer, C., Kaufmann, H., & Lamm, C. (2015). Development of Tests to Evaluate the Sensory Abilities of Children with Autism Spectrum Disorder. *Procedia Computer Science*, 67, 193–203.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.09.263>
- Squire, L. R. (2013). *Fundamental neuroscience*. Amsterdam; Boston: Elsevier/Academic Press.
- Stillman, B. C. (2002). Making Sense of Proprioception. *Physiotherapy*, 88(11), 667–676.
[https://doi.org/10.1016/S0031-9406\(05\)60109-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9406(05)60109-5)
- Streri, A., & Féron, J. (2005). The development of haptic abilities in very young infants: From perception to cognition. *Infant Behavior and Development*, 28(3), 290–304.
<https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2005.05.004>
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643–662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>
- Suarez, M. A. (2012). Sensory processing in children with autism spectrum disorders and impact on functioning. *Pediatric Clinics of North America*, 59(1), 203–214, xii–xiii.
<https://doi.org/10.1016/j.pcl.2011.10.012>
- Taheri, A. R., Alemi, M., Meghdari, A., PourEtemad, H. R., & Basiri, N. M. (2014). Social robots as assistants for autism therapy in Iran: Research in progress. In *Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2014 Second RSI/ISM International Conference on* (pp. 760–766). IEEE. Retrieved from
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6990995

- Talay-Ongan, A., & Wood, K. (2000). Unusual sensory sensitivities in autism: A possible crossroads. *International Journal of Disability, Development and Education*, 47(2), 201–212.
- Tang, F., McMahan, R. P., & Allen, T. T. (2014). Development of a low-cost tactile sleeve for autism intervention. In *Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE), 2014 IEEE International Symposium on* (pp. 35–40). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6954328
- Tavassoli, T., Hoekstra, R. A., & Baron-Cohen, S. (2014). The Sensory Perception Quotient (SPQ): development and validation of a new sensory questionnaire for adults with and without autism. *Molecular Autism*, 5(1), 29. <https://doi.org/10.1186/2040-2392-5-29>
- Tomchek, S. D., & Dunn, W. (2007). Sensory processing in children with and without autism: a comparative study using the short sensory profile. *The American Journal of Occupational Therapy: Official Publication of the American Occupational Therapy Association*, 61(2), 190–200.
- Tommerdahl, M., Tannan, V., Cascio, C., Baranek, G., & Whitsel, B. (2007). Vibrotactile adaptation fails to enhance spatial localization in adults with autism. *Brain Research*, 1154, 116–123.
- Torng, C.-S. (2013). The Relationship Between Nature Experiential Activities and Multiple Intelligences Development with Autism Children (pp. 683–687). Presented at the Seventh International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems, IEEE. <https://doi.org/10.1109/CISIS.2013.122>
- Toshniwal, S., Dey, P., Rajput, N., & Srivastava, S. (2015). VibRein: An Engaging and Assistive Mobile Learning Companion for Students with Intellectual Disabilities (pp. 20–28). Presented at the Proceeding OzCHI '15 Proceedings of the Annual Meeting of

- the Australian Special Interest Group for Computer Human Interaction, ACM Press.
<https://doi.org/10.1145/2838739.2838751>
- Tsai, C.-C., Kuo, W.-J., Hung, D. L., & Tzeng, O. J. L. (2008). Action Co-representation is Tuned to Other Humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(11), 2015–2024.
<https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20144>
- Varalakshmi, B. D., Thriveni, J., Venugopal, K. R., & Patnaik, L. M. (2012). Haptics: state of the art survey. *International Journal of Computer Science Issues*, 9(5), 234–244.
- Vaucelle, C., Bonanni, L., & Ishii, H. (2009). Design of haptic interfaces for therapy. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 467–470). ACM. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1518776>
- Vikis-Freibergs, V. (1994). Psycholinguistique expérimentale. *Traité de Psychologie Expérimentale*, 2, 333–387.
- Weber, E. (1978). The sense of touch (HE Ross, Ed. & Trans.). *London: Academic.(Original Work Published 1834).*
- Westeyn, T. L., Abowd, G. D., Starner, T. E., Johnson, J. M., Presti, P. W., & Weaver, K. A. (2012). Monitoring children's developmental progress using augmented toys and activity recognition. *Personal and Ubiquitous Computing*, 16(2), 169–191.
<https://doi.org/10.1007/s00779-011-0386-0>
- Williams, D. (1995). *Somebody somewhere: breaking free from the world of autism*. New York: Times Books.
- Wing, L., Leekam, S. R., Libby, S. J., Gould, J., & Larcombe, M. (2002). The diagnostic interview for social and communication disorders: Background, inter-rater reliability and clinical use. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 43(3), 307–325.
- Yin, T.-C., & Tung, F.-W. (2013). Design and Evaluation of Applying Robots to Assisting and Inducing Children with Autism in Social Interaction. In C. Stephanidis & M.

Antona (Eds.), *Universal Access in Human-Computer Interaction. User and Context Diversity* (Vol. 8010, pp. 524–533). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-39191-0_57

Yunqing Wang, & Kuchenbecker, K. J. (2012). HALO: Haptic Alerts for Low-hanging Obstacles in white cane navigation (pp. 527–532). Presented at the Haptics Symposium (HAPTICS), IEEE. <https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2012.6183842>

Zajonc, R. B. (1965). Social Facilitation. *Science*, 149(3681), 269–274.

Zhao, M., Zhao, Q., Liu, Q., Li, N., Peng, H., & Hu, B. (2013). A Humanoid Robot Used as an Assistive Intervention Tool for Children with Autism Spectrum Disorder: A Preliminary Research. In *Brain and Health Informatics* (pp. 336–347). Springer.
Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-02753-1_34

Annexes

Annexe 1 – Exemples pour les catégories issus du corpus des entretiens semi-dirigés

Catégorie niveau 1	Catégorie niveau 2	Catégories niveau 3 « Exemple issus du corpus »
Pratique	Activités	Activités motrices « Et je fais principalement des activités à la fois motrice et à la fois à table sur des activités plus de motricité fine »
		Activités de socialisation « Pour d'autres du coup on fait un atelier émotions. On va commencer en individuel et là on essaie, petit à petit, de faire du groupe. On en prend deux ensembles pour voir comment ils réagissent et comment ils interagissent surtout. »
		Activités cognitives « [...] je vais avoir du matériel à disposition, y a des épreuves où on peut leur demander par exemple de catégoriser, y'en a d'autres on peut leur demander de faire du tri »
		Activités à bases sensorielles « Après il y a toute la dimension effectivement sensorielle donc le travail avec la pâte à modeler, la terre, le sable, tout ce qui est travail de transvasement. »
		Examens cliniques « A la base moi je dois faire un examen clinique. Donc c'est vraiment l'auscultation du patient. »
		Observations « [...] et en lui demandant d'avoir des temps en chambre qui sont structurées pour qu'elle puisse s'autonomiser. Afin de ne pas être en recherche permanente. »
	Conditions de travail	Collaborations avec les collègues et partage d'informations « Le fait d'en discuter entre nous ça me permet déjà, moi, de prendre du recul sur ce que j'ai pu évaluer et donc d'avoir des idées. Mais aussi à mes collègues qu'ils puissent me conseiller, » Tiens, est ce que tu as essayé ça ? Ça fonctionne «. »
	Outils	Renforceurs (dont alimentaires) « Nous on parle de renforceurs. On essaye de garder alors récompense après si on l'utilise de manière très technique ce n'est pas un problème mais en salle on essaye de parler à nos

		<i>collègues de renforçateur positif. Mais c'est l'idée. »</i>
		Rituels « [...] du moment que ça devient un peu routinier et que c'est Vraiment bien stabilisé au niveau du temps, de l'espace, ça va. »
	Besoins	Adaptation du professionnel au patient. « ça dépend des patients, ça dépend la disponibilité. Ça dépend où ils en sont. »
		Manque de support matériel et technique « mais on n'a pas le matériel nécessaire et surtout adapté pour pouvoir les évaluer à hauteur de leur capacité aujourd'hui. »
		Manque de temps pour les patients « C'est un problème de temps en fait. Soit on dédie le temps à ça. On dit "bah voilà, on donne le temps aux professionnels de faire ce genre de chose" soit on leur donne pas. Du coup, on ne le fait pas. Et là, en l'occurrence à l'HDJ, le temps c'est un gros problème. »
	Besoins pour le travail avec les TSA (la mise en place d'activités, d'outils, de relations)	Instaurer la notion de plaisir « Du coup, il y a tout un travail de plaisir dans la relation à mettre en place avant. »
IHM pour entrer en relation avec les patients avec TSA « Et je pense, qu'avec les tablettes et les ordi, enfin le matériel numérique on a quand même plus souvent quelque chose qui guide énormément dans l'interaction. »		
IHM plus adaptable aux différents patients « [...] maintenant avec le numérique c'est possible, oui de choisir une thématique. »		
Attitude envers les nouveaux moyens de prise en charge des patients	Conciliation entre IHM et Pratique	Activité sur Tablette et Ordinateur « Mais moi personnellement ça m'est arrivé plus tôt des choses de ludique avec des enfants, mettre des petites vidéos sur la tablette ou des musiques ou même des films. »
		Activité Robot Nao « Pour le robot, ça suscite l'intérêt des enfants souvent, et des réactions voilà. Donc nous on utilise le robot au sein d'un groupe conte. »
		Activité Objets Vibrants « Dès que je cherche à attirer l'attention sur un flux sensoriel en particulier c'est sûr que les objets vibrants, d'un point de vue tactile, d'un point de vue proprioceptif c'est intéressant »
	Ouverture à l'utilisation des IHM	Ouvert à tester des IHM « Je me suis plus concentré sur tout ce qui est tablettes, parce que du coup j'ai vu qu'il y a de nouvelles tablettes qui sont sorties, spécialisée dans l'autisme avec des programmes, avec les logiciels type. »

		Idées d'IHM et d'utilisation dans leurs pratiques « <i>L'objectif c'est de faire un gant qui s'illumine quand on appuie dessus pour que eux en retour ils savent que c'est la bonne information et que c'est ce geste qu'il faut utiliser pour se doucher.</i> »
	Non conciliation des IHM et de leurs pratiques	Manque de compétence « <i>Je pense que c'est plus moi qui me mets un frein que ce qui manquera avec la tablette. C'est plus moi dans ma pratique. Le fait de ne pas avoir été formée, de ne pas avoir de connaissance là- dessus qui fait que je ne me sentirais pas à l'aise...</i> »
		Inquiétude de dépendance aux écrans « <i>alors j'avoue que j'ai assez peur des écrans. Parce que... mais aussi c'est parce que j'ai d'autres populations en parallèle où j'ai vu tellement d'effets néfastes des écrans, que moi personnellement j'ai une appréhension autour de l'utilisation des écrans.</i> »
Attitude envers l'interface DEMA		Réfractaires « <i>Je n'aime pas trop les trucs informatique, je n'aime pas trop les jeux PAC man sur les portables là... je ne peux pas. Ce n'est pas que c'est une phobie mais c'est l'anti moi.</i> »
		Approche à la fois motrice et sensorielle « <i>Déjà je pense que pour faire, il faut se sentir. Et pour se sentir, c'est à dire que c'est physique en fait. Et ça c'est la sensation.</i> »
		Sa polyvalence en termes de tâche et de patients « <i>On peut être à la fois dans le sensoriel et dans l'instrumental, le graphisme etc. c'est très intéressant</i> » « <i>Ça donne vraiment beaucoup de possibilité en fonction de ce qu'on va y rajouter.</i> »
		Ludique et Attirante « <i>[...] je trouve ça à l'air d'un jeu.</i> »
		Technologique –industrielle et volumineuse « <i>Non effectivement ça fait un peu brut, industriel etc... Mais c'est plutôt plus dans l'air du temps donc voilà.</i> »
		Sécurité « <i>Je réfléchis à mes patients notamment si on le met dans le service faudra carrément les cacher.</i> »
		Joystick interchangeable « <i>Après tout dépend de la motricité qu'ils ont .ça, je trouve ça intéressant parce qu'ils peuvent plus facilement le prendre comme ça, mais c'est de manière générale. Ça ne me choque pas avec les patients que je peux avoir dans le service.</i> »

		<i>Celle-là je ne sais pas s'ils seraient à l'aise avec. »</i>
		Nécessite un petit temps d'adaptation « OK, c'est juste ça qui me surprend même si en fait une fois qu'on a compris ça fonctionne mais voilà. »
		Ajout de stimulations sensorielles variées (vibrotactile, textures, écran, son) « Soit des odeurs, soit une musique pour le côté voilà... les autres sens, pourquoi. C'est vrai que plus il y a de stimulations plus c'est sympathique. »
		Caractéristiques du logiciel complémentaire de l'interface DEMA « L'enregistrement des données etc. de façon simplifiée parce que ça a l'air très compliqué. » « C'est vrai qu'il faut réussir à faciliter les choses pour que ça prenne pas trois heures, pour que ça ne soit pas trop compliqué. »
Usages Potentiels de l'interface DEMA	Activités potentielles	Activités graphique (dessin- écriture) « Tout ce qui est graphique. Je pense qu'il y eu beaucoup de chose à explorer parce que ça permet de faire des tracés justement dans toutes les directions et sur un assez grand format, c'est intéressant. Tout ce qui est un plus scolaire mais pas seulement du graphisme, gestion de l'espace, de l'acte graphique, plus tout ce qui est lettre. »
		Activités motrices (retour de force, exploration/gestion de l'espace) « Après on est moins dans des exercices de motricité fine vu qu'il y a un joystick, forcément. Mais après nous la plupart n'ont pas la motricité fine du coup ça peut être aussi intéressant de revenir sur les prémices de la motricité en partant du global. Avec des prises plutôt globales du coup. Ça c'est intéressant. »
		Socialisation « [...] Soit faire un dessin à deux, soit construire quelque chose à deux mais en tout cas, avoir un truc, où l'enfant ne peut pas jouer tout seul. »
		Activités de discrimination sensorielles « en partant des modalités sensorielles qui l'intéressent le plus et d'élargir au maximum les champs, qu'il puisse découvrir. »
Patients TSA	Caractéristiques des patients	
	Difficultés syndrome	Hétérogénéité « ça dépend aussi des autistes, ils ne sont pas tous pareils. »

		Auto et hétéro agressivité « Les gros troubles du comportement, trouble de l'hétéro agressivité. De manière générale, hétéro agressivité, auto agressivité. »
		Troubles de la communication et des interactions « Bah il y en a qui parlent. Ils ne sont pas tous non verbaux. Ceux qui ne parlaient pas bougeaient. C'est pas parce qu'ils ne parlaient pas qu'ils n'avaient pas envie de quand même lever la main pour prendre la parole, qui finalement ne se donnait pas. »
		Particularités sensorielles (dont tactiles) « Donc il y a toute une sorte de, toute une série de stimulation sensorielle dans lesquelles elle peut passer le temps où s'enfermer. »
		Trouble de l'attention « Ce qui est compliqué au début c'est juste qu'il faut ne serait-ce qu'ils soient attentifs au matériel. Mais si ça m'arrive de devoir proposer plusieurs supports différents, plusieurs images différentes, ou ... »
		Intérêts restreints « Et donc il va regarder en boucle certains passages qui l'intéressent, et bien sûr il ne nous dit pas pourquoi ça l'intéresse. »
		Angoisse/ Anxiété « Oui, un des trucs difficiles dans l'autisme, c'est l'angoisse. Parce que comme ils ne comprennent pas trop bien ce qui ce passe, et qu'en plus, généralement, s'ils ont été un peu, ce n'est pas traumatiser le mot, mais si on les as un peu poussé, et que maintenant ils n'ont plus envie. Il faut d'abord désangoissés les enfants, [...]. »
Profils potentiels des patients utilisant l'interface DEMA	IHM utilisées par les patients	Utilisation de tablettes par les patients avant la prise en charge « On avait un patient qui l'utilisait en tant qu'outil de communication. »

Annexe 2 – Stimuli de l'étude en ligne





Partie 1 : Elicitation par association avec stimulus verbale


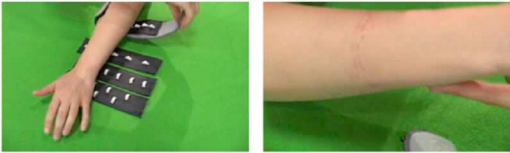

« Dans un premier temps, je vais vous indiquer un mot ou un thème, et vous devrez répondre en m'indiquant le plus vite possible, et dans l'ordre où ils vous viennent à l'esprit, le plus grand nombre d'éléments(mots, adjectifs, verbes) vous suggère mon mot ou mon thème. Avez-vous compris, souhaitez-vous que je reformule ? »

Lorsque l'inspiration du participant semble s'épuiser, l'expérimentateur peut relancer au moins une fois avant d'arrêter cette partie. Liste des mots/thèmes à aborder successivement : Autisme, (sensoriel) Toucher, (motricité) kinesthésie, toucher social/communication par le toucher(Social), Interface Homme-Machine/technologie, jeux.

Partie 2 : Elicitation par association avec stimulus photographique d'interfaces

« A présent je vais vous montrer des images successivement et pour chaque image vous devrez me dire le plus vite possible, et dans l'ordre où ils vous viennent à l'esprit, le plus grand nombre d'éléments que vous suggère l'image ». Images à montrer dans l'ordre :

1	Nao / Robot compagnon	
2	Queball	
3	Tablette type iPad	
4	Je Stimule / Manette	

5	Phantom	
6	Falcon	
7	Hurt Me	
8	Tactile Sleeve	

Partie 3 : Elicitation par association avec stimulus vidéos de jeux/applications

« A présent je vais vous montrer des vidéos. Pour chaque image vous devrez me dire le plus vite possible, et dans l'ordre où ils vous viennent à l'esprit, le plus grand nombre d'éléments que vous suggère l'image. »

- 1) Jeu du labyrinthe que j'ai développé
- 2) Ecriture avec Phantom omni
- 3) Tour de rôle ?
- 4) Déplacement dans l'espace : suivre une trajectoire d'un avatar qui bouge

Annexe 3 – Trame des entretiens semi-dirigés

Partie 1 : Technique du Pourquoi ? Comment ?

Q1 : Rencontrez-vous des difficultés à réaliser certains exercices (de motricité ? sensorielle ? d'interaction sociale ?) avec des méthodes traditionnelles ?

Q2 : Quelles sont les exercices que vous utilisez le plus ? Et vos difficultés à leur mise en place ? Pourquoi ?

Q3 : Comment adaptez-vous les exercices d'une session à une autre avec un même participants ? Pourquoi ?

Q4 : Avez-vous besoin de partager certaines informations : score, performance, évolutions des participants TSA avec d'autres membres de l'équipe ? Comment le faite vous ? Pourquoi ?

Q5 : Pratiquez-vous des activités plus collectives ou plus individuels avec les TSA ? Lesquelles ? Pourquoi ?

Q6 : Utilisez des interfaces homme-machines/technologies dans votre travail avec les TSA ? A quelle fréquence ?

Q7 : Pourquoi ? Quels sont les apports des interfaces homme-machines/technologies dans vos activités avec les TSA ?

Q8 : Pouvez me décrire les activités que vous avez mis/ ou que aimeriez mettre en place avec des interfaces ?

Q9 : Pourquoi ?

Partie 2 : Présentation de la table

« Voici un premier prototype de notre interface. Elle permet d'explorer un plan parallèle à la table, de la taille de deux feuilles A4 collée. Et voici un premier logiciel qui nous permet de voir et d'enregistrer le déplacement du joystick. » *On montre la table d'exploration et la première interface graphique qui affiche le déplacement.* « Cet interface permet de se déplacer latéralement, et permet d'effectuer de relative diagonales. Les joysticks sont interchangeable, on peut imprimer/concevoir n'importe quelle forme et l'utiliser comme joystick. Cette table est très robuste et ne risque pas de casser ou de s'abîmer. »

Limitations de la table

« Toutefois pour effectuer des arcs de cercle et autres figures arrondis elle n'est pas être fluide. Le design peut être modifié pour permettre plus de mouvement, plus fluides, (en 3D/dans

l'espaces) Pour le moment la table est lourde mais on peut modifier certains matériaux pour la rendre plus légère. On peut rajouter un écran tactile sur le côté, sur le dessous, à plat penché etc. »

Q1 : Comment décririez-vous votre 1^{ère} impression de cette interface ?

Q2 : Pourquoi ?

Q3 : Comment décririez-vous des aspects positifs et aspects négatifs de cette interface ? Pourquoi ?

Q4 : Comment pourriez-vous l'intégrer dans vos activités avec les TSA ? Pourquoi ?

Partie 2bis : Manipulation de la table

« A présent je vais vous demander de bien vouloir effectuer une série d'action sur cette table.

Pouvez-vous :

- Aller dans le coin supérieur gauche à vitesse normale
- Aller dans le coin inférieur droit très vite
- Aller dans le coin inférieur gauche très vite
- Aller lentement dans le coin supérieur droit lentement »

Q1 : Pouvez-vous décrire ce que vous avez ressenti durant cette manipulation ?

Q2 : Pourquoi ?

Q3 : Comment utiliseriez-vous cette interface durant vos séances avec des individus TSA ? Pourquoi ?

Q4 : Comment pourrai-t-on évaluer cette interface auprès des personnes TSA ? Pourquoi ?

Q5 : Si vous pouviez changer des aspects, quelles seraient-ils ? Pourquoi

Q6 : Si vous pouviez ajouter des fonctionnalités, quelles seraient-elles et pourquoi ?

Q7 : Autres commentaires ?

Annexe 4 – Questionnaire de Quotient Autistique (QA)

Veuillez compléter ces informations et ensuite lire les instructions ci-dessous.

Toutes les informations resteront strictement confidentielles.

Identifiant : Date de passation :

Comment remplir cette échelle :

Voici une liste de situations. Veuillez lire chacune d'elles très attentivement et précisez en entourant la réponse comme dans les exemples ci-dessous dans quelle mesure vous êtes d'accord ou pas.

Pour que cette échelle soit valide, vous devez répondre à chaque question.

Exemples :

E1. Je suis prêt(e) à prendre des risques.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
E2. J'aime jouer à des jeux de plateau.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
E3. Je trouve qu'il est facile d'apprendre à jouer d'un instrument de musique.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
E4. Je suis fasciné(e) par les autres cultures.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
1. Je préfère réaliser des activités avec d'autres personnes plutôt que seul(e).	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
2. Je préfère tout faire continuellement de la même manière.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
3. Quand j'essaye d'imaginer quelque chose, il est très facile de m'en représenter une image mentalement.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
4. Je suis fréquemment tellement absorbé(e) par une chose que je perds tout le reste de vue.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
5. Mon attention est souvent attirée par des bruits discrets que les autres ne remarquent pas.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
6. Je fais habituellement attention aux numéros de plaques d'immatriculation ou à d'autres types d'informations de ce genre.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
7. Les gens me disent souvent que ce que j'ai dit était impoli, même quand je pense moi que c'était poli.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
8. Quand je lis une histoire, je peux facilement imaginer à quoi les personnages pourraient ressembler.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
9. Je suis fasciné(e) par les dates.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
10. Au sein d'un groupe, je peux facilement suivre les conversations de plusieurs personnes à la fois.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
11. Je trouve les situations de la vie en société faciles.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord

12. J'ai tendance à remarquer certains détails que les autres ne voient pas.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
13. Je préférerais aller dans une bibliothèque plutôt qu'à une fête.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
14. Je trouve facile d'inventer des histoires.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
15. Je suis plus facilement attiré(e) par les gens que par les objets.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
16. J'ai tendance à avoir des centres d'intérêt très importants. Je me tracasse lorsque je ne peux m'y consacrer.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
17. J'apprécie le bavardage en société.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
18. Quand je parle, il n'est pas toujours facile pour les autres de placer un mot.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
19. Je suis fasciné(e) par les chiffres.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
20. Quand je lis une histoire, je trouve qu'il est difficile de me représenter les intentions des personnages.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
21. Je n'aime pas particulièrement lire des romans.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
22. Je trouve qu'il est difficile de se faire de nouveaux amis.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
23. Je remarque sans cesse des schémas réguliers dans les choses qui m'entourent.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
24. Je préférerais aller au théâtre qu'au musée.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
25. Cela ne me dérange pas si mes habitudes quotidiennes sont perturbées.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
26. Je remarque souvent que je ne sais pas comment entretenir une conversation.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
27. Je trouve qu'il est facile de « lire entre les lignes » lorsque quelqu'un me parle.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
28. Je me concentre habituellement plus sur l'ensemble d'une image que sur les petits détails de celle-ci.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
29. Je ne suis pas très doué(e) pour me souvenir des numéros de téléphone.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
30. Je ne remarque habituellement pas les petits changements dans une situation ou dans l'apparence de quelqu'un.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
31. Je sais m'en rendre compte quand mon interlocuteur s'ennuie.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
32. Je trouve qu'il est facile de faire plus d'une chose à la fois.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
33. Quand je parle au téléphone, je ne suis pas sûr(e) de savoir quand c'est à mon tour de parler.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
34. J'aime faire les choses de manière spontanée.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord

35. Je suis souvent le(la) dernier(ère) à comprendre le sens d'une blague.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
36. Je trouve qu'il est facile de décoder ce que les autres pensent ou ressentent juste en regardant leur visage.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
37. Si je suis interrompu(e), je peux facilement revenir à ce que j'étais en train de faire.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
38. Je suis doué(e) pour le bavardage en société.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
39. Les gens me disent souvent que répète continuellement les mêmes choses.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
40. Quand j'étais enfant, j'aimais habituellement jouer à des jeux de rôle avec les autres.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
41. J'aime collectionner des informations sur des catégories de choses (types de voitures, d'oiseaux, de trains, de plantes, ...).	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
42. Je trouve qu'il est difficile de s'imaginer dans la peau d'un autre.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
43. J'aime planifier avec soin toute activité à laquelle je participe.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
44. J'aime les événements sociaux.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
45. Je trouve qu'il est difficile de décoder les intentions des autres.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
46. Les nouvelles situations me rendent anxieux (se).	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
47. J'aime rencontrer de nouvelles personnes.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
48. Je suis une personne qui a le sens de la diplomatie.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
49. Je ne suis pas très doué(e) pour me souvenir des dates de naissance des gens.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
50. Je trouve qu'il est très facile de jouer à des jeux de rôle avec des enfants.	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord

Merci d'avoir rempli ce questionnaire

Table des illustrations

Figure 1 Représentation schématique de la mécatronique	7
Figure 2 Principales subdivisions de la somesthésie.....	11
Figure 3 Chemin de perceptions sensorielles, de l'eau qui coule sur notre main à notre cerveau, un chemin direct et rapide.....	12
Figure 4 Composition de la peau.....	13
Figure 5 Seuil de discrimination spatiale tactile selon les régions du corps	15
Figure 6 Procédures d'explorations primaires	17
Figure 7 Troubles Sensoriels.....	22
Figure 8 Manette de jeu munie d'interfaces vibrotactiles sur les surfaces de préhension	39
Figure 9 Représentation cinématique de l'interface DEMA, vue de face.....	64
Figure 10 Extrait du catalogue de guidages linéaire de Michaud Chailly.	64
Figure 11 DEMA vue de dessus.....	66
Figure 12 DEMA vu de $\frac{3}{4}$ face	66
Figure 13 DEMA vue de $\frac{3}{4}$ gauche.....	66
Figure 14 Interface DEMA et son carter de protection, vu de profil	67
Figure 15 Principe d'un codeur rotatif incrémental,	68
Figure 16 Exemple de déphasage entre les voies A et B (à gauche) ; Front montant et descendant (à droite)	69
Figure 17 Interface graphique utilisateur, 1 ^{ère} version pour un affichage de la position du joystick de l'interface.	70
Figure 18 Représentation de $\frac{3}{4}$ de notre interface DEMA	70
Figure 19 Vue du dessus de l'interface DEMA	71
Figure 20 Codeurs Optiques de l'interface DEMA.....	71
Figure 21 Cache de protection sur l'interface DEMA	71
Figure 22 Tracé d'une ellipse.....	72
Figure 23 Tracé d'un triangle.....	72
Figure 24 Tracé d'un carré.....	72
Figure 25 Tracé de boucles	72
Figure 26 Les items les plus élicités ($n \geq 10$) par groupe Métier	82
Figure 27 Nombre d'item réponse élicité par tâche présentée	83
Figure 28 Analyse de Correspondance Factorielle Simple entre les 3 regroupements de professions et les 20 items réponses les plus élicités ($n \geq 10$).	84
Figure 29 Fréquence des vingt unités de codage les plus utilisées par groupe Métier.	100
Figure 30 Schéma bloc de l'interface Simon Social	110
Figure 31 Diagramme d'action séquentiel du système	111
Figure 32 Schéma des ERM,.....	112
Figure 33 Schéma d'un LRA	112
Figure 34 Schéma d'un actionneur piézoélectrique	112
Figure 35 Déplacement de la membrane supérieure du LRA C10-1 en fonction de la tension en Volt, à fréquence fixe en Hz.....	116
Figure 36 Déplacement de la membrane supérieure du LRA C10-2 en fonction de la tension en Volt, à fréquence fixe en Hz.....	116
Figure 37 : Comparaison des déplacements de C10-1 et C10-2	117
Figure 38 Déroulement d'un essai	119
Figure 39 Vue de dessus des configurations expérimentales pour les trois tâches.	121
Figure 40 Dispositif utilisé durant l'expérience durant la tâche de Simon standard en modalité tactile.	122

Figure 41 Autre vue de la passation de l'expérience Simon Tactile.....	122
Figure 42 Le nombre d'essais erronés dans chaque bloc expérimental. Comme la distribution des données n'était pas normale, des boîtes à moustaches ont été utilisées pour représenter la médiane (lignes horizontales en gras), les 25e et 75e percentiles (boîtes) et les valeurs minimales et maximales (barres d'erreur).	124
Figure 43 Temps de réponses pour les essais congruents et incongruents des quatre blocs expérimentaux. Les barres d'erreur représentent les erreurs standards.	125
Figure 44 Temps de réaction moyen en fonction de la congruence, et en fonction de l'intensité du signal, avec écart type.	127

Table des tableaux

Tableau 1 Classification de Sherrington	10
Tableau 2 Principales caractéristiques des mécanorécepteurs	14
Tableau 3 Caractéristiques fonctionnelles des dispositifs inclus	42
Tableau 4 Développement et évaluation des dispositifs dans les études incluses	46
Tableau 5 Caractéristiques techniques des guidages linéaires présélectionnés.	65
Tableau 6 Professions des participants de notre étude en ligne	74
Tableau 7 Détails des items par participants sur toutes les questions. NR : question Non Répondues	77
Tableau 8 Pourcentage d'items élicités en fonction des questions, tous participants confondus.	78
Tableau 9 Représentativité des catégories par rapport au corpus	79
Tableau 10 Contribution des colonnes de notre AFC, les groupes Métier	84
Tableau 11 Variables caractéristiques des participants aux entretiens.	87
Tableau 12 Classification et définitions des catégories	89
Tableau 13 Informations générales sur les entretiens	93
Tableau 14 Nombre de segments codifiés par entretien	94
Tableau 15 Détails des catégories en termes de pourcentage d'unité de codage et de segments de texte.	95
Tableau 16 Tableau comparatif des actionneurs vibrants	113

Résumé:

Ce travail de thèse porte sur la conception et le développement d'interfaces tactiles ludo-éducatives via une approche centrée utilisateur appliquée au Trouble du Spectre de l'Autisme (TSA). Les personnes atteintes de TSA présentent des particularités sensori-motrices hétérogènes. Dans la modalité tactile, certains peuvent avoir un seuil de résistance à la douleur très élevé, d'autres peuvent ne pas supporter une caresse. Des stimulations tactiles adaptées dans un environnement contrôlé peuvent s'avérer bénéfiques à leur bien être. En s'appuyant sur une démarche de conception centrée utilisateur, un dispositif mécatronique a été conçu et réalisé pour accomplir, via la kinesthésie, des tâches adaptées aux besoins des professionnels de santé travaillant avec des patients TSA. Le prototype correspond à un plan de travail effectif de 30 par 42 cm, sollicitant les compétences motrices de l'utilisateur. Dans la démarche centrée utilisateur, deux études d'évaluations du prototype ont pu être menées afin d'identifier des pistes d'applications et d'intégration dans la pratique des professionnels. De plus, une étude sur la perception vibrotactile en condition sociale a été réalisée permettant une meilleure compréhension des mécanismes cognitifs à l'œuvre dans la population humaine générale et guidant ainsi les possibles utilisations d'interfaces tactiles pour l'autisme. Nos résultats confirment la pertinence de la démarche centrée utilisateur dans un processus de conception d'ingénierie, notamment pour des applications de stimulation motrice et sensorielle dans le cadre de l'accompagnement des personnes avec TSA.

Mots clés : [Mécatronique, Tactile, Haptique, Etude centrée utilisateur, Interfaces, Perception, Simon Social]

Tactile interaction to mediate the accompaniment work's of people with autism

Abstract:

This doctoral work focuses on the design and implementation of tactile edutainment interfaces via a user centered approach applied to Autism Spectrum Disorder (ASD). Individuals with ASD display heterogeneous sensorimotor features. In the tactile modality, some individuals may have a very high threshold of resistance to pain, while others may not be able to bear a caress. Adapted tactile stimulations in a controlled environment can prove beneficial for their wellbeing. Based on a user-centred design approach, a mechatronic device has been designed and implemented to enable healthcare professionals working with ASD patients to perform kinesthetic tasks adapted to their needs. The prototype affords an effective working surface of 30 by 42 cm that requires users' motor skills. Following a user-centered approach, two studies have been conducted to identify application opportunities and how to integrate them in professional practice. Additionally, we studied vibrotactile perception in social condition to better understand the cognitive mechanisms involved in the general human population and to guide possible usage of tactile interface for autism. Our results confirmed the relevance of the user-centred approach in an engineering design process, especially regarding sensorial and motor stimulation applications in the context of care-taking for people with ASD.

Keywords: [Mechatronics, Tactile, Haptic, User centered approach, Interfaces, Perception, Social Simon]