



HAL
open science

Communication affective médiée via une interface tactile

Mohamed Yacine Tsalamlal

► **To cite this version:**

Mohamed Yacine Tsalamlal. Communication affective médiée via une interface tactile. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Paris Saclay (COmUE), 2016. Français. NNT : 2016SACLS379 . tel-01470331

HAL Id: tel-01470331

<https://theses.hal.science/tel-01470331>

Submitted on 17 Feb 2017

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

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

NNT : 2016SACLS379

THESE DE DOCTORAT
DE
L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY
PREPAREE A
L'UNIVERSITE DE PARIS-SUD

ECOLE DOCTORALE N°580
Sciences et technologies de l'information et de la communication

Spécialité de doctorat : Informatique

Par

M. Mohamed Yacine Tsalamlal

Communication affective médiée via une interface tactile

Thèse présentée et soutenue au LIMSI-CNRS, le 27/06/2016

Composition du Jury :

| | | |
|-------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| M. Michel-Ange Amorim | Professeur à l'Université Paris-Sud | Président |
| Mme Elisabeth André | Professeur à l'Université d'Augsburg | Rapporteur |
| M. Dirk Heylen | Professeur à l'Université de Twente | Rapporteur |
| M. Anatole Lecuyer | Directeur de recherche à INRIA-Rennes | Examineur |
| M. Moustapha Hafez | Directeur de recherche à CEA-LIST | Examineur |
| M. Jean-Marie Burkhardt | Directeur de recherche à IFSTTAR | Examineur |
| M. Jean-Claude Martin | Professeur à l'université Paris-Sud | Directeur de thèse |
| M. Mehdi Ammi | MdC à l'Université Paris-Sud | Encadrant |

RESUME

La communication affective est au cœur de nos interactions interpersonnelles. Nous communiquons les émotions à travers de multiples canaux non verbaux. Plusieurs travaux de recherche sur l'interaction homme-machine ont exploité ces modalités de communication afin de concevoir des systèmes permettant de reconnaître et d'afficher automatiquement des signaux affectifs. Le toucher est la modalité la moins explorée dans ce domaine de recherche.

L'aspect intrusif des interfaces haptiques actuelles est l'un des principaux obstacles à leur utilisation dans la communication affective médiée. En effet, l'utilisateur est physiquement connecté à des systèmes mécaniques pour recevoir la stimulation. Cette configuration altère la transparence de l'interaction médiée et empêche la perception de certaines dimensions affectives comme la valence.

L'objectif de cette thèse est de proposer et d'étudier une technique de stimulation tactile sans contact avec des systèmes mécaniques pour médier des signaux d'affects. Sur la base de l'état de l'art des interfaces haptiques, nous avons proposé une stratégie de stimulation tactile basée sur l'utilisation d'un jet d'air mobile. Cette technique permet de fournir une stimulation tactile non-intrusive sur des zones différentes du corps. De plus, ce dispositif tactile permettrait une stimulation efficace de certains mécanorécepteurs qui jouent un rôle important dans les perceptions d'affects positifs. Nous avons conduit une étude expérimentale pour comprendre les relations entre les caractéristiques physiques de la stimulation tactile par jet d'air et la perception affective des utilisateurs. Les résultats mettent en évidence les effets principaux de l'intensité et de la vitesse du mouvement du jet d'air sur l'évaluation subjective mesurée dans l'espace affectif (à savoir, la valence, l'arousal et de la dominance).

La communication des émotions est clairement multimodale. Nous utilisons le toucher conjointement avec d'autres modalités afin de communiquer les différents messages affectifs. C'est dans ce sens que nous avons conduit deux études expérimentales pour examiner la combinaison de la stimulation tactile par jet d'air avec les expressions faciales et vocales pour la perception de la valence. Ces expérimentations ont été conduites dans un cadre théorique et expérimental appelé théorie de l'intégration de l'information. Ce cadre permet de modéliser l'intégration de l'information issue de plusieurs sources en employant une algèbre cognitive.

Les résultats de nos travaux suggèrent que la stimulation tactile par jet d'air peut être utilisée pour transmettre des signaux affectifs dans le cadre des interactions homme-machine. Les modèles perceptifs d'intégration bimodales peuvent être exploités pour construire des modèles computationnels permettant d'afficher des affects en combinant la stimulation tactile aux expressions faciales ou à la voix.

Mots clé : affects, émotion, haptique, tactile, jet d'air, expression faciale, voix, communication médiée, IHM, théorie de l'intégration de l'information.

PUBLICATIONS

JOURNAUX PUBLIES

M. Y. Tsalamlal, N. Ouarti, J. C. Martin, M. Ammi, “Haptic Communication of Dimensions of Emotions using Air Jet Based Tactile Stimulation”. *Journal on Multimodal User Interfaces*, Springer, Vol.9, no.1, pp. 69–77, 2015. (IF=0.8)

JOURNAUX ACCEPTÉS

M. Y. Tsalamlal, M. Amorim, J. C. Martin and M. Ammi, “Modeling Emotional Valence Integration from Face and Touch”. *IEEE Transactions on Affective Computing*, (révisions mineures). (IF=2.67)

M. Y. Tsalamlal, W. Rizer, J. C. Martin, M. Ammi, and M. Ziat, “Affective Communication through Air Jet Stimulation: Evidence from Events-Related Potentials”. *IEEE Transactions on Haptics*, (révisions majeures). (IF=1.4)

JOURNAUX EN PRÉPARATIONS

M. Y. Tsalamlal, M. Amorim, J. C. Martin and M. Ammi, “Modelling Emotional Valence Integration from Voice and Touch”.

CONFÉRENCES INTERNATIONALES

M. Y. Tsalamlal, M. Amorim, J-C Martin, A. Tapus, and M. Ammi “Affective Handshake with a Humanoid Robot: How do Participants Perceive and Combine its Facial and Haptic Expressions?” In the 6th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII), pp. 334–340, Xi’an, China, September 2015,

M.Ammi, V. Demulier, S. Caillou, Y. Gaffary, **M. Y. Tsalamlal**, J-C Martin and A. Tapus “Haptic Human-Robot Affective Interaction in a Handshaking Social Protocol,” In the 10th IEEE Human-Robot Interaction Conference (HRI), pp. 263-270, Oregon, USA, March 2015.

M. Y. Tsalamlal, P. Issartel, N. Ouarti, M. Ammi, “HAIR: HAptic feedback with a mobile AIR jet,” In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 2699-2706, Hong Kong, May 2014.

M. Y. Tsalamlal, N. Ouarti, J.C. Martin, M. and Ammi, “Perception of Emotions from Air Jet Based Tactile Stimulation,” In the 5th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII), pp. 215 – 220, Geneva, Switzerland, September 2013.

M. Y. Tsalamlal, N. Ouarti, and M. Ammi, “Psychophysical study of air jet based tactile stimulation,” in IEEE World Haptics Conference, pp. 639 – 644, Daejeon Korea, April 2013.

M. Y. Tsalamlal, N. Ouarti, and M. Ammi, “Non-intrusive Haptic Interfaces: State-of-the Art Survey,” In International Workshop on Haptic and Audio Interaction pp. 1-9, Daejeon Korea, April 2013.

ABSTRACT

M.Y. Tsalamlal, W. Rizer, J-C Martin M. Ammi and M. Ziat “Event Related Potentials during Air Jet Tactile Stimulation,” abstract in Cognitive Neuroscience Society annual meeting, San Francisco, September 26-30, 2015.

REMERCIEMENTS

Une thèse doctorat est loin d'être une entreprise individuelle. Si j'ai réussi à mener à bien mes travaux de recherches, c'est sûrement grâce à la participation et au soutien de plusieurs personnes. Je tiens donc à remercier ceux qui m'ont aidé et accompagné durant ma thèse.

J'exprime tous mes remerciements à l'ensemble des membres de mon jury pour l'excellent débat sur mes travaux de recherches.

Je remercie Mehdi AMMI d'avoir co-encadré ce travail de thèse. Il m'a tout d'abord permis de travailler sur un domaine très passionnant en commençant par un stage puis en me proposant de continuer avec une thèse. Je remercie également Jean-Claude MARTIN pour avoir dirigé mes travaux. Il a été disponible et s'est particulièrement intéressé à l'avancée de mes travaux. Je tiens à remercier Nizar OUARTI pour avoir participé à l'encadrement de ma thèse et pour les nombreuses discussions que nous avons eues. Mes encadrants m'ont laissé la liberté de débattre, proposer, et réorienter mes travaux au cours du déroulement de ma thèse. Grâce à eux, j'ai pu mener ma thèse tout en étant épanoui.

Grâce à la collaboration avec Michel-Ange AMORIM, j'ai eu la chance de travailler sur des aspects psychologiques, ce qui s'est avéré une expérience très enrichissante. Je le remercie donc pour cette collaboration et pour sa disponibilité.

Je remercie toutes les personnes avec lesquelles j'ai pu collaborer sur différents projets : Adriana TAPUS, Mounia ZIAT, Sylvain CAILLOU, Yoren GAFFARY, Vincent MUNCH, Marc LEMA, Sariah MGHAMES et bien d'autres.

Je remercie les thésards et stagiaires du LIMSI pour nos échanges, mais aussi pour avoir mis en place une atmosphère de travail très agréable. Je pense à Adrien, Amine, Caroline, Floriment, Léonor, Lydia, Nassim, Mehdi, Paul, Tom, Yoren et bien d'autres.

Je remercie mes amis Chouky et Kamel pour leur soutien et tous les moments passés ensemble et qui m'ont permis d'oublier le stress du travail. Je remercie également Charline qui a pris le temps de relire une partie de ce mémoire.

Je tiens également à remercier ma famille qui m'a toujours encouragé, soutenu et aidé. Merci à ma sœur Samiha pour son soutien et sa présence auprès de nos parents durant mon absence.

Merci à Soraya, la femme qui partage ma vie et qui m'a accompagné tout au long de ce projet.

J'aimerais tout particulièrement remercier et témoigner toute ma reconnaissance à mes chers parents qui tiennent une immense place dans mon cœur pour m'avoir tout donné.

Enfin je souhaite dédier mon travail à Mani Fatma qui nous a quittés lors de mon doctorat.

TABLE DES MATIERES

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Chapitre 1 : Introduction générale..... | 7 |
| 1.1 | Contexte | 8 |
| 1.2 | Problématique..... | 11 |
| 1.3 | Objectifs de recherche..... | 11 |
| 1.4 | Démarche et contributions..... | 12 |
| 1.5 | Organisation du manuscrit..... | 13 |
| 2 | Chapitre 2 : Etude bibliographique..... | 15 |
| 2.1 | Introduction..... | 16 |
| 2.2 | Les émotions & l'informatique | 17 |
| 2.3 | Le toucher & les interactions affectives..... | 33 |
| 2.4 | Conclusion..... | 48 |
| 3 | Chapitre 3 : La stimulation tactile par jet d'air pour la communication affective.. | 49 |
| 3.1 | Introduction..... | 49 |
| 3.2 | Caractéristique physique de la stimulation tactile par jet d'air..... | 50 |
| 3.3 | Étude de l'effet des paramètres du jet d'air sur la perception des dimensions affectives... | 55 |
| 3.4 | Conclusion..... | 62 |
| 4 | Chapitre 4 : Combinaison de stimulation tactile par jet d'air avec les expressions faciales pour la communications de la valence | 64 |
| 4.1 | Introduction..... | 65 |
| 4.2 | Théorie de l'intégration de l'information (TII) : Cadre théorique pour l'étude de la perception bimodale..... | 66 |
| 4.3 | Etude de la combinaison de la stimulation tactile par jet d'air avec des expressions faciales pour l'évaluation de la valence émotionnelle..... | 69 |
| 4.4 | Conclusion..... | 78 |
| 5 | Chapitre 5 : Combinaison de stimulation tactile par jet d'air avec les expressions vocales pour la communications de la valence | 80 |
| 5.1 | Introduction..... | 81 |
| 5.2 | Objectif..... | 81 |
| 5.3 | Hypothèses..... | 81 |
| 5.4 | Méthode expérimentale..... | 82 |
| 5.5 | Analyses globales des résultats..... | 85 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 5.6 | Analyses individuelles des résultats..... | 88 |
| 5.7 | Discussion Générale | 91 |
| 5.8 | Conclusion..... | 91 |
| 6 | Chapitre 6 : Conclusion générale | 92 |
| 6.1 | Rappel des objectifs de recherche..... | 93 |
| 6.2 | Contributions de la thèse..... | 93 |
| 6.3 | Contributions transverses à cette thèse..... | 94 |
| 6.4 | Poignée de main affective avec un robot humanoïde..... | 96 |
| 6.5 | Limites de cette thèse et perspectives de recherche..... | 96 |
| | Annexe A..... | 111 |
| | Annexe B..... | 117 |
| | Annexe C..... | 124 |
| | Annexe D..... | 131 |

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GENERALE

Sommaire du chapitre

| | | |
|-----|---------------------------------|----|
| 1.1 | Contexte..... | 8 |
| 1.2 | Problématique | 11 |
| 1.3 | Objectifs de recherche..... | 11 |
| 1.4 | Démarche et contributions | 12 |
| 1.5 | Organisation du manuscrit | 13 |

1.1 CONTEXTE

1.1.1 LES AFFECTS, LES EMOTIONS ET LES HUMEURS

Les émotions jouent un rôle important dans notre vie. Elles influencent notre perception du monde, notre mémoire ou encore nos prises de décisions (Oatley, Keltner, & Jenkins, 2006). Les chercheurs en psychologie parviennent difficilement à s'entendre sur une définition des *phénomènes émotionnels*. Cette pluralité de points de vue est inhérente à la complexité de ces phénomènes. Pour illustrer ces propos, on peut citer une phrase de Russell et al. (1984) : « chacun sait ce qu'est une émotion, jusqu'à ce qu'on lui demande d'en donner une définition. À ce moment-là, il semble que plus personne ne sache. » (Fehr & Russell, 1984).

Le plus souvent, les termes d'affect, d'émotion et d'humeur sont utilisés indifféremment, sans différenciation conceptuelle. Aujourd'hui, des progrès ont été faits pour permettre de comprendre et de démarquer ces phénomènes (Ekkekakis, 2012). Par exemple, Russell (2009) définit l'**affect** comme un « état neurophysiologique consciemment accessible comme un sentiment primitif simple plus évident dans l'humeur et l'émotion, toujours disponible à la conscience » (Russell & Feldman Barrett, 2009). Il est apparu pertinent de considérer que les affects pouvaient être identifiés sur des dimensions, par exemple, plaisir et déplaisir, tension et relaxation. L'affect peut être un composant des émotions et des humeurs, mais il peut également se produire sous forme isolée (Ekkekakis, 2012). Par exemple, selon Russell (2003), la « fierté » qui est définie comme une émotion, peut être considérée comme un composé de l'affect « bien-être » et un composant cognitif supplémentaire « à propos de soi-même ». En l'absence de conceptualisation consensuelle des phénomènes émotionnels, il existe plusieurs définitions de l'émotion. Toutefois, les chercheurs en psychologie s'accordent sur le fait que le terme **émotion** renvoie à un processus complexe qui implique une évaluation cognitive des informations internes ou externes à l'individu, l'affect associé à ces informations ainsi que des changements physiologiques. Néanmoins, le point de discordance réside toujours dans la part accordée au traitement cognitif. Par exemple, Scherer (2001) a défini les émotions comme « un épisode de changements d'état interreliés et synchronisés de la totalité ou la plupart des cinq sous-systèmes organismiques en réponse à un événement externe ou interne évalué comme pertinent pour l'organisme » (Scherer, 2001). Une approche moins cognitive se basant sur la représentation de l'affect définit l'expérience subjective des émotions comme un ensemble de plusieurs dimensions continues. Typiquement, deux dimensions : la valence (également appelée plaisir) et l'activation (également appelée activation). Dans ce cadre, les épisodes émotionnels prototypiques sont connectés à des états affectifs sous-jacents (J Russell & Barrett, 1999). Comparativement aux émotions qui apparaissent comme des phénomènes spécifiques à un événement, particulièrement intenses et de courte durée, **les humeurs** sont globales et non spécifiques, durent généralement plus longtemps et peuvent s'étendre de quelques instants à plusieurs mois. Par exemple, lorsqu'une personne est dans un état d'anxiété, l'objet de cet état peut être éloigné dans le temps (par exemple, une soutenance de thèse de doctorat prévue dans deux mois). La diversité des définitions dans la littérature met en évidence la difficulté d'isoler les émotions des autres phénomènes affectifs. Dans ce sens, Scherer (2005) a proposé d'utiliser une série de traits caractéristiques afin de faciliter la distinction des émotions des autres phénomènes affectifs comme les préférences, les attitudes ou encore les humeurs (Scherer, 2005).

1.1.2 LA COMMUNICATION AFFECTIVE

La communication affective joue un rôle important dans les interactions interpersonnelles. Par exemple, le soutien que nous recevons d'un partenaire augmente notre sentiment de proximité et d'interdépendance. D'un point de vue évolutionniste, la communication des émotions permet à l'espèce

humaine de mieux coopérer afin d'augmenter les chances de survie d'un groupe (Hess & Thibault, 2009). Par exemple, communiquer son émotion de peur pourrait aider d'autres individus à adopter les comportements nécessaires à l'évitement d'un danger imminent (par exemple, un cri de peur à la vue d'un ours va provoquer l'action de fuite). L'importance d'une telle communication précède l'évolution des capacités verbales chez l'homme. C'est pourquoi, il n'est pas surprenant que les humains communiquent les émotions par le biais de plusieurs canaux non verbaux tels que le visage, le corps et le toucher (App, McIntosh, Reed, & Hertenstein, 2011).

1.1.3 LE ROLE PARTICULIER DU TOUCHER DANS LA COMMUNICATION AFFECTIVE

Le mot **haptique** désigne le toucher, au sens large. Il englobe à la fois l'espace perceptif mais aussi moteur. Il existe trois formes de perception haptique : la perception **tactile**, la perception thermique et la perception kinesthésique. Ces perceptions nous permettent d'acquérir des informations sur la position et les mouvements de notre corps dans le temps et dans l'espace, d'explorer la forme, la taille, le poids, et la texture des objets (Klatzky, Lederman, & Reed, 1987). Combiné avec nos autres sens, comme la vision ou l'audition, le toucher permet d'améliorer notre perception et caractérisation de l'environnement.

Plusieurs recherches ont montré le rôle majeur du toucher dans le développement physique, cognitif, et social de l'homme (Patel, 2013). D'ailleurs, c'est un élément central dans les interactions interpersonnelles. Il permet d'exprimer des encouragements, du réconfort ou encore la tendresse. Le toucher peut éliciter de fortes expériences affectives : d'une perception positive lorsqu'on est touché par une personne familière à une perception négative quand on est touché par une personne inconnue (Gallace & Spence, 2010). De récentes études nous éclairent sur le potentiel de ce canal à transmettre des signaux affectifs, notamment des émotions distinctes comme la joie ou la colère (Hertenstein, Holmes, McCullough, & Keltner, 2009; Hertenstein, Verkamp, Kerestes, & Holmes, 2006). Plus étonnant encore, des chercheurs ont mis en évidence l'existence de récepteurs présents dans la peau velue spécialement impliqués dans le codage de la perception du plaisir (Olausson, Wessberg, Morrison, McGlone, & Vallbo, 2010). Bien que l'importance du toucher dans les relations interpersonnelles semble évidente, son rôle dans la communication affective est moins documenté que les autres modalités comme les expressions faciales. Cet écart avec les autres modalités est principalement dû à des raisons méthodologiques. Tout d'abord, la majorité des interactions haptiques interpersonnelles ont lieu en privé, ce qui rend leurs observations par les chercheurs très contraignantes. De plus, la complexité du toucher le rend difficile à mesurer. En effet, le toucher peut varier selon l'action, la durée, la vitesse, la température, etc. Enfin, l'éthique de recherche autour de la manipulation de sujets humains ne permet pas d'étudier certains aspects liés à la perception haptique comme la douleur.

1.1.4 LA COMMUNICATION MEDIÉE DES ÉMOTIONS

Ces dernières années, avec l'avènement de l'informatique, il y eut un intérêt croissant pour le développement de technologies permettant de médier la communication de messages affectifs (Derks, Fischer, & Bos, 2008). De telles technologies peuvent faciliter les interactions affectives entre les personnes distantes ou d'améliorer les interactions homme-machine (i.e. à travers des interactions avec un avatar virtuel ou un robot). À titre d'exemple, les plateformes d'agents conversationnels animés utilisent des avatars virtuels pouvant combiner les expressions faciales, les mouvements du corps et la parole pour communiquer avec des utilisateurs et potentiellement transmettre des messages affectifs (M Courgeon & Clavel, 2013), (Ring, Barry, Totzke, & Bickmore, 2013). Ces dispositifs sont utilisés dans le cadre de la recherche pour étudier le comportement humain ou dans des applications comme l'accompagnement des personnes âgées ou hospitalisées (Figure 1.1). Cependant, les

personnages virtuels présentent l'inconvénient de ne pas avoir de réalité physique tangible. Dans certains cas, l'utilisation de robots expressifs peut donc être préférable. Plusieurs robots de forme humanoïde ou zoomorphique ont été développés comme agents expressifs ayant la capacité de communiquer des affects à travers l'expression faciale, la voix et parfois avec la gestuelle (Figure 1.2). (Leite, Martinho, & Paiva, 2013). De nombreux efforts ont été accomplis pour concevoir des systèmes capables de reconnaître et d'afficher les émotions à travers le canal visuel et/ou auditif. Étonnamment, le canal haptique a reçu moins d'attention dans ce domaine de recherche. Nous nous sommes donc posé la question suivante : y a-t-il des raisons méthodologiques ou technologiques limitant les travaux traitant la communication affective médiée par le canal haptique ?



FIGURE 1.1 : SYSTEME BASE SUR UN AGENT CONVERSATIONNEL DEVELOPPE POUR ASSURER UN SUPPORT AFFECTIF LONGITUDINAL A DES PERSONNES AGEES ISOLEES (RING ET AL., 2013).

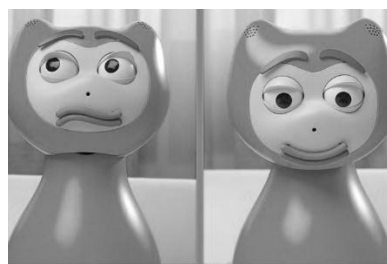


FIGURE 1.2 : L'ICAT, DEVELOPPE PAR PHILIPS®, EST UN ROBOT EN FORME DE CHAT HUMANISE ET DOTE DE CAPACITES EXPRESSIVES (LEITE, MARTINHO, PEREIRA, & PAIVA, 2008)

1.1.5 LA COMMUNICATION AFFECTIVE MEDIEE VIA LES DISPOSITIFS HAPTIQUES

Diverses technologies pour médier le contact physique ont été développées. Elles sont principalement utilisées dans les systèmes de télé-opération, les systèmes de télé-présence, la conception assistée par ordinateur ou encore les simulateurs d'environnements de réalité virtuelle.

Depuis quelques années, il y a un intérêt grandissant autour de la médiation de l'interaction interpersonnelle, résultant en une quantité croissante d'études et de prototypes (Haans & IJsselsteijn, 2005). L'ajout du canal haptique dans des appareils de communication peut améliorer ou enrichir la quantité d'informations pouvant être transmises. Il peut aussi compenser la perte des indices non verbaux comme l'expression faciale. Quelques plates-formes haptiques ont été développées pour médier le toucher social. Ces dispositifs sont basés sur des systèmes haptiques déjà existants (comme les interfaces haptiques desktop Figure 1.3) ou sont imaginés spécifiquement pour la communication interpersonnelle médiée (voir Figure 1.4 pour un exemple). Ces dispositifs exploitent deux types de retour d'information haptique : tactile et kinesthésique.

Plusieurs études montrent le potentiel de l'ajout du toucher dans les systèmes d'interaction médiés et particulièrement pour la communication affective (Gallace & Spence, 2010). Par exemple, l'ajout d'un retour de force à une interaction affective avec un avatar virtuel permet d'améliorer le taux de reconnaissance des émotions (Gaffary, Eyharabide, Martin, & Ammi, 2014).

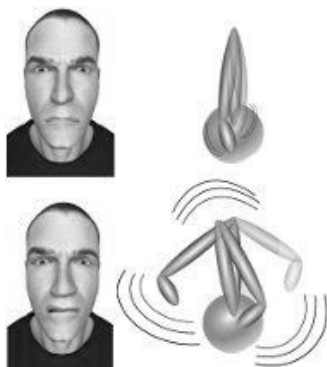


FIGURE 1.3 : DISPOSITIF HAPTIC A RETOUR D'EFFORT POUR ETUDIER LA COMBINAISON DE LA COMMUNICATION VISIO-HAPTIC AVEC UN AGENT VIRTUEL (GAFFARY ET AL, 2014).



FIGURE 1.4 : INTERFACE A BASE DE VIBREURS POUR MEDIER UNE STIMULATION TACTILE SUR LE BRAS DE L'UTILISATEUR (HUISMAN, DARRIBA FREDERIKS, VAN DIJK, HEVLEN, & KROSE, 2013).

1.1.6 LIMITES DES DISPOSITIFS HAPTIC UTILISES DANS LA COMMUNICATION AFFECTIVE

Le déploiement de systèmes haptiques pour la communication affective reste très limité. De par leur nature, ces dispositifs doivent être physiquement connectés à l'utilisateur par des systèmes mécaniques pour interagir et fournir la stimulation. De plus, les systèmes actuels sont souvent intrusifs, limitant le confort et la transparence de l'interaction (Tsalamlal, Ouarti & Ammi, 2013). Ils ne permettent donc pas de communiquer toute la richesse perceptive du sens du toucher. En outre, ces systèmes permettant de transmettre des aspects liés à l'intensité de l'émotion sont moins efficaces pour véhiculer des informations liées au plaisir. Souvent, les travaux dans ce domaine dépassent le cadre de conception de dispositif. Des études empiriques doivent être menées pour comprendre comment ces dispositifs pourraient rendre possible la communication d'une interaction haptique similaire à celle obtenue dans une interaction interpersonnelle réelle (Eid & Al Osman, 2015).

1.2 PROBLEMATIQUE

Des études récentes ont montré l'importance du toucher dans la communication des signaux affectifs. D'ailleurs, sur certaines parties du corps, la peau inclut des récepteurs directement impliqués dans la perception affective. C'est dans ce sens que des chercheurs ont voulu exploiter ce potentiel dans la communication affective médiée. Cependant, l'étude et le développement des systèmes haptiques pour la communication affective font face à deux obstacles de taille. Tout d'abord, les dispositifs haptiques existant ne permettent pas de transmettre toutes les caractéristiques physiques du toucher humain. De plus, la majorité des dispositifs haptiques actuels sont basés sur des structures mécaniques intrusives nécessitant un contact physique avec les régions stimulées du corps. Ce lien intrusif limite les mouvements de l'utilisateur et par conséquent la transparence de l'interaction. D'autre part, le nombre réduit de travaux sur la communication tactile par rapport aux autres canaux non verbaux limite les connaissances nécessaires à la conception de systèmes haptiques efficaces pour la communication affective.

1.3 OBJECTIFS DE RECHERCHE

Pour faire avancer la recherche sur la communication affective médiée par la modalité haptique, il est nécessaire d'étudier cette problématique sur deux axes : un axe technologique et un axe expérimental. En effet, il est important de concevoir des systèmes haptiques capables de transmettre des signaux

affectifs tout en répondant aux contraintes de transparence dans l'interaction. Pour proposer de telles interfaces haptiques médiées, nous devons étudier la capacité des utilisateurs à distinguer les différents stimuli affectifs générés par ce dispositif. Pour ce faire, nous proposons d'examiner la perception émotionnelle subjective des utilisateurs. À travers des études expérimentales, il est important de comprendre comment les paramètres de la stimulation haptique influencent la perception affective subjective.

Sachant que la communication affective est clairement multimodale, il est aussi primordial d'examiner comment les paramètres de la stimulation haptique sont combinés avec d'autres modalités, respectivement, l'expression faciale et l'expression vocale. La cohérence de la perception des utilisateurs pourrait permettre d'obtenir des modèles de la perception affective des utilisateurs qui faciliterait plus tard la conception de modèles informatiques capables d'améliorer l'affichage automatique de signaux affectifs haptiques.

Les motivations de cette thèse se déclinent en deux objectifs principaux :

- 1) Proposer une technique de stimulation tactile non intrusive permettant de communiquer certains aspects émotionnels, particulièrement ceux liés à la valence.
- 2) Examiner comment cette technique de stimulation est évaluée sur le plan émotionnel par les utilisateurs, notamment lorsqu'elle est combinée avec les expressions faciales et vocales.

1.4 DEMARCHE ET CONTRIBUTIONS

Afin d'apporter des éléments de réponse à ces questions complexes, nos travaux de thèse s'articulent autour de trois axes disciplinaires (Figure 1.5) : l'haptique, l'informatique affective et la psychologie expérimentale. Pour apporter des éléments de réponse à nos objectifs de recherche, nous avons entrepris une démarche incrémentale sur trois étapes en apportant des contributions théoriques, technologiques et expérimentales.

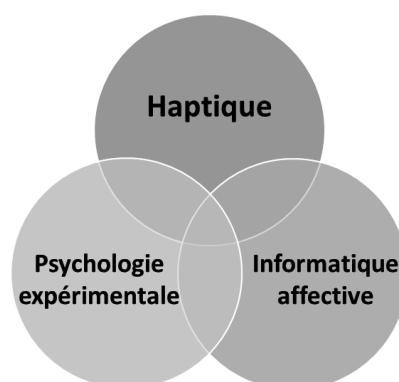


FIGURE 1.5 : SCHEMA DE LA PROBLEMATIQUE MULTIFACTORIELLE DE CETTE THESE, ABORDEE D'UN POINT DE VUE MULTIDISCIPLINAIRE, ENTRE TECHNOLOGIE ET FACTEURS HUMAINS.

Notre première contribution est théorique : La conception d'un dispositif pour la communication des émotions passe par le choix d'un modèle théorique les conceptualisant. C'est dans ce sens que nous présenterons les grandes théories des émotions et leur adaptation en informatique. Nous étudierons aussi les principaux canaux de communication des émotions et de quelle manière ils sont exploités en informatique. Nous aborderons ensuite les dispositifs haptiques.

L'apparition de nouveaux types de dispositifs haptiques, dits sans contact, permet de répondre à certaines contraintes liées à l'utilisation de systèmes mécaniques intrusifs. Les interfaces haptiques destinées à la communication affective seront décrites. Enfin, nous présenterons un *Framework* pour la modélisation de l'évaluation des émotions issues de plusieurs sources d'information. Ce Framework permet de manipuler des données empiriques afin de déduire les modèles perceptifs grâce à une algèbre cognitive.

Notre deuxième contribution est technologique : Nous proposons une interface haptique sans contact basée sur le jet d'air. Cette technique de stimulation ne nécessite aucun contact physique entre l'utilisateur et le dispositif. L'interface peut être utilisée pour stimuler des zones larges et différentes du corps (par exemple, l'avant-bras entier). En outre, il est possible de générer des forces de faible amplitude, qui pourraient s'avérer plus efficaces pour stimuler les mécanorécepteurs impliqués dans la communication affective tactile.

Notre troisième contribution est expérimentale : Nous avons mené trois études centrées utilisateur. Sur la base des résultats de plusieurs études mettant en évidence le rôle du toucher dans la communication affective, nous avons réalisé une expérience pour étudier les relations entre les caractéristiques physiques de la stimulation tactile proposée et la perception affective des participants. Plus précisément, nous avons étudié l'impact individuel de chaque paramètre du stimulus tactile sur la perception de trois grandes dimensions de l'espace affectif (i.e. plaisir, activation, dominance). La communication des émotions est clairement multimodale. Nous avons donc conduit deux études expérimentales pour mettre en évidence la façon dont sont perçues les combinaisons d'expressions tactiles et faciales et la combinaison des expressions tactiles et vocales des émotions. Nous nous sommes concentrés sur l'étude des mécanismes d'intégration qui sous-tendent la combinaison bimodale dans la perception de la valence émotionnelle (c'est-à-dire, positive et négative). Dans la section suivante, nous expliquerons comment ces contributions sont présentées dans ce manuscrit.

1.5 ORGANISATION DU MANUSCRIT

Dans cette thèse nous avons adopté une démarche incrémentale (comme présenté dans le Tableau 1.1). Le reste du manuscrit est divisé en 4 chapitres. L'objectif du chapitre 2 est de présenter une étude bibliographique. Le chapitre 3 est divisé en deux parties :

La première décrit une nouvelle interface haptique à base de jet d'air adaptée à la communication affective.

La deuxième partie présente une expérimentation qui examine la perception affective subjective des participants en fonction des paramètres de contrôle du jet d'air.

Dans les chapitres 4 et 5, nous nous baserons sur un cadre théorique appelé théorie de l'intégration de l'information pour étudier les mécanismes qui sous-tendent la combinaison des stimuli tactiles par jet d'air avec les expressions faciales et vocales pour la perception de la valence.

Enfin, nous intégrerons l'ensemble de nos résultats dans une discussion générale (chapitre 6) et transversale, destinée à apporter des tentatives de réponse à la problématique traitée dans le présent manuscrit et de proposer un certain nombre de perspectives de recherche.

Les travaux de recherche présentés dans ce projet ont été réalisés dans le cadre du projet DIGITEO HUMAN TOUCH. Notre objectif est de proposer des interactions sociales médiées par le toucher dans des environnements de communication multimodale. J'ai effectué cette thèse au sein du laboratoire LIMSI-CNRS rattaché à l'école doctorale STIC de l'université de Paris-Sud/Saclay. Mes travaux de thèse m'ont permis d'entreprendre des collaborations internes au laboratoire avec Paul ISSARTEL, Yoren GAFFARY, Floriment GEUNIAI et Sylvain CAILLOU ainsi que des collaborations externes

avec Michel-Ange AMORIM (STAPS/Paris-Sud), Adriana TAPUS (ENSTA/Paris-Tech) et Mounia ZIAT (Université Nord-Michigan, USA). Nos travaux de recherche ont fait l'objet de plusieurs articles scientifiques publiés ou en cours de publication.

TABLEAU 1.1 RESUME DES DIFFERENTES PARTIES DU MANUSCRIT MENEES ET DES PRINCIPAUX OBJECTIFS

| Chapitre | Objectifs |
|---|---|
| Chapitre 2 : Etude bibliographique | <p>Partie 1 : les émotions et l'informatique</p> <ul style="list-style-type: none"> • Décrire les principales approches théoriques des phénomènes émotionnels et leurs adaptations en informatique. • Examiner les principaux canaux de communication non verbaux des émotions. • Examiner l'utilisation des canaux de communication non verbaux pour la reconnaissance et l'affichage automatique des émotions. <p>Partie 2 : l'haptique et la communication affective médiée</p> <ul style="list-style-type: none"> • Décrire la perception haptique chez l'humain. • Introduire les interfaces haptiques et leurs limites. • Examiner l'utilisation des interfaces haptiques pour la communication affective médiée. |
| Chapitre 3 : Conception et étude de la stimulation tactile par jet d'air pour la communication affective | <p>Partie 1 : interface tactile à base de jet d'air</p> <ul style="list-style-type: none"> • Présenter le concept de l'interface tactile à base de jet d'air pour la communication affective médiée • Etude des caractéristiques physiques de la stimulation tactile par jet d'air <p>Partie 2 : perception affective du jet d'air</p> <ul style="list-style-type: none"> • Examiner l'effet des paramètres du jet d'air sur la perception subjective des dimensions affectives PAD |
| Chapitre 4 : combinaison de la stimulation par jet d'air avec l'expression faciale pour la perception de la valence | <p>Partie 1 : théorie de l'intégration de l'information</p> <ul style="list-style-type: none"> • Présentation du cadre théorique utilisé pour la modélisation de l'évaluation des affects issus de plusieurs sources d'informations. <p>Partie 2 : étude expérimentale visio-haptique</p> <ul style="list-style-type: none"> • Etude expérimentale conduite pour examiner les mécanismes qui sous-tendent la combinaison des stimuli par jet d'air et des expressions faciales pour l'évaluation de la valence. |
| Chapitre 5 : combinaison de la stimulation par jet d'air avec l'expression vocale pour la perception de la valence | <ul style="list-style-type: none"> • Etude expérimentale conduite pour examiner les mécanismes qui sous-tendent la combinaison des stimuli par jet d'air et des expressions vocales pour l'évaluation de la valence. |
| Chapitre 6 : Conclusion générale | <ul style="list-style-type: none"> • Contribution de la thèse. • Travaux connexes. • Limites et perspectives de recherche. |

CHAPITRE 2

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Sommaire du chapitre

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Introduction..... | 16 |
| 2.2 | Les émotions & l'informatique..... | 17 |
| 2.3 | Le toucher & les interactions affectives..... | 33 |
| 2.4 | Conclusion..... | 48 |

2.1 INTRODUCTION

Les émotions sont un phénomène proéminent dans la vie des hommes. Depuis l'Antiquité jusqu'à aujourd'hui, penseurs et philosophes ont tenté de les comprendre. Avec l'avènement des sciences modernes, le rôle proéminent des émotions est expliqué par leurs fonctions au sein du système cognitif humain. Ainsi, elles influencent notre perception du monde, nos prises de décisions, notre mémoire, notre apprentissage ou encore nos interactions sociales. La majorité des processus psychologiques est soit influencée par les émotions soit impliquée dans l'émergence ou la modulation de ces dernières (Davidson, Maxwell, & Shackman, 2004; Lazarus, 1982). De plus, notre faculté à **exprimer** nos émotions et à **reconnaître** celles d'autrui a des implications directes sur nos interactions interpersonnelles et donc sur notre capacité à vivre en société. Pour les chercheurs s'intéressant au fonctionnement et à la **modélisation** des émotions, la conceptualisation d'une telle entité psychologique représente une problématique de taille. Dans cette perspective, la littérature propose une pluralité de définitions de l'émotion.

À l'égard de l'importance des émotions dans la formation de l'intelligence humaine, il semble évident que les émotions devraient être intégrées dans les modèles d'intelligence artificielle et particulièrement, dans les ordinateurs. Depuis l'émergence de l'informatique, les chercheurs se sont concentrés sur des thématiques liées à la résolution de problèmes, le raisonnement, l'apprentissage, la perception, la langue et d'autres tâches cognitives considérées nécessaires pour l'intelligence. Depuis la fin des années quatre-vingt-dix une nouvelle discipline appelée **Informatique Affective** ou « Affective Computing (AC) » propose de doter les ordinateurs de la capacité à traiter l'émotion (Picard, 1997). En examinant les travaux menés dans ce domaine, l'informatique affective serait l'étude et le développement de systèmes et de dispositifs pouvant reconnaître, interpréter, traiter et simuler des émotions. C'est un champ interdisciplinaire liant l'informatique, la psychologie et les sciences cognitives (Scherer, Bänziger, & Roesch, 2010). Plusieurs études exploitent les expressions faciales, la voix et la gestuelle pour reconnaître et synthétiser des émotions. **Le toucher** est la modalité la moins étudiée dans les champs informatiques affectifs. Heureusement, plus récemment, des chercheurs proposent d'exploiter cette modalité pour reconnaître et synthétiser des émotions. C'est dans cette perspective que s'inscrivent ces travaux de recherche. En effet, nous proposons une nouvelle technique de stimulation tactile afin de médier des signaux émotionnels. Ce chapitre présente un état de l'art permettant de donner des éléments de compréhension sur les disciplines et concepts impliqués dans la problématique abordée dans cette thèse. Le chapitre est divisé en deux parties :

Dans la **première partie**, nous présenterons les théories contemporaines majeures des émotions et leurs adaptations en informatique. Nous verrons ensuite les principaux canaux non verbaux de communication des émotions et leurs utilisations en informatique pour effectuer la reconnaissance et la synthèse automatique des émotions.

Dans la **seconde partie**, nous nous intéresserons plus particulièrement au toucher. Nous présenterons les caractéristiques sensorielles de ce canal, son utilisation en interaction homme-machine, et enfin les dernières recherches étudiant la communication médiée des émotions à travers ce canal.

2.2 LES EMOTIONS & L'INFORMATIQUE

2.2.1 THEORIES MAJEURES DES EMOTIONS ET LEURS IMPLEMENTATIONS EN INFORMATIQUE

Selon Scherer et Peper (Scherer & Peper, 2001), il existe plusieurs approches théoriques majeures conceptualisant l'émotion telles que l'approche adaptative, l'approche dimensionnelle, l'approche cognitive, l'approche motivationnelle, l'approche des circuits mentaux, l'approche des émotions de base ou encore, l'approche par construction sociale. Ces modèles théoriques des émotions peuvent être classés selon deux critères. Le premier critère représente les différents composants émotionnels impliqués. Le second critère considère les différentes phases du processus émotionnel pour chaque théorie ainsi que leurs implications. La Figure 2.1 propose une visualisation de ces différentes théories des émotions sur cette classification à deux dimensions. On remarque que certaines de ces théories partagent un ou plusieurs éléments des deux critères.

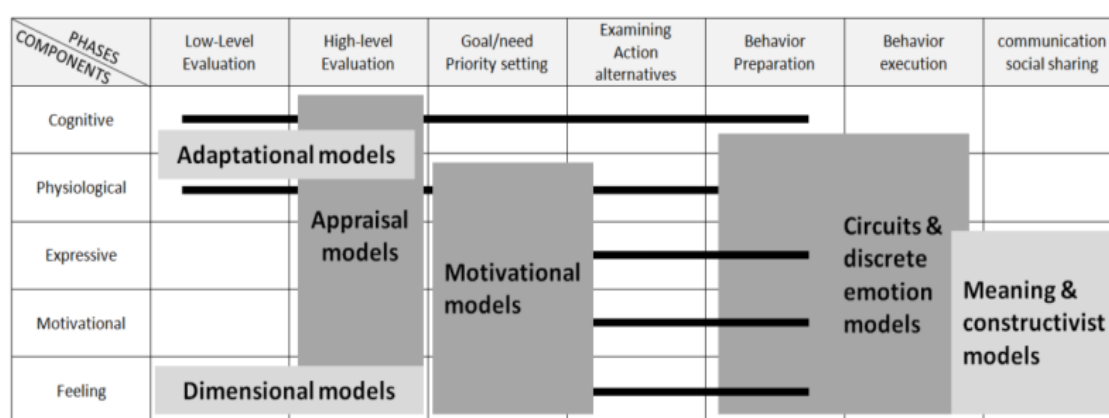


FIGURE 2.1. LES APPROCHES DES EMOTIONS CLASSEES SELON LES DIMENSIONS COMPOSANT L'EMOTION (LIGNES) ET LES PHASES DE L'EVALUATION COGNITIVE (COLONNES) (SCHERER ET AL., 2010).

2.2.1.1 L'APPROCHE CATEGORIELLE DES EMOTIONS

Ce courant théorique a été largement influencé par les travaux de Charles Darwin rédigés en 1872. Dans ces travaux, il aborda l'émotion dans une perspective évolutionniste. Darwin proposa deux caractéristiques fondamentales aux émotions : 1) les émotions sont universelles (les émotions sont présentées chez différentes cultures) ; 2) les émotions ont une fonction adaptative (elles contribuent à la survie de l'espèce). Le rôle des émotions dans la survie de l'espèce humaine est au cœur de la théorie des émotions de base. En effet, les émotions pourraient solliciter des processus et des systèmes importants dans l'organisme, afin de permettre aux individus de répondre de façon appropriée à l'environnement (Cosmides & Tooby, 2000). Dans la continuité des travaux de Darwin, plusieurs chercheurs ont mené des études pour mettre en évidence les mécanismes qui sous-tendent les émotions de bases (Paul Ekman, 1984; Izard, 1971; Jaak Panksepp, 1982; Plutchik, 1980). Toujours dans une perspective évolutionniste des émotions, certains chercheurs ont avancé l'existence d'un nombre limité d'émotions fondamentales, chacune avec une fonctionnalité adaptative différente. En parcourant la littérature, on remarque qu'il n'existe pas de consensus sur le nombre et la nature des émotions de base. Par exemple, Paul Ekman (Paul Ekman & Keltner, 1970), un des pionniers dans l'examen des expressions faciales des émotions, identifie l'existence de six émotions primaires universelles : la colère, le dégoût, la peur, la joie, la tristesse et la surprise (voir Figure 2.2). De son côté, Plutchik (Plutchik, 2001) propose d'illustrer les émotions en les assimilant à une palette de couleurs en utilisant un modèle à huit émotions primaires (Figure 2.3).

Les émotions fondamentales correspondent à des couleurs pouvant s’opposer deux par deux. De plus, chacune des émotions de base peut avoir plusieurs niveaux d’intensité représentés dans le modèle par des nuances de la couleur de base. Dans cette représentation, les émotions plus complexes proviendraient d’un mélange de ces émotions de base et leurs différents niveaux d’intensité. Par exemple, la joie et l’acceptation donneraient l’amour ; la colère et le dégoût, le mépris. Le concept des émotions de base a alimenté de larges travaux. Cependant, la représentation des émotions en catégories distinctes a suscité de nombreuses critiques (Ortony & Turner, 1990; J Panksepp, 1992; J a Russell, 1994). En effet, réduire le phénomène émotionnel à un nombre limité de catégorie empêche de comprendre les mécanismes responsables de l’évaluation cognitive des événements, ainsi que les mécanismes supposés être responsables de l’émergence des émotions (Scherer, Scherer, & Ekman, 1984).



FIGURE 2.2 REPRESENTATION DE QUELQUES EXPRESSIONS FACIALES CARACTERISTIQUES DES EMOTIONS DE BASE DE GAUCHE A DROITE LES PHOTOGRAPHIES REPRESENTENT LES EXPRESSIONS DE COLERE, PEUR, DEGOUT, SURPRISE, JOIE, TRISTESSE (TIREE DE (P EKMAN & FRIESEN, 1975)).

2.2.1.2 L’APPROCHE CATEGORIELLE DES EMOTIONS EN INFORMATIQUE.

L’approche catégorielle des émotions est largement utilisée en informatique. Cette approche permet de structurer la représentation des émotions en états indépendants. Cette représentation simplifie le raisonnement autour de la synthèse ou la reconnaissance en utilisant un ensemble fixé d’émotions. Par exemple, les systèmes comme FaceReader de Noldus identifient des émotions dans l’expression faciale en se basant sur les indices spécifiques à chaque catégorie d’émotion. Souvent, ces catégories se limitent aux six émotions de base décrites par Ekman car elles ont l’avantage de la reproductibilité culturelle et sont bien documentées dans la littérature. En pratique, l’approche catégorielle est souvent utilisée pour manipuler les paramètres expressifs des agents virtuels ou des robots. Par exemple, en utilisant les techniques d’animation 3D, un agent virtuel peut afficher différentes catégories d’émotion (comme la joie ou la colère) à travers les expressions faciales (M Courgeon & Clavel, 2013). L’approche catégorielle pose un problème concernant la représentation des émotions plus complexes et les états intermédiaires (Dariouch et al, 2004).

2.2.1.3 L’APPROCHE DIMENSIONNELLE DES EMOTIONS

Les théories dimensionnelles actuelles se fondent sur les travaux de Wundt (1897) concernant l’expérience subjective des émotions. À l’instar de l’approche catégorielle des émotions, l’approche dimensionnelle considère que les émotions présentées comme distinctes ne sont pas des états

indépendants les uns des autres. Cette approche propose de décrire l'émotion en recourant aux propriétés basiques de l'expérience affective formant ainsi un espace continu à plusieurs dimensions (James A Russell, 1978; James Russell & Mehrabian, 1977). L'évaluation subjective d'une expérience émotionnelle pourrait être représentée par un niveau plus ou moins important sur chacune des dimensions de cet espace. Plus tard, Russell (Russell, 1980) avança que deux dimensions uniquement seraient nécessaires pour représenter l'expérience subjective des émotions : les dimensions de valence (plaisir/déplaisir) et d'activation (faible/forte). Dans ce modèle, les deux dimensions forment un espace circulaire appelé circumplex (voir Figure 2.4).

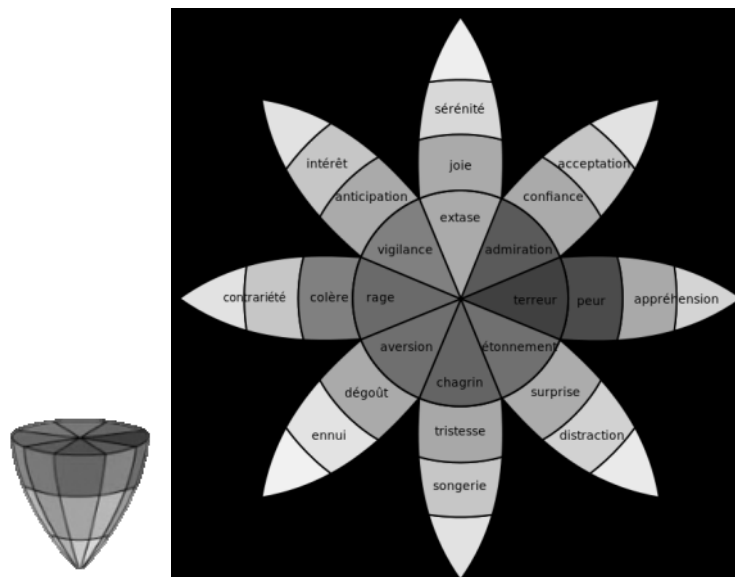


FIGURE 2.3 ROUE DES EMOTIONS DE PLUTCHIK (PLUTCHIK, 2001). LES EMOTIONS PRIMAIRES, PAR PAIRES D'OPPOSES : JOIE-TRISTESSE, CONFIANCE-DEGOUT, PEUR-COLERE ET SURPRISE-ANTICIPATION. LES MELANGES D'EMOTIONS PRIMAIRES DONNENT DES EMOTIONS SECONDAIRES.

Cependant, le modèle de Russell présente une limite lorsqu'il s'agit de différencier certaines émotions. Par exemple, la peur et la colère se situent à des emplacements proches sur le cercle. En effet, ces deux émotions sont toutes deux négatives et actives. En plus des dimensions de valence et d'activation, la dimension de dominance serait nécessaire (Mehrabian, 1996), pour une représentation plus complète des émotions et permettrait par exemple de séparer la peur et la colère. Des travaux plus récents (Fontaine, Scherer, Roesch, & Ellsworth, 2007) suggèrent qu'une quatrième dimension «imprévisibilité» est nécessaire pour permettre une différenciation satisfaisante des émotions. Plus spécifiquement, les émotions impliquées dans la réaction urgente de l'organisme pour faire face à un nouveau stimulus ou à une situation inconnue. La principale critique du modèle dimensionnel des émotions est le manque d'accord autour de définitions claires sur les concepts manipulés. Par exemple, Reisenzein (1994) souligne la présence d'au moins quatre points de vue théoriques différents sur la dimension d'activation. De plus, pour l'instant, il n'existe pas encore de consensus sur les dimensions élémentaires composant le modèle dimensionnel.

2.2.1.4 L'APPROCHE DIMENSIONNELLE DES EMOTIONS EN INFORMATIQUE

L'approche dimensionnelle des émotions est souvent utilisée en informatique affective pour animer les agents expressifs ou pour faire de la reconnaissance des émotions à travers plusieurs modalités simultanément. Le modèle dimensionnel le plus largement utilisé est celui à deux dimensions (Russell, 1980), où les émotions sont représentées comme la combinaison de la valence et de l'activation. Les modèles dimensionnels permettent de projeter les émotions sur des échelles quantitatives continues. Cette représentation permet de facilement transposer des fonctions continues du comportement d'un

avatar tel que l'étendue spatiale d'un geste. Par exemple, (Courgeon, 2011) en utilisant la dimension de valence d'activation et de dominance a développé une interface pour animer le visage d'un avatar. L'utilisateur déplace la souris à l'intérieur d'un espace à deux dimensions pour modifier l'expression faciale de l'avatar.

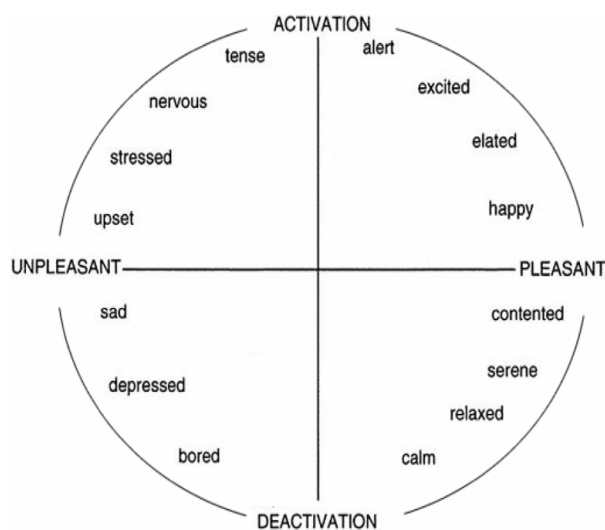


FIGURE 2.4. REPRESENTATION DU MODELE DU CIRCUMPLEX DE RUSSELL (1980), AVEC LA DIMENSION HORIZONTALE DE VALENCE ET LA DIMENSION VERTICALE D'ACTIVATION. FIGURE TIREE DE (POSNER, RUSSELL, & PETERSON, 2005).

D'autres chercheurs ont aussi exploré l'utilisation des modèles dimensionnels pour l'analyse et la reconnaissance automatique du comportement émotionnel humain (Gunes & Pantic, 2010a). En effet, ce modèle semble être performant pour la reconnaissance des émotions capturées dans des environnements réels. En ces derniers, les interprétations sont subtiles, continues et spécifiques au contexte affectif combinant de multiples modalités d'analyses et de reconnaissance des émotions. Dans ce sens, des études ont exploré les progrès récents en modélisation de l'effet dimensionnel et continu, la détection et la reconnaissance automatique du visuel, de l'audio et du tactile (Gunes & Pantic, 2010b). ils soulignent, par exemple, que les systèmes basés sur les modèles bidimensionnels peuvent mieux distinguer les états affectifs de l'utilisateur que les approches qui s'appuient sur les émotions distinctes (Barrette, 2006). Cependant, les approches dimensionnelles ne permettent pas de décrire les mécanismes qui sous-tendent le traitement et la genèse des émotions et donc de formaliser ces processus.

2.2.1.5 LES THEORIES DE L'EVALUATION COGNITIVE DES EMOTIONS

Les théories de l'évaluation cognitive des émotions sont nées du besoin d'expliquer pourquoi les individus réagissent émotionnellement de façons partiellement différentes à une même situation. Les premiers concepts sur les théories cognitives des émotions trouvent leur origine dans les travaux d'Arnold vers la fin des années 50. Arnold postula que l'évaluation de la situation est à l'origine de la séquence émotionnelle et des actions qui lui sont associées (Arnold, 1960). Dans cette perspective, plusieurs chercheurs soutiennent que les émotions résultent d'un processus d'évaluation par l'individu et son rapport à l'environnement (Frijda, 1986) (Scherer et al., 1984). En allant plus loin, Lazarus (Lazarus & Folkman, 1984) a identifié deux catégories d'évaluation cognitive 1) l'évaluation primaire, qui détermine la pertinence de l'événement pour l'organisme, et 2) l'évaluation secondaire, permettant de juger la capacité de l'organisme à faire face à l'événement. Ces deux catégories d'appraisal sont complémentaires et séquentielles. Plus tard, Frijda identifia un certain nombre de facteurs d'évaluation pour décrire le processus d'évaluation cognitive (Frijda, 1988).

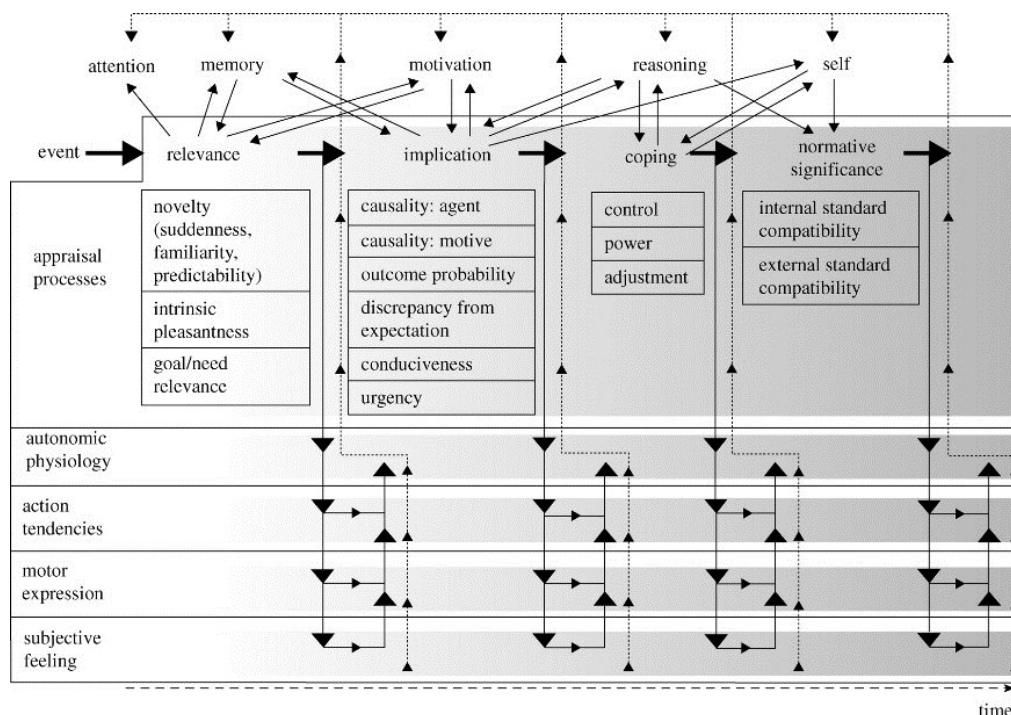


FIGURE 2.5. CRITERES D'EVALUATION DU MODELE DES PROCESSUS COMPOSANTS PROPOSE PAR SCHERER. FIGURE TIREE DE (K. R. SCHERER, 2009).

De son côté, Scherer proposa une description détaillée du processus de l'évaluation cognitive avec un modèle en composantes (Figure 2.5). Il proposa une liste de critères d'évaluation plus complète appelée Stimulus Evaluation Checks (SECs). Ces critères sont regroupés suivant quatre aspects (Scherer, 1987):

- **La pertinence** : nouveauté de l'évènement et pertinence aux buts/besoins.
- **Les implications** : les conséquences de cet évènement à court et long terme.
- **Le potentiel de maîtrise** : niveau de contrôle des conséquences de l'évènement
- **La signification normative** : compatibilité avec convictions personnelles ainsi que normes et valeurs sociales.

Aujourd'hui, les théories de l'évaluation cognitive de l'émotion sont l'approche privilégiée des chercheurs pour modéliser les mécanismes permettant de générer et identifier les émotions. La principale critique formulée à l'encontre de ces théories est le cognitivisme systématique du processus émotionnel. En effet, certains chercheurs avancent que dans de nombreux cas, les émotions seraient produites par des facteurs non cognitifs (Berkowitz, 1993) et (LeDoux, 1993).

2.2.1.6 L'APPROCHE COGNITIVE DES EMOTIONS EN INFORMATIQUE

Les théories cognitives expliquent l'émergence des émotions par un processus d'évaluation sur plusieurs étapes. Cette structure en composantes rend les théories cognitives particulièrement adaptées aux contraintes de la modélisation informatique. D'où l'émergence de plusieurs modèles informatiques basés sur ces théories. Par exemple, (Sander, Grandjean, & Scherer, 2005) ont proposé un modèle informatique basé sur les réseaux de neurones permettant d'identifier les catégories d'émotions en se basant sur la validation des étapes du modèle de composantes (CPM). Les auteurs ont validé leur système en comparant les résultats des prédictions des émotions avec celles associées au modèle théorique. Ce système est seulement limité à la reconnaissance automatique des émotions

et ne permet pas de simuler le traitement cognitif à partir d'un évènement. D'autres travaux se sont basés sur le modèle CPM pour proposer des systèmes d'animation faciale.

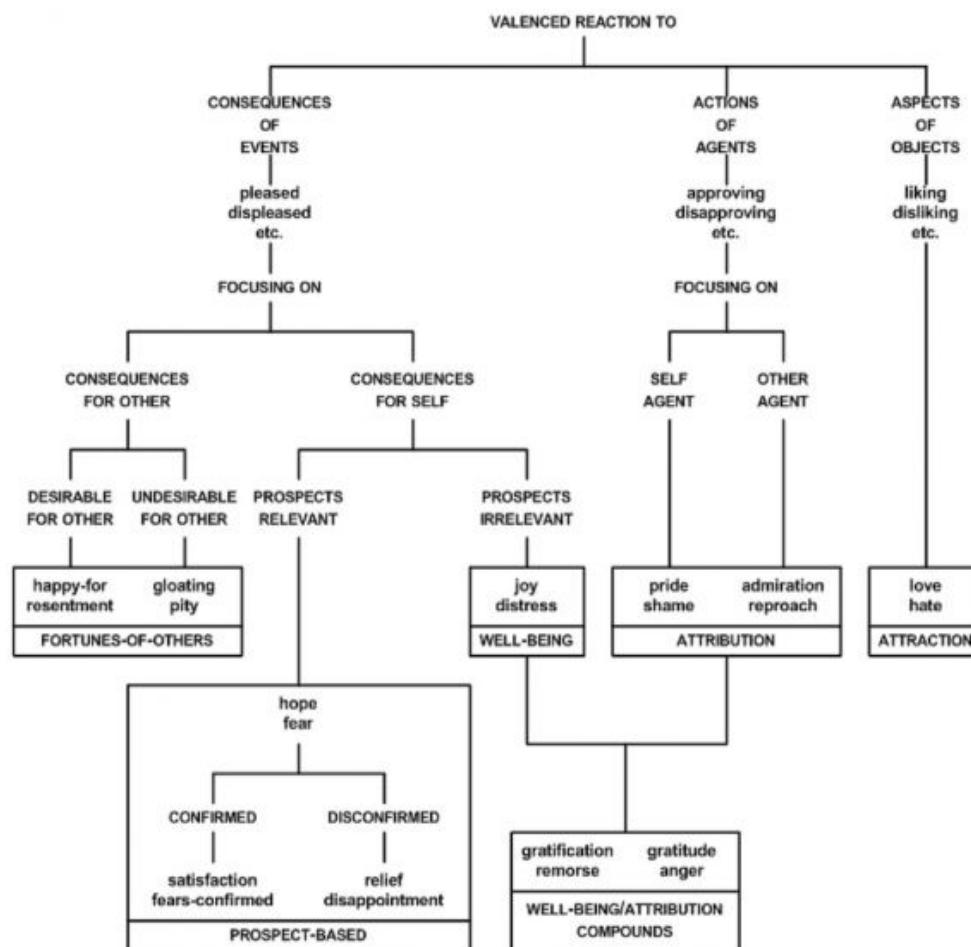


FIGURE 2.6. TAXONOMIE DES EMOTIONS SELON LE MODELE OCC. FIGURE TIREE DE (ORTONY, CLORE, & COLLINS, 1990).

Par exemple, Paleari et al. (Paleari, Grizard, & Lisetti, 2007) ont développé un système qui produit des expressions temporaires lors de différentes phases de l'évaluation cognitive d'un évènement. D'autres chercheurs comme Courgeon et al. (Courgeon & Clavel, 2013) ont proposé un module d'animation faciale basé sur modèle théorique du CPM. Ce module permet de générer des expressions faciales adaptées aux événements survenant lors d'interactions avec un utilisateur dans le contexte d'un jeu interactif.

Afin de pouvoir simuler le traitement cognitif des émotions, certains chercheurs se sont basés sur le modèle OCC proposé par Ortony et al. (Ortony et al., 1990). Ce modèle structuré en arbre/graphique de décision propose une large taxonomie d'émotions définies à partir de trois types de critères (voir Figure 2.6). L'évaluation d'un évènement (appréciation vs dépréciation), les préférences (plaisir) et les conséquences de l'évènement (approbation ou désapprobation). Par exemple, Motola et al. (Motola, Jaques, Axt, & Vicari, 2009) ont développé un agent basé sur le modèle OCC qui reconnaît plusieurs émotions : joie, détresse, satisfaction, déception, reconnaissance, colère et honte. À partir des actions de l'utilisateur, le système identifie ses objectifs et normes puis déduit les émotions. Les motivations des actions de l'utilisateur sont évaluées dans l'environnement d'apprentissage. Les modèles cognitifs sont de plus en plus utilisés pour modéliser les émotions en informatique. Cependant, il subsiste toujours des difficultés dans l'implémentation de certains processus comme la capacité à représenter le contexte de l'évaluation sous forme computationnelle.

2.2.2 LES MODALITES NON-VERBALES DE LA COMMUNICATION DES EMOTIONS ET LEUR UTILISATION EN INFORMATIQUE

La communication des émotions fait partie intégrante de l'interaction interpersonnelle. Par exemple, elle permet de transmettre des états internes ou encore de montrer de l'empathie ou de l'attachement. Les canaux non-verbaux sont largement exploités dans ce type de communication et le toucher en fait partie. Le développement de systèmes de reconnaissance et de synthèse des émotions est au cœur de l'informatique affective. Afin d'y parvenir les chercheurs se basent sur les principales théories des émotions. Dans cette section, nous allons présenter très brièvement les travaux sur les quatre principales modalités non-verbales impliquées dans la communication affective. Les expressions faciales, la voix, la gestuelle et le toucher. Puis, nous aborderons leur utilisation en informatique comme canal de reconnaissance et de synthèse des émotions.

2.2.2.1 L'EXPRESSION FACIALE DES EMOTIONS

En parcourant la littérature traitant de la communication des émotions, on peut remarquer que l'expression faciale est la modalité ayant reçu le plus d'intérêt de la part des chercheurs. Le rôle prééminent de cette modalité fut démontré dès les premières études perceptives. Plusieurs recherches ont montré que les humains sont capables de reconnaître un nombre limité d'émotions distinctes (au moins six). Ce phénomène semble être universel. Les études pionnières menées par Ekman et al. (P Ekman & Friesen, 1975) (Paul Ekman, 1984) (Izard, 1971) soulignent l'existence d'expressions prototypiques soutenant la communication des émotions dites de base (surprise, colère, dégoût, joie, peur, tristesse) à travers différentes cultures (Paul Ekman & Keltner, 1970). Un certain nombre de systèmes à base de mesures d'expressions du visage ont été développés pour décrire ces expressions. Parmi ces approches, le Système de Codage d'Action Faciale (FACS) proposé par Ekman (Paul Ekman & Friesen, 1978) semble être le plus largement utilisé (Cohn, Ambadar, & Ekman, 2007).

Dans ce système, une expression faciale est décomposée en unités d'action (AUs). Une AU représente le plus petit mouvement facial visuellement discriminable. Par exemple, la photographie dans la Figure 1.7 illustre une personne exprimant la colère. On remarque que cette émotion est caractérisée par les AUs 4, 5, 7 et 23. Ces AUs correspondent respectivement à un abaissement et rapprochement des sourcils (muscle pyramidal du nez, depressor supercillii, corrugator supercillii), une ouverture entre la paupière supérieure et les sourcils (muscle orbiculaire de l'œil), une tension de la paupière (muscle orbiculaire de l'œil), et une tension des lèvres (muscle orbiculaire de la bouche). La plupart des études sur la reconnaissance des émotions à travers l'expression faciale ont utilisé des expressions statiques très prononcées et présélectionnées. Aussi, ces expressions furent exprimées par des acteurs en suivant des indications bien précises pour la production de chaque émotion. Cependant, des disparités importantes furent observées dans l'évaluation d'expressions entre les expressions actées et spontanées présentées aux participants (Naab & Russell, 2007).

Il apparaît que les caractéristiques des expressions spontanées peuvent être de plus faible intensité, moins catégoriques et leur interprétation plus ambiguë que les expressions actées. Dans ce cas, il est moins évident d'utiliser un système de codage comme FACS pour décrire les caractéristiques des expressions produites spontanément (Sayette, Cohn, Wertz, Perrott, & Parrott, 2001)(Paul Ekman & Rosenberg, 2005).



FIGURE 2.7. EXEMPLE DE CODAGE DE FACS D'UNE EXPRESSION DU VISAGE. LES NUMEROS SONT LES IDENTIFIANTS DES UNITES D'ACTION CORRESPONDANTS A PLUSIEURS UN MUSCLE FACIAL. LES LETTRES (A-E) IDENTIFIENT LE NIVEAU D'INTENSITE DE L'ACTION FACIALE (PAUL EKMAN & FRIESEN, 1978).

Comme souligné ici, la majorité des études traitant la reconnaissance des expressions faciales utilise des stimuli statiques. Cependant, l'étude de la temporalité des expressions faciales peut fournir des informations importantes sur la personne qui exprime l'émotion. En effet, les stimuli dynamiques peuvent permettre à un observateur de caractériser des expressions subtiles ou encore de juger le degré de confiance (Alves, 2013);(Jack, Garrod, & Schyns, 2014). Malgré les limitations des résultats des recherches actuelles, l'hypothèse que des expressions faciales puissent être associées à des émotions spécifiques est restée largement soutenue. Enfin, Il est important d'observer qu'une expression faciale peut être influencée par plus d'une émotion et peut avoir différentes significations dépendamment du contexte et de la combinaison d'autres modalités comme la position du corps ou de la voix.

2.2.2.2 RECONNAISSANCE ET SYNTHESE DES EXPRESSIONS FACIALES EMOTIONNELLES EN INFORMATIQUE.

A. RECONNAISSANCE DES EXPRESSIONS FACIALES EMOTIONNELLES

Les travaux sur la reconnaissance des émotions se sont multipliés ces dernières années (Sariyanidi, Gunes, & Cavallaro, 2015). Par exemple, Bashyal et al. (Bashyal & Venayagamoorthy, 2008) ont appliqué un filtre de Gabor pour l'extraction d'indices couplé à l'algorithme apprentissage par quantification de vecteur (LVQ) pour reconnaître sept types d'expressions faciales statiques issues d'une base de données de visages humains (JAFFE). Sur la partie non entraînée de la base, les résultats moyens du taux de reconnaissance des expressions sont à 90,2%, ce qui est un résultat très satisfaisant (Bashyal & Venayagamoorthy, 2008). Calder et al. (Calder, Burton, Miller, Young, & Akamatsu, 2001) ont montré qu'une analyse en composantes principales (PCA) couplée à une série d'analyses linéaires discriminantes permettent de faire de la reconnaissance d'émotion ainsi que de classer des expressions faciales sur les échelles du modèle bidimensionnel des émotions (valence, activation). Plusieurs autres méthodes ont été développées pour effectuer la reconnaissance des émotions dans les expressions faciales. Par exemple, les réseaux de neurones (Kobayashi & Hara, 1992), les modèles de Markov cachés (HMM) (Cohen, Sebe, Garg, Chen, & Huang, 2003), le modèle de distribution de points (PDM) (Huang, C. & Huang & Huang, C. & Huang, 1997), le flux optique (Black & Yacoob, 1997), les méthodes géométriques (Bavkar, 2015). Pour une revue plus complète, il est possible de consulter les études de (Zhao, Chellappa, Phillips, & Rosenfeld, 2003) et (Fasel & Luetttin, 2003). Parmi ces méthodes, la représentation de Gabor a été favorisée par de nombreux

chercheurs en raison de ses bonnes performances et l'insensibilité à la posture du visage et le fond de l'éclairage (Tao & Tan, 2005).

B. SYNTHÈSE DES EXPRESSIONS FACIALES ÉMOTIONNELLES

Pour exprimer des émotions à travers le visage, les chercheurs utilisent des techniques d'animation du visage d'un personnage virtuel (informatique graphique) ou robotique (actionnement mécanique). Depuis les débuts des travaux sur l'animation faciale dans les années 1970, la qualité des animations faciales ainsi que l'animation de visages virtuels s'est nettement améliorée. Récemment, plusieurs systèmes d'animation faciale ont été conçus pour exprimer des émotions. Ces systèmes utilisent généralement une animation paramétrique basée sur MPEG4 pour modéliser des expressions faciales d'émotions. Par exemple, XFace (Balci, 2004) est une plateforme gratuite qui comprend une boîte à outils permettant de développer des agents 3D conversationnels qui affichent des émotions. GRETA (Niewiadomski & Pelachaud, 2007) est une plateforme d'agents virtuels capables de synthétiser de nombreuses expressions faciales et de mélanger séquentiellement plusieurs expressions d'émotions. Aussi, les comportements faciaux de l'agent prennent en compte les prédictions de la théorie de politesse (Niewiadomski et al., 2010). Le Framework « Multimodal Affective and Reactive Characters (MARC) » est un autre exemple de Framework d'agents virtuels expressifs proposé dans l'étude de (Courgeon & Clavel, 2013). Les méthodes d'animation faciales implémentées dans MARC sont basées sur différents modèles informatiques des émotions (catégoriel, dimensionnel, cognitif et social).

Dans le domaine de la robotique, plusieurs robots humanoïdes et zoomorphiques expressifs ont été développés afin d'améliorer le sentiment de présence. Par exemple, L'iCat, développé par Philips®, est un robot en forme de chat doté de capacités expressives. Il possède une dizaine de moteurs destinés à l'animation faciale. L'iCat ne possède donc que peu de degrés de liberté utilisables pour animer ces expressions, en comparaison avec les agents virtuels dotés de plusieurs dizaines de degrés de liberté. Leite et al. (Leite et al., 2008) exploitent l'iCat comme compagnon de jeux afin d'améliorer l'expérience des utilisateurs. Ils ont montré que l'affichage d'émotion par le robot permet une meilleure compréhension et perception du jeu par rapport à une interaction sans affichage d'émotion. De Greef et al. (De Greeff, Delaunay, & Belpaeme, 2009) ont présenté une implémentation d'un visage de robot dans une rétroprojection d'un flux vidéo sur un masque facial semi-transparent. Cette technique présente l'avantage d'être plus facile à implémenter sur les systèmes mécatroniques et bénéficie de la flexibilité de l'animation virtuelle. L'équipe de Christian Becker-asano (Christian Becker-asano, Kohei Ogawa, Shuichi Nishio, 2010) a mené une étude pour comparer la perception des utilisateurs des expressions faciales du robot à celle de son modèle humain. Cette étude a montré que les taux de reconnaissance des catégories d'émotions étaient satisfaisants. Cependant, le réalisme du robot pose un problème d'acceptabilité par les utilisateurs. Grâce aux avancées dans le domaine du traitement d'images, la réalité virtuelle et la robotique, les systèmes de reconnaissance et de synthèse d'expressions faciales émotionnelles ne cessent de repousser les limites.

2.2.2.3 L'EXPRESSION VOCALE DES ÉMOTIONS

La voix constitue un autre moyen de transmettre certains indices liés aux émotions. Des études ont été menées pour explorer certaines caractéristiques de prosodie, telles que les variables de pitch (niveau de la fréquence fondamentale F0, rang, contours et giques), le débit de parole, ou encore la qualité de la voix. Les résultats de ces recherches montrent le lien entre les paramètres étudiés et la communication de certaines émotions de base (Banse & Scherer, 1996) (Scherer, 1989) (Johnstone & Scherer, 1999). Ces corrélats ont pour origine des contraintes psychologiques correspondant à un état émotionnel. En effet, un certain nombre de processus psychologiques influence des variables

physiologiques impliquées dans les mécanismes de production vocale (la tension musculaire, la respiration, la phonation). Par exemple, pour l'expression de la joie, on mesure une augmentation dans la fréquence fondamentale (F0) moyenne. L'intensité moyenne semble aussi augmenter. Les chercheurs ont aussi remarqué que la voix induite émotionnellement semble plus généralement être identifiée par l'activation.

D'un point de vue perceptif, des études ont montré que les individus se basent sur des indices acoustiques particuliers pour détecter les émotions. Par exemple, la dimension d'activation est évaluée en se basant sur le pitch, la variation d'amplitude et le tempo (Scherer, 2003). Alors qu'ils évaluent la dimension de valence sur la base de la variation du pitch. Des études ont essayé de savoir si les expressions vocales des émotions pouvaient être discriminées en catégories (Van Bezooijen, 1984), (Scherer, Banse, Wallbott, & Goldbeck, 1991) et (Banse & Scherer, 1996). Scherer (Scherer, 2003) a effectué un large examen de ces études menées sur la perception des catégories d'émotions dans la voix. Son rapport a montré que la précision de la reconnaissance des expressions vocales est généralement un peu inférieure à celle des expressions faciales. Dans l'ensemble, en examinant la reconnaissance de l'émotion à partir d'échantillons de voix prototypiques (prononcées par un acteur), les participants atteignent des précisions entre 55 % et 65 % dans la reconnaissance des catégories d'émotions. En comparaison, des études portant sur la reconnaissance d'expressions faciales rapportent généralement un pourcentage de précision moyenne autour de 75 %. Scherer identifie plusieurs facteurs comme potentiellement responsables de cette différence, notamment, la nature dynamique de la voix (Scherer, 2003). Là où plusieurs recherches posent l'universalité comme une des bases de la perception des expressions faciales émotionnelles (Paul Ekman, 1989), certains chercheurs (McCluskey, Albas, Niemi, Cuevas, & Ferrer, 1975) (Abelin & Allwood, 2000) montrent des différences culturelles dans la perception émotionnelle dans la voix. En général, les taux de reconnaissance des catégories des émotions sont plus élevés pour la personne native du langage de la personne émettrice.

2.2.2.4 RECONNAISSANCE ET SYNTHÈSE DES EXPRESSIONS VOCALES ÉMOTIONNELLES EN INFORMATIQUE

A. RECONNAISSANCE DES EXPRESSIONS VOCALES ÉMOTIONNELLES

Les chercheurs en informatique ont voulu exploiter les caractéristiques acoustiques de la voix pour développer des algorithmes de reconnaissance des émotions dans la voix (Bosch, 2000). Ces algorithmes sont souvent basés sur la détection ou la classification de patterns. Par exemple, Dellaert et al. (Dellaert, Polzin, & Waibel, 1996) ont utilisé des fonctions de prosodie et comparé les trois classificateurs pour reconnaître les émotions dans la voix : le classificateur bayésien à maximum de vraisemblance (MLB), la régression de Kernel (KR) et K plus proches voisins (KNN). Les résultats de classification étaient similaires à ceux obtenus par des utilisateurs. Plus tard, Pierre-Yves (Pierre-Yves, 2003) a présenté une expérience d'analyse de données à grande échelle sur la reconnaissance automatique des émotions sur la base d'énoncés courts et informels de la vie de tous les jours. L'auteur a testé un large ensemble d'algorithmes d'apprentissage, allant des réseaux neurones, Support Vector Machines (SVM) ou des arbres de décision, en incluant 200 indices sur une large base de données. Les résultats ont montré que la différence de performance entre les approches d'apprentissage peut être importante.

B. SYNTHÈSE DES EXPRESSIONS VOCALES ÉMOTIONNELLES

Pour synthétiser des voix émotionnelles, plusieurs projets se sont basés sur la synthèse par formants. Ce type de synthèse permet de contrôler de nombreuses caractéristiques du signal : on peut contrôler la qualité de la voix, la hauteur, l'intensité, les distributions d'énergies spectrales, le ratio entre les harmoniques et le bruit ou encore la précision articulaire. Ces possibilités de contrôle permettent de modéliser de nombreux effets de coarticulation se produisant dans des discours émotionnels. Cependant, la synthèse par formants produit une qualité de discours qui demeure insatisfaisante (les voix sont encore tout à fait anormales). Par exemple, Cahn (Cahn, 1990), au moyen d'un éditeur graphique qui permet de manipuler les paramètres d'un modèle acoustique, arrive à synthétiser manuellement des expressions émotionnelles. L'auteur a montré à travers une expérimentation que le système était capable de synthétiser des voix émotionnelles reconnaissables et assez réalistes. Ces dernières années, les méthodes de synthèse par concaténation ont gagné en popularité. Elles offrent une qualité de synthèse supérieure à celle basée sur la synthèse par formants. Cependant, elle est plus difficile à appliquer car seulement le contour du pitch, l'intensité du contour et la durée des phonèmes peuvent être contrôlés. Par exemple, Ida et al. (Ida, Campbell, Iga, Higuchi, & Yasumura, 2000) utilisent une base de données de voix pour chaque émotion comme base des segments préenregistrés à concaténer dans la synthèse. Les résultats obtenus étaient satisfaisants. Cependant, cette méthode ne permet pas de modifier la voix ou d'ajouter de nouvelles émotions ou même de contrôler l'intensité des émotions. La deuxième approche consiste à élaborer des bases de données de discours émotionnels humains puis calculer le périmètre de pitch et d'intensité pour générer des phrases (Edgington, 1997). Les résultats de ce type de concaténation semblent insatisfaisants. En effet, le discours ne semble pas naturel et les émotions ne sont pas très bien reconnues par les auditeurs humains (Schröder, 2001).

2.2.2.5 L'EXPRESSION GESTUELLE DES ÉMOTIONS

Les mouvements du corps ont été reconnus comme un canal important pour la communication non-verbale des émotions (Kleinsmith & Bianchi-Berthouze, 2013). Plusieurs chercheurs ont montré que les changements de l'état affectif d'une personne peuvent se refléter par des changements de la position du corps (Mehrabian & Friar, 1969) (Wallbott, 1998). Par exemple, on a examiné si les émotions pouvaient être caractérisées par des postures et des mouvements du corps spécifiques en utilisant un système de codage basé sur l'anatomie du corps et la qualité du mouvement (Wallbott, 1998). Il a été demandé à un groupe d'acteurs d'exprimer avec leurs corps plusieurs émotions pour un scénario donné. L'analyse de l'annotation utilisée a montré que la plupart des indices proposés peuvent servir à distinguer des émotions. Par exemple, l'émotion de « l'ennui » est montrée par de faibles mouvements, des mouvements non-expansifs, tandis que la « joie » se caractérise par des mouvements à haute activité, des mouvements expansifs et une dynamique de mouvement élevé. DeMeijer et al. (de-Meijer, 1989) ont examiné si les mouvements particuliers du corps peuvent renseigner sur des émotions distinctes. Ils ont montré à un groupe de participants des vidéos dans lesquelles on remarque des caractéristiques spécifiques des mouvements.

Les résultats suggèrent que des mouvements spécifiques ont été attribués à chaque catégorie émotionnelle à l'exception du dégoût. Par exemple, la surprise est caractérisée par un tronc et des jambes droites, un mouvement vers l'arrière et des mouvements de vitesse rapide. La peur est, quant à elle, caractérisée par une courbure au niveau du tronc et de la tête, les genoux légèrement pliés, vers le bas, des mouvements généralement rapides et les muscles tendus.

Tandis que beaucoup d'études présentées ont examiné les expressions du corps qui décrivent des émotions en termes catégoriels, moins d'études ont essayé de les classer en matière de dimensions

affectives. Du point de vue de Kleinsmith et al. (Kleinsmith & Bianchi-Berthouze, 2013), pour obtenir une meilleure description des émotions dans les expressions corporelles, on devrait exploiter conjointement les représentations catégorielles et dimensionnelles. Par exemple, Patterson et al. (Patterson, Pollick, & Sanford, 2003) ont proposé de projeter les mouvements du corps sur un modèle de circumplex d'affect avec des niveaux de valence et d'activation. Ces résultats montrent que les dimensions de valence et d'activation sont également utilisées par des observateurs humains pour décrire les expressions corporelles affectives.

2.2.2.6 RECONNAISSANCE ET SYNTHÈSE DES EXPRESSIONS GESTUELLES EMOTIONNELLES EN INFORMATIQUE

A. RECONNAISSANCE DES EXPRESSIONS GESTUELLES EMOTIONNELLES

De plus en plus de recherches montrent que les expressions corporelles sont aussi efficaces que les expressions faciales ou la voix dans la communication des émotions. Ces résultats encouragent le développement de technologies permettant d'analyser les signaux affectifs exprimés par le corps. Comme pour les expressions faciales ou la voix, les systèmes de détection automatique des émotions sont basés sur des corpus d'expressions étiquetés (actés ou spontanés). Selon (Karg et al., 2013), le développement de systèmes de reconnaissance automatique sont décrit par quatre étapes. Tout d'abord, l'estimation des trajectoires du mouvement à partir des capteurs (flux vidéo, système de capture de mouvements). Ensuite, les enregistrements sont segmentés avec des fenêtres de temps. Puis on extrait les indices et enfin on applique des algorithmes de classifications pour identifier les émotions. Par exemple, Karg et al. (Karg, Kuhnlentz, & Buss, 2010) se sont intéressés à la détection automatique des émotions dans la démarche. Dans leur étude, ils ont comparé une approche de détection catégorielle et une approche dimensionnelle (valence-activation-dominance). Aussi, différents algorithmes de classifications ont été comparés. Le résultat était significativement plus élevé que l'évaluation de l'observateur humain sur le même corpus. Kleinsmith et Bianchi-Berthouze ont examiné la reconnaissance des émotions sur des corpus actés (Kleinsmith & Bianchi-Berthouze, 2007). Les modèles proposés permettent de détecter trois catégories d'émotions. Ils permettent aussi de détecter les niveaux de quatre dimensions affectives. Plus récemment, les mêmes auteurs ont appliqué ces techniques sur un corpus d'expressions spontanées (Kleinsmith, Bianchi-Berthouze, & Steed, 2011). Les taux de reconnaissance sont inférieurs à ceux obtenus pour les expressions actées.

B. SYNTHÈSE DES EXPRESSIONS GESTUELLES EMOTIONNELLES

La gestuelle est aussi utilisée pour afficher les émotions, notamment grâce aux agents virtuels et aux robots humanoïdes. Par exemple, dans le cadre du développement d'un agent virtuel conversationnel, Hartmann et al. (Hartmann, Mancini, & Pelachaud, 2006) présentent un modèle de calcul de la qualité du geste pour animer l'avatar. Ils caractérisent l'expression corporelle avec des dimensions dérivées de revues de la littérature en psychologie. Ces dimensions sont ensuite exploitées par le système d'animation des gestes.

2.2.2.7 LES EXPRESSIONS HAPTQUES DES EMOTIONS

De la même façon que l'expression du visage, la voix ou les mouvements du corps, le toucher est un canal important pour communiquer des émotions ou pour soutenir d'autres indices affectifs comme le réconfort. Hertenstein et ses collègues (Hertenstein, Keltner, App, Bulleit, & Jaskolka, 2006)(Hertenstein et al., 2009) ont ainsi montré à travers une série d'expérimentations que la stimulation haptique peut être utilisée pour communiquer au moins six catégories d'émotions. Les

auteurs ont constitué deux groupes de participants (i.e. codeurs, décodeurs). Ils ont demandé au premier groupe d'exprimer une liste d'émotions sur les bras d'un partenaire. Ensuite, les participants du deuxième groupe devaient indiquer quelle catégorie d'émotion leur était communiquée. Les participants ont pu décoder la colère, la peur, le dégoût, l'amour, la gratitude et la sympathie. Des modèles spécifiques et les caractéristiques physiques du contact ont été utilisés par des participants pour communiquer des émotions différentes pendant l'expérimentation. Par exemple, la colère est codée par les actions de frapper, serrer, trembler avec une forte intensité. Dans une autre expérimentation, on a demandé à un groupe de participants de visionner des vidéos de la première expérimentation montrant des paires de participants en train de communiquer une liste d'émotions en utilisant le toucher. Les résultats montrent que les participants sont capables de décoder avec précision certaines émotions distinctes en regardant simplement d'autres individus communiquer via le toucher. Enfin, les auteurs ont observé que les taux de reconnaissance des émotions via le toucher sont comparables avec ceux obtenus avec des expressions du visage ou la voix pour certaines émotions. Des recherches ont mis en évidence qu'un contact tactile léger est, en général, agréablement perçu. Ce type de contacte tactile constitue un composant important dans les interactions sociales. Il pourrait donc jouer un rôle central dans la formation et le maintien des liens socio-affectifs (Olausson et al., 2010).

Des chercheurs ont conduit une série d'études établissant l'existence de fibres dans la peau velue ayant un potentiel particulier pour susciter des perceptions subjectives agréables. Les études utilisant des techniques qui mesurent l'activité cérébrale comme le fMRI sur la population adulte (Löken, Evert, & Wessberg, 2011)(Ackerley et al., 2012) ont montré que les CT-afférents sont sensibles aux aspects affectifs, mais n'ont pas de rôle dans la localisation ou la discrimination par contact. Nous apporterons plus de détails sur le fonctionnement de ces fibres dans la section 2.3.2.4 de ce chapitre. (Guest et al., 2009) ont présenté deux études pour examiner la perception tactile dans l'interaction interpersonnelle. Dans la première expérience, ils ont demandé aux participants d'évaluer quatre caractéristiques perceptuelles (i.e. la douceur, rigidité, souplesse et le plaisir) du contact avec leur propre peau au niveau de la main et de l'avant-bras, puis celui de plusieurs autres participants. Les évaluations ont été faites en utilisant des échelles de valeurs continues. En général, la peau des autres individus est évaluée comme plus plaisantes que sa propre peau. Les auteurs estiment que l'aspect social d'une interaction physique peut affecter positivement la perception tactile, notamment par la libération d'une hormone de plaisir (i.e. l'ocytocine). Aussi, le contact de la peau de l'avant-bras est plus lisse, plus doux, et plus agréable que la peau de la paume de la main.

Bien que plusieurs travaux de recherche traitent du rôle important du toucher dans la communication affective, ce canal reste très peu étudié dans le champ de la recherche affective.

2.2.2.8 RECONNAISSANCE ET SYNTHÈSE D'EXPRESSIONS HAPTQUES EMOTIONNELLES

Très peu de recherches ont mis l'accent sur la conception de dispositifs et de systèmes pouvant détecter, traiter ou afficher l'état émotionnel par le sens du toucher. Heureusement, au cours de ces dix dernières années, on remarque un intérêt grandissant de la part des chercheurs en informatique affective pour cette modalité. Par exemple, Gao et al. (Gao, Bianchi-Berthouze, & Meng, 2012) ont proposé de développer un système capable de détecter l'état émotionnel d'un joueur sur tablette tactile. Leur démarche a consisté à extraire les caractéristiques de l'interaction des doigts avec la tablette puis de les analyser. Des algorithmes d'apprentissage automatique ont été utilisés pour construire ces systèmes qui permettent de distinguer automatiquement entre quatre états émotionnels (excité, détendu, contrarié, ennuyé) ayant deux niveaux d'activation et deux niveaux de valence. La précision de la reconnaissance des émotions a atteint des niveaux entre 69 % et 77 % pour les quatre

états émotionnels et un résultat plus élevé (89 %) a été obtenu pour distinguer entre deux niveaux d'activation et deux niveaux de valence. D'autres chercheurs (Silvera-Tawil, Rye, & Velonaki, 2014) ont présenté des expérimentations sur la classification du toucher social sur un bras d'un mannequin recouvert d'une peau artificielle pouvant mesurer la pression exercée. Un classificateur basé sur l'algorithme « LogitBoost » a été utilisé pour classer six émotions et six messages sociaux transmis à travers le toucher appliqué par le participant sur le bras du mannequin. Les résultats montrent que les performances de la classification automatique sont comparables à ceux obtenus par les humains. Jung et al., (Jung et al, 2014) ont collecté un corpus d'interactions tactiles sociales contenant des patterns utilisés dans les interactions affectives. Sur ce même corpus les auteurs ont appliqué les classificateurs Bayésiens et SVM pour reconnaître les 14 gestes tactiles enregistrés. Les résultats de cette classification ont montré une précision globale de 54% et 53% respectivement.

Dans les applications de télé-présence, les stimulations tactiles affectives peuvent être exploitées pour permettre d'améliorer les communications interpersonnelles à distance (Cha, Eid, Rahal, & Saddik, 2008). Dans les applications de santé, des patients hospitalisés peuvent bénéficier d'un réconfort grâce à une interaction haptique avec un robot (Bickmore, Fernando, & Ave, 2009). Dans des environnements de jeux, le toucher peut être utilisé pour détecter l'émotion des utilisateurs ou leur niveau de stress (Gao et al., 2012). Dans le domaine de la robotique, le toucher peut être un bon vecteur pour améliorer l'interaction et la collaboration avec les robots (Vanderborght et al., 2012).

Dans cette thèse nous nous intéressons particulièrement à cette modalité. C'est dans ce sens que nous présenterons séparément (i.e. dans la deuxième partie de ce chapitre) les travaux les plus pertinents sur la communication affective médiée à travers les technologies haptiques.

2.2.2.9 LA MULTIMODALITE DANS LA COMMUNICATION DES EMOTIONS

La communication des émotions est clairement multimodale. Nous utilisons plusieurs canaux simultanément : Par exemple, la voix, l'expression faciale et la gestuelle. Récemment, quelques études ont examiné la combinaison d'expressions affectives et leurs perceptions (Bänziger, Grandjean, & Scherer, 2009). En effet, nous pouvons utiliser les différentes modalités de communication non verbale afin d'augmenter l'efficacité de la transmission et la reconnaissance des messages émotionnels. La majorité de ces études a concerné la combinaison du visage et de la voix (Campanella & Belin, 2007). Les résultats de ces travaux suggèrent que la congruence dans des informations entre l'expression du visage et la prosodie facilite des réactions comportementales aux stimuli émotionnels (Bänziger et al., 2009; Dolan, Morris, & de Gelder, 2001; Edwards, Jackson, & Pattison, 2002; D W Massaro & Egan, 1996; Shackman & Pollak, 2005). Aussi, les informations obtenues via une modalité peuvent changer le traitement de l'information contenue dans une autre modalité. Cette observation a été obtenue même quand les participants ont été instruits pour baser leur jugement sur juste une des deux modalités (de Gelder & Vroomen, 2000; Ethofer et al., 2006). De Gelder et al. (Meeren, van Heijnsbergen, & de Gelder, 2005) suggèrent que l'expression du corps fournit de bons moyens pour communiquer des émotions discrètes. En outre, ils ont démontré que le jugement de l'expression du visage est influencé par l'expression du corps, particulièrement lorsque l'émotion exprimée par le visage est ambiguë. Une autre expérimentation montre aussi que la reconnaissance du ton émotionnel de la voix peut être influencée par les expressions du corps (Van den Stock, Righart, & de Gelder, 2007). Les recherches qui abordent l'étude du toucher combiné avec d'autres modalités pour l'expression et la perception des émotions, principalement dans le domaine de l'interaction homme-machine, ont essayé d'examiner cette problématique. Par exemple, Bickmore et al. (Bickmore, Fernando, Ring, & Schulman, 2010) ont conçu un agent virtuel capable de toucher physiquement un utilisateur en synchronie avec d'autres canaux de communication non-verbaux. Le visage de l'agent

virtuel est affiché sur un moniteur fixé sur le haut d'un mannequin humain. Les comportements de contact sont transmis par une poche pneumatique qui serre la main d'un utilisateur. D'un point de vu applicatif, l'agent est conçu pour exprimer de l'empathie aux utilisateurs dans un environnement clinique. Les auteurs ont montré que l'utilisation du toucher peut améliorer les perceptions de relation avec l'agent. Ces travaux ont pour objectif d'accompagner les patients dans le milieu hospitalier.

La multimodalité s'inscrit dans la nature multi-sensorielle des interactions interpersonnelles. App et al. (App et al., 2011) ont examiné l'hypothèse que certaines émotions sont plus efficacement transmises par les canaux de communication non verbaux spécifiques tels que le corps, le visage et le toucher. Les résultats d'une première expérience conduite par les auteurs ont mis en évidence que les participants favorisaient quelques canaux pour exprimer des émotions distinctes. Par exemple, les participants ont préféré utiliser les mouvements du corps dans l'expression de l'embarras, la culpabilité, la fierté et la honte. Les expressions du visage ont été préférées pour exprimer la colère, le dégoût, la crainte, la joie et la tristesse. Finalement, le toucher a été choisi pour exprimer l'amour et la sympathie. Une deuxième expérience a montré que les émotions communiquées sont mieux reconnues quand les participants perçoivent les émotions par les canaux privilégiés de communication. Les auteurs suggèrent que la fonction sociale d'une émotion prévoit sa modalité principale. Ils avancent que les expressions du visage sous-tendent la communication des émotions liées à la survie. Le mouvement du corps promeut des émotions de statut social et le canal haptique favorise la communication des émotions intimes.

2.2.2.10L'UTILISATION DES SIGNAUX MULTIMODAUX DANS LA RECONNAISSANCE ET LA SYNTHÈSE DES ÉMOTIONS

A. RECONNAISSANCE DES ÉMOTIONS

La communication des émotions est largement multimodale. En effet, l'interaction interpersonnelle par définition est une interaction multimodale dans laquelle on utilise un flux de mimiques, gestes, postures corporelles, mouvements de la tête, mots, voix prosodique, expressions faciales, regards, toucher, etc. La plupart des chercheurs sont convaincus que les systèmes multimodaux sont indispensables pour améliorer les performances de reconnaissance et la synthèse des émotions (Lisetti & Bastard, 2004) (Pantic, Sebe, Cohn, & Huang, 2005) (Wagner, Lingens, André, & Kim, 2011). Dans leur méta-analyse, D'Mello & Kory (D'mello & Kory, 2015) ont observé qu'en moyenne la multimodalité permettait d'améliorer la reconnaissance d'environ 10% par rapport à la meilleure des modalités.

Par exemple, Castellano et al. (Castellano, Kessous, & Caridakis, 2007) ont proposé une approche multimodale pour reconnaître les émotions à partir d'informations issues des expressions faciales, du mouvement du corps, de la gestuelle et des discours. Cette approche est basée sur un classificateur Bayésien entraîné sur un corpus multimodal de huit émotions. La première étape consistait à entraîner individuellement des classificateurs pour chaque modalité. Puis les données ont été fusionnées au niveau de l'extraction d'indices ou de la décision. Les résultats de la fusion des données multimodales ont permis d'augmenter le taux de reconnaissance en comparaison avec les systèmes unimodaux. En effet, l'approche multimodale a donné une amélioration de plus de 10 % par rapport au système unimodal. (Gilroy et al., 2009) ont présenté une fusion multimodale pour la détection d'affect représenté dans un modèle dimensionnel, Plaisir-Arousal-Dominance (PAD). Chaque modalité d'entrée est représentée comme un vecteur. Ce modèle intègre le contenu affectif et le contenu temporel dans une approche unifiée. (Hussain, Monkaresi, & Calvo, 2012) ont développé un système de détection d'émotions des utilisateurs dans les environnements informatiques pour l'apprentissage.

Leur modèle permet de détecter l'état émotionnel dans une représentation dimensionnelle et catégorielle. La comparaison entre les deux approches a mis en évidence de meilleures performances. (Bozkurt, Erzin, & Yemez, 2015) ont proposé un système d'analyse d'affect continu pour la synthèse de discours prosodiques et de gestuelle dans un contexte d'interaction homme-avatar virtuel. En utilisant les modèles Markov cachées (HMM), les auteurs synchronisent le discours avec les gestes de la main en se basant sur les dimensions continues de valence, d'arousal et de dominance. (Shen, Fu, & Xuan, 2010) ont introduit un système qui synthétise le discours audiovisuel et émotionnel pour un agent conversationnel 3D. Ce système est basé sur un modèle GMM pour prédire la variation des caractéristiques acoustiques pour le discours émotionnel en se basant sur les valeurs des dimensions PAD. Le système permet à l'agent 3D d'interagir émotionnellement avec l'utilisateur affichant des expressions faciales synchronisées avec le discours.

B. SYNTHÈSE DES ÉMOTIONS

Récemment, Lhommet et al. (Lhommet, Xu, Marsella, & Avenue, 2013) ont proposé une méthode pour générer automatiquement des signaux non verbaux réalistes pour animer des personnages virtuels durant un discours oral. Ce système analyse les propriétés acoustiques, syntaxiques, sémantiques et rhétoriques du texte et de signal audio pour générer le comportement non verbal tel que les mouvements de la tête, les saccades oculaires et des animations gestuelles novatrices basées sur la coarticulation. La plateforme MARC proposée par Courgeon et al., (M Courgeon & Clavel, 2013) permet d'afficher des émotions exprimées par des agents virtuels à travers le visage mais aussi le corps (Matthieu Courgeon, Clavel, Tan, & Martin, 2011)(Tan, Clavel, Courgeon, & Martin, 2010)(Courgeon et al. 2011, Tan et al. 2010). MARC a été utilisée dans de nombreuses applications comme le jeu, l'intelligence ambiante, ou encore les applications thérapeutiques.

2.2.3 RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ÉMOTIONS ET L'INFORMATIQUE

Les émotions jouent plusieurs rôles importants dans la vie des humains en réagissant rapidement à des stimuli critiques à la survie et en préparant l'organisme pour l'exécution et la coordination des réponses comportementales nécessaires, ou encore en activant des comportements adaptatifs dans des environnements complexes comme les interactions sociales. La fonction communicative des émotions a clairement été démontrée. Nous pouvons communiquer des émotions à travers plusieurs modalités comme les expressions faciales, la voix et le toucher. Plusieurs théories ont été proposées au fil du temps pour expliquer les mécanismes qui sous-tendent la production des émotions (Gross & Barrett, 2011)(Gross & Barrett 2011). À l'égard du rôle prééminent des émotions dans l'intelligence, les chercheurs en informatique se sont intéressés à la modélisation des émotions afin de proposer des systèmes pouvant simuler, identifier et synthétiser des signaux émotionnels. Dans cette perspective, trois approches se sont révélées les plus pertinentes pour la modélisation informatique. Dans le domaine de l'informatique affective, et plus généralement, celui des interactions sociales homme-machine, la modalité haptique a reçu moins d'intérêt. Ceci est dû à plusieurs facteurs technologiques et expérimentaux. Quelques chercheurs ont voulu examiner son potentiel en développant des interfaces haptiques pour ce type de communication.

Dans la partie suivante, nous allons présenter la perception haptique avec un intérêt particulier pour les aspects sociaux et affectifs. Nous proposerons ensuite quelques applications de cette modalité pour la communication affective médiée.

2.3 LE TOUCHER & LES INTERACTIONS AFFECTIVES

2.3.1 L'HAPTIQUE COMME DOMAINE DE RECHERCHE

Le toucher représente un moyen fondamental dans notre interaction avec le monde (Barnett, 1972) (Hertenstein & Campos, 2001). Le toucher est à la fois une modalité perceptive et un instrument moteur. La modalité sensorielle primaire que représente le sens du toucher est décrite comme le système somatosensoriel. Elle comprend les fibres nerveuses périphériques afférentes et les récepteurs spécialisés, permettant la perception kinesthésique (articulation, muscle) et la sensibilité tactile (cutanée). Le sens cutané est composé traditionnellement de quatre sous-modalités reconnues qui transmettent les informations tactiles, kinesthésiques thermiques et douloureuses au système nerveux central. Récemment des études ont montré l'existence d'une cinquième sous-modalité qui transmet des propriétés affectives positives du toucher (Olausson et al., 2010). À l'égard de l'importance du toucher les chercheurs en technologie ont développé des systèmes permettant d'utiliser cette modalité dans des environnements médiés. Aujourd'hui, les technologies haptiques sont impliquées dans des domaines d'applications différents. Par exemple, dans le domaine de la conception assistée par ordinateur (CAO), l'haptique permet d'améliorer la vitesse et la précision de l'édition et l'assemblage des modèles 3D en Réalité Virtuelle (VR) (Bordegoni, Cugini, Belluco, & Aliverti, 2009). Dans le domaine de la rééducation physique, l'haptique joue un rôle important pour l'apprentissage de compétences sensorimotrices (Broeren, Dixon, Sunnerhagen, & Rydmark, 2006). L'apprentissage et le divertissement peuvent être aussi cités comme des disciplines où plusieurs études ont montré le potentiel de l'haptique pour améliorer l'apprentissage de gestes manuels et l'interactivité à travers des approches basées sur les simulateurs (exemple, un simulateur d'interventions chirurgicales) ou encore les jeux sérieux (Sourina, Wang, & Nguyen, 2011). Cependant, le déploiement des dispositifs haptiques dans des domaines d'applications publiques et industrielles reste restreint. Ceci est dû aux limites de quelques facteurs de performances des dispositifs haptiques existants. En effet, en examinant les interfaces actuelles proposées dans le secteur académique et industriel, on remarque qu'elles sont souvent limitées à un domaine d'application spécifique. De plus, beaucoup de dispositifs haptiques à stimulation kinesthésique sont basés sur des structures robotisées articulées comme des exosquelettes (Nakai, Ohashi, & Hashimoto, 1998), ou des systèmes à câble (Sato, Hirata, & Kawarada, 1992). De par leur nature, ces dispositifs doivent être physiquement connectés à l'utilisateur par des systèmes mécaniques pour interagir avec l'objet virtuel. Ces systèmes sont souvent intrusifs, limitant le confort et la transparence d'interaction avec l'environnement. L'étude et la conception de technologies haptiques pour la communication sociale et affective constituent un nouveau défi majeur pour les chercheurs car ce domaine d'application est particulièrement sensible aux contraintes évoquées. La conception d'interactions haptiques affectives pertinentes est donc fortement liée à la possibilité de concevoir des systèmes non-intrusifs capables d'offrir des interactions fidèles et transparentes.

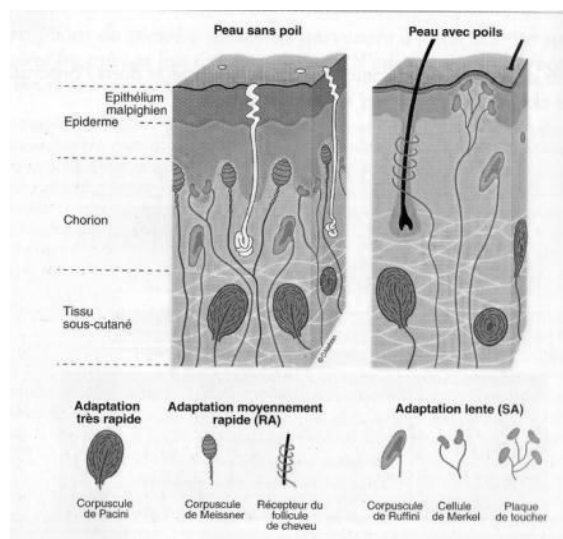


FIGURE 2.8 : A GAUCHE, UNE REPRESENTATION DE LA PEAU AVEC LES DIFFERENTS MECANORECEPTEURS SENSORIELS DE LA PERCEPTION TACTILE (TIREE (BOISACQ-SCHEPENS & CROMMELINCK, 2000)).

Dans cette partie, nous allons d'abord expliquer comment l'information haptique est codée, transmise au cerveau et enfin traitée dans le cortex. Nous nous intéressons particulièrement à la perception affective. Ensuite, nous présenterons le principe de fonctionnement des interfaces haptiques et une brève revue des technologies d'actionnement apportant des éléments de réponse aux contraintes des interfaces intrusives. Enfin, nous présenterons quelques travaux pertinents dans le domaine de la communication affective médiée par le toucher.

2.3.2 LA PERCEPTION HAPTIQUE

2.3.2.1 LE CODAGE DE L'INFORMATION HAPTIQUE

A. LA PERCEPTION TACTILE

La sous-modalité tactile du système somatosensoriel régit la stimulation des pressions, vibrations, frictions et textures. La déformation d'une partie de la peau stimule des récepteurs appelés mécanorécepteurs. Ces récepteurs se situent dans différentes couches de la peau (épiderme, derme et couche sous-cutanée) et possèdent différentes caractéristiques leur permettant de coder plusieurs types d'informations physiques (Figure 2.1) : corpuscules de Pacini, corpuscules de Meissner, les disques de Merkel ainsi que des terminaisons de Ruffini, collectivement connus comme les mécanorécepteurs à seuil de réaction bas (LTMs). Les deux premières structures réagissent aux stimuli lents, avec une réponse fréquentielle entre 1 Hz et 200 Hz, et montrent une résolution spatiale importante. Les deux autres structures réagissent aux stimuli rapides, avec une réponse fréquentielle entre 10 Hz et 1000 Hz. Cependant, ces récepteurs ont une distribution spatiale plus faible. Il faut souligner que la densité des mécanorécepteurs est non uniforme sur le corps. Par exemple, dans la main, on peut avoir une présence différente pour chaque type de récepteur (voir Figure 2.2).

B. LA PERCEPTION THERMIQUE

La perception thermique joue un rôle très important dans la régulation de la température du corps et dans la détection de stimuli potentiellement dangereux pour l'organisme. Au sein du système de perception thermique, on peut distinguer deux niveaux de récepteurs. Les récepteurs de stimuli thermiques inoffensifs et les nocicepteurs qui répondent à des températures nocives ($\leq 20^{\circ}\text{C}$ et $\geq 45^{\circ}\text{C}$). Le premier type de récepteur est composé de deux ensembles de fibres thermo-sensorielles : l'un répond

à des températures chaudes et l'autre répond à des températures froides. Les récepteurs de températures chaudes sont connectés uniquement à des fibres de type C. Ils s'activent à partir de 30°C et augmentent leur décharge jusqu'à 45°C (sensation de chaud), au-delà, les nocicepteurs sont activés (sensation de brûlure et début des lésions cutanées). Les récepteurs au froid sont surtout connectés à des fibres de type A δ et augmentent leur décharge entre 25°C et 35°C. Leur activité diminue ensuite pour devenir nulle vers 10°C. Au-delà, les nocicepteurs sont stimulés (anesthésie, sensation de brûlure). Il existe aussi des récepteurs sensibles à la fois à la déformation et à la température. Ces récepteurs sont appelés mécanorécepteurs thermo-sensitifs (Necker & Reiner). Ainsi, le système somatosensoriel cutané détecte les changements dans la température ambiante et de contact de différentes manières. Des terminaisons de fibres nerveuses sensibles au froid ou à la chaleur sont situées dans l'épiderme. La superficie totale occupée par les terminaisons d'une seule fibre nerveuse thermosensible est relativement petite (1 mm de diamètre). La densité de ces points sensibles varie en fonction des zones du corps. Par exemple, il y a environ vingt points froids par centimètre carré dans les lèvres, quatre dans le doigt, et moins de Un point par centimètre carré dans les zones de tronc (McGlone & Reilly, 2010). Il faut aussi noter que les nerfs sensibles au froid sont au moins cinq fois plus nombreux que ceux sensibles aux températures chaudes (Green, 2004).

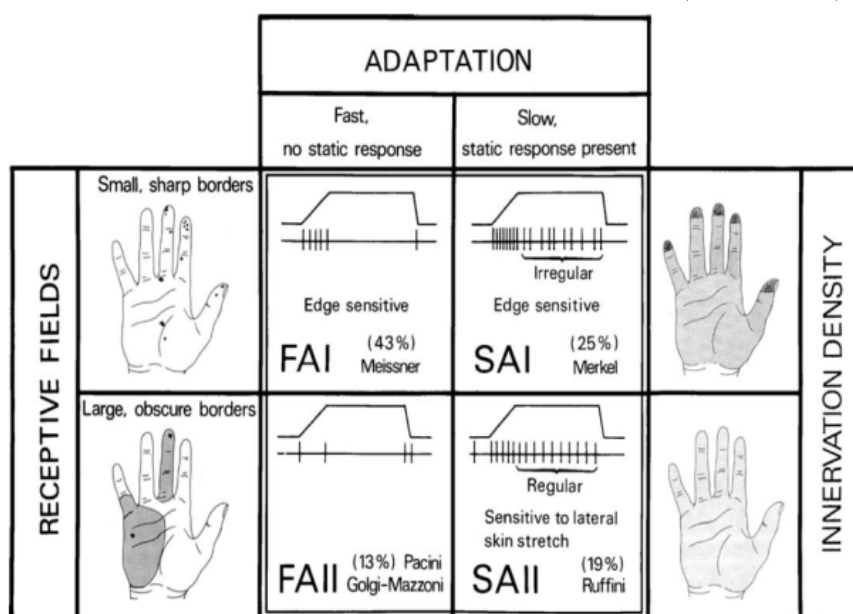


FIGURE 2.9 : LES QUATRE TYPES DE MECANORECEPTEURS DE BAS SEUIL DANS LA PEAU DE LA MAIN HUMAINE SONT REPRESENTES. LES QUATRE PANNEAUX DU CENTRE MONTRENT LA REPOSE DU NERF A UNE STIMULATION EN RAMPE. LES QUATRE PANNEAUX EXTERIEURS MONTRENT DISTRIBUTIONS ET LA DENSITE

C. LA PERCEPTION DE LA DOULEUR

La nociception est un mécanisme d'encodage détectant les dommages des tissus (Auvray, Myin, & Spence, 2010). Ce mécanisme est basé sur deux afférents primaires qui comprennent les fibres A δ et les fibres C. Ces derniers répondent de manière sélective aux niveaux d'intensité thermique, mécanique et chimique menaçant l'organisme. Les nocicepteurs sont très nombreux au niveau de la peau. Cependant, au niveau des tendons, des articulations et des viscères, les nocicepteurs sont moins nombreux rendant ces régions du corps moins sensibles. Il existe 3 grandes catégories de nocicepteurs : 1) Les nocicepteurs mécaniques (surtout liés aux fibres A δ) qui répondent aux piqûres, aux pincements ou aux torsions de la peau. Leur décharge qui dure tout le temps de la stimulation, et sont à l'origine d'une sensation brève et précise. Ils sont organisés en deux réseaux : superficiel (épiderme) et profond (derme). 2) Les nocicepteurs thermiques (surtout liés aux fibres C) répondent

à des stimuli thermiques élevés ($> 45^{\circ}\text{C}$) ou bas ($< 10^{\circ}\text{C}$). 3) Les nocicepteurs polymodaux (surtout liés aux fibres C) répondent à la fois à des stimuli nociceptifs mécaniques et thermiques, et sont à l'origine d'une sensation durable et moins précise en termes de localisation. Ils se situent principalement au niveau des muscles, des tendons et des articulations.

D. LA PERCEPTION KINESTHESIQUE

S'ajoutent à la sensibilité cutanée les informations issues de la déformation mécanique des récepteurs liés à la perception de notre corps dans l'espace et à la perception de force. Ces récepteurs proprioceptifs se situent au niveau des muscles (les fuseaux neuromusculaires), des tendons (les organes tendineux de Golgi) et des articulations (les corpuscules de Ruffini, de Golgi et de Pacini) (McCloskey, 1988). Les fuseaux neuromusculaires fournissent principalement des informations sur la longueur des muscles ou sur la vitesse de changement de cette longueur. Ils permettent en outre de connaître l'état de fatigue du muscle. Les récepteurs fournissent des informations sur le niveau de la contraction musculaire. Les récepteurs articulaires sont sensibles aux variations de positions et aux rotations.

2.3.2.2 TRANSMISSION DES INFORMATIONS HAPTQUES

Les informations haptiques codées par les récepteurs cutanés et proprioceptifs sont transmises sous forme de signal électrique. Cependant, cette transmission est un phénomène complexe car elle mobilise plusieurs mécanismes. Suivant leur nature, les signaux empruntent deux voies ascendantes majeures (voir Figure 2.3 à gauche) : la voie lemniscale (ou voie cordonale postérieure) et la voie extralemniscale (système antérolatéral). La voie lemniscale est composée majoritairement de grosses fibres à conduction rapide (30 à 110 m/s) et occupe les cordons postérieurs de la moelle. Ainsi, cette voie permet de transmettre les perceptions tactiles fines (mécanorécepteur Messnier fibre II) et la sensibilité proprioceptive (position d'une articulation ou organe). La voie extra lemniscale est composée surtout de petites fibres à conduction lente (8 à 40 m/s). Elle concerne les perceptions tactiles les moins sensibles, la sensibilité thermique et la douleur. La voie lemniscale, comme la voie extra lemniscale est croisée : la première fois dans la moelle et la seconde dans le bulbe. Puis passe par le thalamus pour rejoindre les divers territoires corticaux.

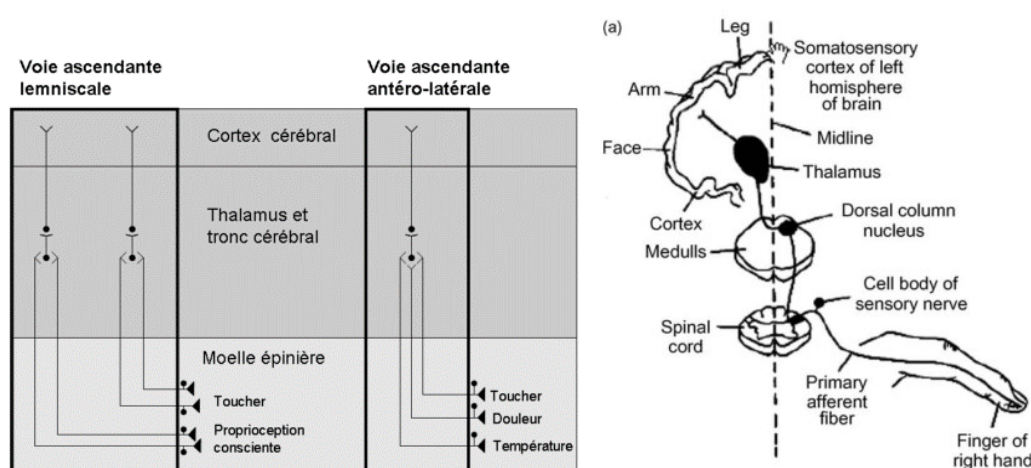


FIGURE 2.10 : (A GAUCHE) SCHEMA SIMPLIFIE DES DEUX FAISCEAUX DE LA VOIE ASCENDANTE LEMINSCALE ANTEROLATERALE (TIREE DE (BLUTEAU & COQUILLART, 2010)). (A DROITE) SCHEMA DES VOIES SOMESTHESIQUES DE LA STIMULATION PONCTUELLE AU CORTEX SOMATOSENSORIEL PRIMAIRE, VIA LES NOYAUX DE LA COLONNE DORSALE ET LE THALAMUS (TIREE DE (MCGLONE & REILLY, 2010)).

2.3.2.3 TRAITEMENT CORTICAL

Le thalamus, souvent appelé la « passerelle » vers le cortex cérébral, agit également comme une structure de relais pour tous les autres sens. Le thalamus n'est pas simplement une structure de relai mais joue un rôle intégratif avant la projection dans le cortex sensoriel primaire sus-jacent. Les signaux haptiques montent ensuite dans la capsule interne pour atteindre le cortex somatosensoriel primaire, où les informations sensorielles de toutes les surfaces du corps sont cartographiées. Dans le cortex, il y a jusqu'à huit zones distinctes favorisant principalement la somatosensation. Le cortex Somatosensoriel Primaire (SI), comprenant quatre sous-régions, le cortex Somatosensoriel Secondaire, (SII), situé sur la rive supérieure du sillon latéral, le cortex insulaire et le cortex pariétal postérieur (McGlone & Reilly, 2010). Le cortex somatosensoriel secondaire reçoit des signaux principalement du SI et les projette à son tour vers les champs sensoriels somatiques de l'insulaire. Le traitement cortical produit ainsi un percept conscient du stimulus appliqué sur le corps. Ce percept peut être le résultat d'une suite d'événements : la détection perceptive, l'estimation de l'intensité du stimulus, la discrimination spatiale, la discrimination des caractéristiques et de ses qualités. Enfin, la Figure 2.3 à droite présente un schéma du parcours de l'information tactile de la stimulation du doigt jusqu'au traitement de l'information tactile dans le cortex.

2.3.2.4 LE CAS PARTICULIER DE LA PERCEPTION DU PLAISIR

Le rôle affectif du toucher n'est pas encore bien connu. Des études récentes appuient l'existence de fibres afférentes ayant un potentiel spécifique à susciter une expérience subjective agréable. Ces fibres sont nommées C-tactiles (CT) et sont localisées dans la peau velue (Löken et al., 2011). Ce système est inefficace dans l'encodage des aspects discriminatoires du toucher, mais il est bien adapté à l'encodage du toucher léger et lent (Olausson et al., 2010). Des travaux soulignent le rôle potentiel de ce système perceptif dans l'interaction sociale en permettant la formation et le maintien des liens sociaux. Les voies qu'empruntent les signaux codés par les capteurs CT ne se sont pas encore bien connues. Toutefois, il subsiste de meilleures connaissances des projections corticales des CT afférents. Des études conduites à l'aide d'imagerie à résonance magnétique ont révélé l'implication d'un réseau de régions cérébrales au cours de la stimulation des fibres CT (stimulation avec un toucher léger et lent du bras) comme l'insula gauche, l'Insulat postérieur et l'amygdale pendant la stimulation tactile légère du bras (Ackerley et al., 2012) (Lindgren et al., 2012). Ce réseau comprend aussi des zones connues pour être impliquées dans la perception et la cognition sociale, y compris le sillon temporal supérieur postérieur droit, le cortex préfrontal médian (mFPC) et le cortex cingulaire antérieur dorsal (dACC)(Gordon et al., 2013). Pour obtenir davantage de preuves quant à l'existence des CT afférents, Ackerley et al. (Ackerley, Eriksson, & Wessberg, 2013) ont examiné le traitement des paramètres temporels des zones du cortex activées pendant la stimulation légère du bras. Cette étude exploite les données mesurées grâce à un électroencéphalogramme (EEG). L'étude a montré un potentiel cortical tardif sur électrodes frontales, environ 700 ms après le début de la stimulation. Ce résultat confirme que les fibres C ont une transmission lente. En allant plus loin, McCabe et al.(McCabe, Rolls, Bilderbeck, & McGlone, 2008) ont montré que l'expérience affective du toucher et la vue du toucher peuvent être modulées par la cognition. Enfin, le graphique présenté dans la Figure 2.4 résume les différents canaux de traitement empruntés par les signaux du toucher discriminatif et affectif.

2.3.2.1 LE ROLE DU TOUCHER DANS LES INTERACTIONS SOCIALES

Comme présenté dans la section précédente, le toucher est un système sensoriel fondamental dans notre contact avec le monde. Au-delà de l'aspect sensoriel, le toucher est essentiel dans le développement social, cognitif et physique chez l'enfant (Hertenstein & Campos, 2001; Hertenstein, 2002; Weiss, Wilson, & Hertenstein, 2000). À l'âge adulte, le toucher continue de jouer un rôle central lorsque nous communiquons notre affection à un proche, ou exprimons une position de pouvoir, et permet ainsi créer des liens plus étroits avec d'autres individus. D'ailleurs, le rôle du toucher dans différents types d'interactions interpersonnelles a été clairement démontré au cours des années (Gallace & Spence, 2010; Hh & Al, 2013; Pfeifer, Iacoboni, Mazziotta, & Dapretto, 2008; Thayer, 1986).

Par ailleurs, il a été démontré que le contact interpersonnel est un moyen efficace pour influencer nos avis. Par exemple, (Fisher, Rytting, & Heslin, 1976) ont conduit une étude expérimentale avec des conditions écologiques dans une bibliothèque. Au retour des cartes de bibliothèque, l'expérimentateur, qui jouait le rôle du bibliothécaire, s'arrangeait discrètement pour toucher la main de certains étudiants. En comparant le groupe d'étudiants ayant reçu le contact à un groupe de n'ayant pas reçu de contact physique, les chercheurs ont constaté que l'évaluation de la bibliothèque était plus positive si l'étudiant était touché « accidentellement ».

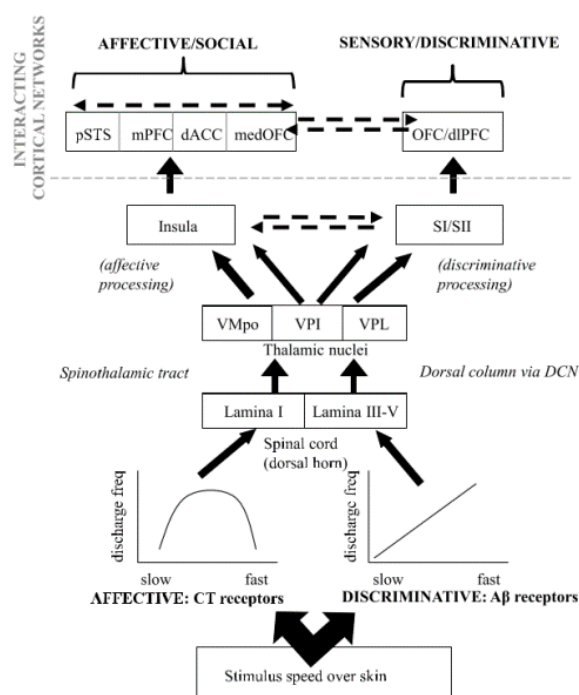


FIGURE 2.11 : DIAGRAMME SCHEMATIQUE DES VOIES AFFECTIVES ET DISCRIMINANTES POUR LA STIMULATION TACTILE DANS LA PEAU VELUE. ABRÉVIATIONS: VMPO, VENTROMEDIAL POSTERIOR NUCLEUS; VPI, VENTROPOSTERIOR INFERIOR NUCLEUS; VPL, VENTRAL POSTLATERAL NUCLEUS; MEDOFC, MEDIAL ORBITOFONTAL CORTEX; OFC, ORBITOFONTAL CORTEX; DLPFC, DORSOLATERAL PREFRONTAL CORTEX; S1/SII, PRIMARY AND SECONDARY SOMATOSENSORY CORTEX. (TIRÉE DE (MCGLONE, WESSBERG, & OLAUSSON, 2014).

Fait intéressant, cet effet a eu lieu même si aucun des étudiants ne se souvenait avoir été touché par le bibliothécaire. Le toucher interpersonnel peut aussi être important dans le marketing. Dans une série d'expérimentations, Hornik (Hornik & Ellis, 1988; Hornik, 1991, 1992) a observé que toucher les clients dans le magasin peut augmenter leur temps passé à faire des achats, leur évaluation de la boutique ainsi que l'argent dépensé. Les résultats suggèrent que le toucher interpersonnel peut être un outil de marketing efficace pour les vendeurs et les serveurs. Levav et Argo (Levav & Argo, 2010)

ont montré que le contact physique discret peut augmenter le sentiment de sécurité et par conséquent augmenter la prise de risque financière. Les résultats de cette étude prouvent que le contact physique pourrait fortement influencer le processus décisionnel et la capacité de prise de risque. Il semble que le toucher interpersonnel peut contribuer à notre bien-être (voir (Field, 2010) pour une revue plus complète). Par exemple, dans un contexte clinique, Whitcher et Fisher (Whitcher & Fisher, 1979) ont montré que le simple fait de toucher un patient un jour avant une intervention chirurgicale peut entraîner une diminution du niveau de stress.

Il est évident que le toucher a un rôle important dans le maintien et le développement des relations de couple. Par exemple, en utilisant un questionnaire, (Gulledge, Gulledge, & Stahmann, 2003) ont mesuré les préférences et les attitudes d'un groupe de participants à l'égard des types d'affection physique du partenaire et de la satisfaction de la relation. En général, les résultats ont montré que le contact affectif est fortement corrélé avec la partenaire et la relation de satisfaction, et cela est aussi suggéré par d'autres chercheurs. Debrot et al. (Debrot, Schoebi, Perrez, & Horn, 2013) ont conduit une étude sur une longue période pour examiner les relations entre le toucher et l'état affectif des partenaires romantiques dans la vie quotidienne. Une centaine de couples a complété un agenda électronique quatre fois par jour pendant une semaine. Les analyses multi-niveaux ont révélé que le toucher a été associé à un affect accru chez le partenaire. Le toucher était également associé à l'intimité et à l'effet positif sur la relation du couple. Enfin, les participants qui ont été touchés plus souvent pendant la semaine ont ressenti un meilleur sentiment de bien-être psychologique même six mois plus tard. Cette étude fournit la preuve qu'un partenaire intime qui bénéficie du toucher sur un plan psychologique transmet un sens d'obligation renforcé dans le couple ce qui améliore l'affect et le bien-être. Par contre, (Camps, Tuteleers, Stouten, & Nelissen, 2013) ont montré que le toucher dans une situation concurrentielle affecte négativement les interactions entre les personnes impliquées.

2.3.3 LES INTERFACES HAPTQUES

2.3.3.1 INTRODUCTION AUX INTERFACES HAPTQUES

Les premiers dispositifs haptiques ont été développés dans les années 40. Ils permettaient à un opérateur de télé-manipuler des substances dangereuses avec plus de sécurité grâce à des bras mécaniques robotisés. En restituant les forces de contacts, l'utilisateur peut sentir ses actions et ainsi augmenter sa dextérité et sa précision. Aujourd'hui, les interfaces haptiques sont devenues des dispositifs permettant une interaction avec des environnements virtuels via le sens du toucher. Ces dispositifs haptiques stimulent l'utilisateur en lui appliquant des forces, des vibrations ou des mouvements permettant de ressentir des textures, des formes, des forces ou des chaleurs. Le développement de ces interfaces haptiques est un domaine multidisciplinaire. Il s'appuie notamment sur des résultats de recherches en robotique, informatique, psychologie expérimentale ou encore la neurophysiologie. Les systèmes d'interactions haptiques impliquent deux parties : l'homme et la machine. Dans l'exemple de la Figure 2.12, la partie opérateur humain (à gauche) perçoit et contrôle la position de la main quand la partie machine (à droite) exerce une force sur la main pour simuler un contact avec un objet virtuel. La perception, le contrôle et l'exécution du mouvement chez l'opérateur humain sont réalisés grâce aux mécanorécepteurs, du cerveau, et des muscles. Du côté de la machine, le retour haptique est réalisé grâce à des capteurs, contrôleurs et des actionneurs. La qualité de l'interaction entre l'opérateur humain et les environnements virtuels dépend en grande partie des performances du dispositif haptique. Les principaux critères de performances des interfaces haptiques étaient l'espace de travail, et la résolution en force et en position

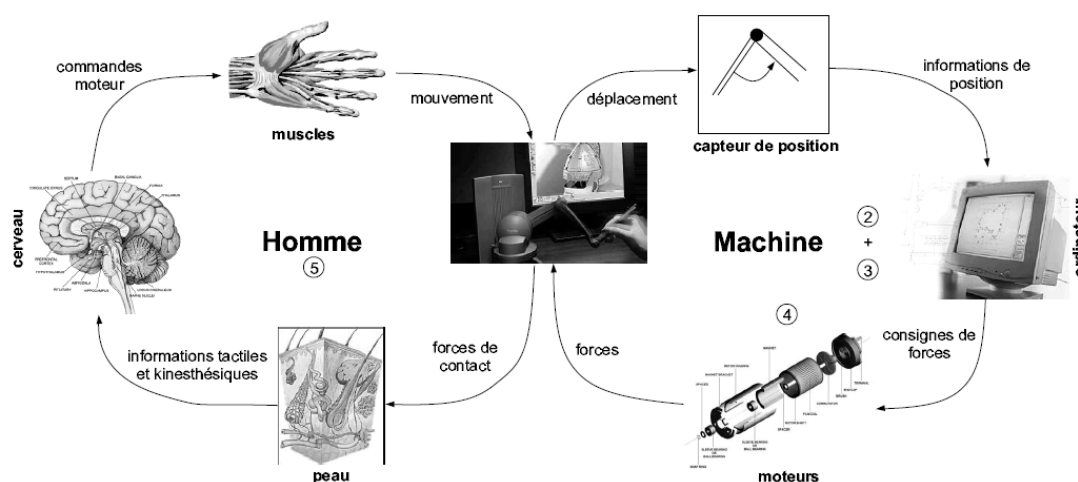


FIGURE 2.12 SCHEMA D'ARCHITECTURE DU RENDU HAPTIQUE DE L'INTERACTION HAPTIQUE ENTRE L'HOMME ET LA MACHINE (TIRE DE (CASIEZ, 2004)).

Afin de pouvoir mieux quantifier les performances des dispositifs haptiques, Astley et Hayward ont établi un certain nombre de mesures caractéristiques (Hayward & Astley, 1996). Parmi ceux-ci, nous pouvons citer le nombre de degrés de liberté et la nature du contact entre l'utilisateur et le dispositif, l'amplitude de mouvements, les forces instantanées et continues, l'accélération maximale, l'inertie, la résolution des capteurs, l'exactitude de la force produite, la stabilité d'interaction et le rendu etc. Ces mesures peuvent être un bon indicateur de la qualité d'interaction que peut offrir l'interface proposée. En effet, la conception de dispositifs haptiques doit répondre aux contraintes imposées par le domaine d'application. Elle doit surtout être capable d'offrir un rendu aussi étendu que la perception haptique humaine. De plus, tous les aspects de gestion des risques liés à l'utilisation de dispositifs haptiques doivent être pris en compte.

2.3.3.2 LIMITES DES INTERFACES HAPTIQUES

Pour proposer une stimulation et une interaction haptique satisfaisante, le développement des dispositifs haptiques doit répondre à un certain nombre de contraintes comme l'espace de travail (c.-à-d. la zone physique que l'utilisateur peut explorer avec le dispositif) ou la dynamique des retours sensoriels. Il est aussi important de prendre en compte un certain nombre de précautions de conception permettant la gestion des risques liés à l'application de forces par l'utilisateur. En parcourant la littérature, on remarque que la plupart des dispositifs haptiques actuels utilisent des systèmes connectés à l'utilisateur pour restituer les stimuli. Par exemple, les dispositifs de type exosquelettes sont dérivés de la télémanipulation, ils doivent être connectés à l'utilisateur. Ils sont lourds à porter, très intrusifs (voir Figure 2.6) (Nakai et al., 1998) (Zhou, Wan, Gao, & Peng, 2005). Les dispositifs à câbles sont utilisés en attachant des câbles aux doigts de l'utilisateur. Bouger le doigt à l'intérieur de l'espace de travail devient contraignant pour l'utilisateur rendant ainsi l'interaction avec l'environnement virtuel peu optimal. D'autres dispositifs comme le gant de données équipés de vibrateurs sont moins lourds mais doivent aussi être connectés à l'utilisateur (Kessler, Hodges, & Walker, 1995). De plus, ce contact est présent même si l'interaction avec une donnée virtuelle n'est pas réalisée. Tous ces systèmes limitent ainsi la transparence de l'interaction avec l'environnement. Cette notion (i.e. la transparence d'interaction) est définie comme la capacité d'une interface à devenir transparente (non perçue) par l'utilisateur au cours de son utilisation. De notre point de vue, la conception d'un dispositif haptique pour la communication sociale affective doit répondre à trois principaux critères : i) l'utilisateur ne doit pas être connecté à un dispositif mécanique ; ii) le dispositif doit pouvoir générer des forces assez faibles pour stimuler les mécanorécepteurs transmettant l'information affective et l'interaction doit être totalement sûre pour l'utilisateur. Afin d'apporter des

éléments de réponses aux contraintes évoquées, nous avons examiné la stratégie de stimulation non-intrusive proposée dans la littérature.

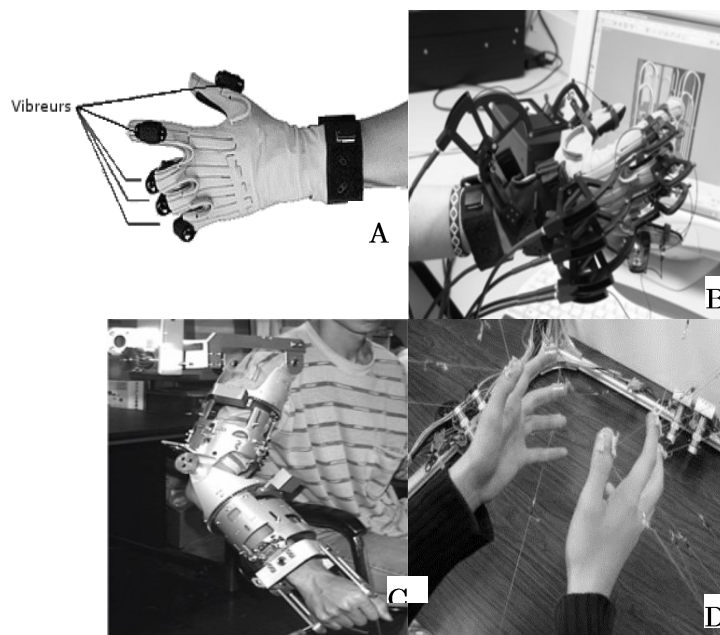


FIGURE 2.13. INTERFACES HAPTIQUE INTRUSIVES. A: (KESSLER ET AL., 1995); B: (ZHOU ET AL., 2005); C: (NAKAI ET AL., 1998); D: (SATO, HIRATA, & KAWARADA, 1992).

2.3.3.1 LES INTERFACES HAPTQUES NON-INTRUSIVES

Ces dernières années, les chercheurs en haptique ont exploré des technologies qui ne nécessitent pas de connecter l'utilisateur à des systèmes mécaniques. Ces technologies sont appelées dispositifs haptiques sans-contact (bien que contradictoire avec l'essence du toucher). Deux stratégies principales ont été examinées : stimulation tactile par ondes acoustiques et stimulation tactile par jet d'air (voir Figure 2.14). La première stratégie qui fournit un retour haptique dans l'espace libre sans contact direct avec une structure mécanique est basée sur la pression de radiations acoustiques produites par des émetteurs à ultrasons.

Takayuki et al. (Hoshi, 2012) ont proposé un dispositif basé sur les retards de phase des ondes acoustiques pour produire une zone de focal. Le premier prototype est composé de 91 émetteurs à ultrasons aéroportés contrôlés par un circuit à 12 canaux. La force totale mesurée dans la zone focale est 0.8 mN, la résolution spatiale est de 20 mm et les vibrations d'une fréquence maximum de 1 kHz. Une version récente de cette interface augmente significativement l'espace de travail et fournit une force de production de 16 mN. En assemblant plusieurs panneaux d'émetteurs ultrasons, le dispositif permet de synthétiser des hologrammes haptiques d'objets virtuels (Inoue, Makino, & Shinoda, 2015). L'inconvénient principal de cette stimulation tactile concerne la limite d'intensité de force et les fréquences perceptibles du stimulus dans une zone de focal. De plus, les auteurs mettent en évidence des risques pour l'utilisateur dans le cas où le stimulus entre en contact avec des parties sensibles du corps (par exemple, le visage). Actuellement, l'interface est utilisée uniquement pour stimuler la main et le bras.

La stimulation avec un flux d'air représente la deuxième stratégie de stimulation sans contact. Bianchi et al. (Bianchi, Gwilliam, Degirmenci, & Okamura, 2011) ont étudié l'utilisation d'un jet d'air pour produire un stimulus tactile sur la peau d'un utilisateur. Leur travail avait pour but de développer un système de retour d'information tactile pour améliorer la palpation clinique basée sur l'assistance robotique. L'approche proposée consiste à diriger un mince jet d'air par une ouverture directement

sur le doigt de l'utilisateur, produisant une pression hémisphérique perceptible. La limite principale de ce travail concerne la distance de stimulation, qui n'excède pas 2 cm. Pour permettre une plus longue portée à la stimulation, AIREAL est une interface qui exploite la physique des vortex pour délivrer des stimuli tactiles dans un espace libre sans avoir à porter un dispositif mécanique (Sodhi, Poupyrev, Glisson, & Israr, 2013). Une buse flexible permet de générer et de diriger un retour tactile avec un champ de 75 degrés et une résolution de 8.5cm à une distance de 1m. Plusieurs applications sont envisagées pour cette interface comme les jeux vidéo. Sur le même principe AirWave (Gupta, Morris, Patel, & Tan, 2013) permet d'avoir une résolution spatiale inférieure à 10cm sur une distance de 2.5 m. la buse peut être dirigée pour stimuler différentes parties du corps. Dans ces articles, ces dispositifs ne sont cependant pas utilisés pour la communication affective.

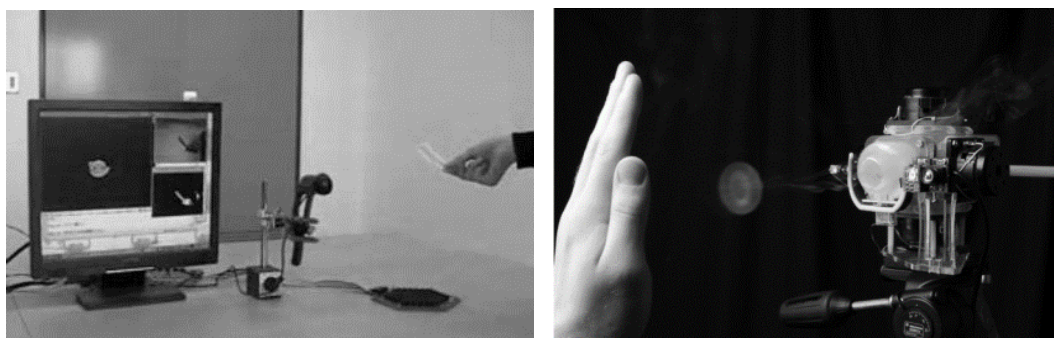


FIGURE 2.14. INTERFACE HAPTIQUE SANS CONTACT. (A GAUCHE) INTERFACE BASEE SUR LA PHYSIQUE ONDES ACOUSTIQUES (GUPTA ET AL., 2013); (A DROITE) INTERFACE BASEE SUR PHYSIQUE DES VORTEX (HOSHI, 2012).

2.3.4 INTERACTIONS HAPTQUES AFFECTIVES MEDIÉES

La recherche sur la communication des émotions médiées par le toucher s'articule autour de trois axes : l'informatique affective, les interfaces haptiques et l'expérience utilisateur. L'informatique affective étudie les méthodes permettant de détecter, d'afficher ou de simuler des émotions. Les interfaces haptiques fournissent une communication bidirectionnelle de la sensation de contact avec un sujet humain. Enfin, l'expérience utilisateur permet d'examiner le comportement des utilisateurs dans les interactions avec les systèmes haptiques. Dans cette section, nous allons présenter des expérimentations centrées utilisateur. Ensuite, des exemples de principaux dispositifs développés par les chercheurs. Nous proposons de classer ces dispositifs en deux grandes familles : les interactions haptiques pour la communication interpersonnelle distante et les interactions haptiques avec des robots.

2.3.4.1 LES EXPERIENCES UTILISATEURS

Nous avons divisé ces différentes études en deux familles suivant le type de sensation haptique stimulée : la stimulation kinesthésique et la stimulation tactile.

La première famille regroupe les études concernant la communication affective à travers **la modalité kinesthésique** (Figure 2.8). Bailenson et al. (Bailenson, Yee, Brave, Merget, & Koslow, 2007) ont mené des séries d'expérimentations pour étudier l'efficacité du toucher médié pour la communication affective. Dans une première expérimentation, il a été demandé à un groupe de participants d'exprimer sept émotions en utilisant un dispositif haptique relativement simple (i.e. un joystick à 2 degrés de liberté). Les différentes dimensions des forces générées ont été mesurées afin d'évaluer le niveau de difficulté des participants à exprimer ces émotions. Dans une deuxième expérimentation, on a demandé à un autre groupe de participants de reconnaître les émotions communiquées par les expressions enregistrées dans la première expérimentation. Les taux de reconnaissance obtenus étaient

inférieurs à ceux d'une interaction homme-homme mais ils restaient supérieurs au seuil du hasard. Ce résultat reste très encourageant en regard de la simplicité du dispositif. Cela a montré le potentiel de l'utilisation du retour haptique pour transmettre des émotions distinctes.

Gaffary et al. (Gaffary et al., 2014) ont examiné les taux de reconnaissance des émotions exprimées par un visage virtuel 3D combiné à un retour haptique. Le retour haptique était fourni avec un dispositif à retour de force 3D (Geomagic Touch). Les auteurs ont mené une série d'expériences pour évaluer la reconnaissance d'émotions exprimées avec des stimuli visio-haptiques comparés à des stimuli visuels seuls ou haptiques seuls. Dans une première expérience, ces auteurs ont évalué le taux de reconnaissance d'expressions faciales émotionnelles statiques exprimées par un agent virtuel. Dans une deuxième expérience, ils ont rassemblé un corpus d'expressions haptiques (avec des caractéristiques dynamiques différentes : force, vitesse, accélération) pour la communication d'une série d'émotions et ensuite identifier l'expression haptique la plus pertinente pour chaque émotion. Dans une troisième expérience, les auteurs ont évalué avec un groupe de participants les expressions haptiques choisies afin de garder les meilleures expressions haptiques reconnues. Enfin, la dernière expérience a exploré l'effet la combinaison visio-haptique sur la reconnaissance des émotions examinées. Les résultats ont montré que les émotions avec une valence positive (par exemple le bonheur) étaient mieux reconnues avec la modalité visuelle. Les émotions avec une haute activation (par exemple la colère) étaient mieux reconnues avec la modalité haptique. Cependant, les auteurs ont observé que des stimuli multimodaux n'ont pas amélioré la reconnaissance quand l'émotion était déjà bien reconnue avec une des deux modalités.

Utilisant le même type de dispositifs, (Bonnet, Ammi, & Martin, 2011) ont étudié comment combiner des stimuli haptiques et visuels des expressions affichées par l'avatar pour améliorer les communications d'émotions par un agent virtuel. Les résultats ont constaté que quelques émotions, comme la colère et le dégoût, sont mieux communiquées en ajoutant le retour d'information haptique au rendu visuel. Gatti et al (Gatti, Caruso, Bordegoni, & Spence, 2013) ont étudié l'effet du retour haptique sur l'évaluation des stimuli émotionnels visuels. Il a été demandé aux participants de faire une autoévaluation de leur état émotionnel durant la stimulation. La tâche expérimentale consista à voir des images affectives (tirées de la base de données IAPS (Lang & Bradley, 2007)) puis d'utiliser un bras haptique (Geomagic Touch) présentant deux niveaux de viscosité pour noter leur valence et arousal. Durant cette tâche, différents paramètres physiologiques ont été enregistrés (i.e. la température, la sudation, et la pression artérielle). Les résultats ont montré une différence dans l'évaluation d'activation associée aux images entre les deux niveaux de viscosité, mais aucune différence significative n'a été identifiée dans les mesures physiologiques. Les résultats subjectifs sont interprétés comme l'effet du retour d'information haptique sur l'activation émotionnelle perçue/interprétée des participants. Globalement, ces observations suggèrent que le retour haptique pouvait être utilisé pour modifier l'auto-interprétation d'un état physiologique. Smith and MacLean (Smith, 2005) ont proposé un examen structuré de l'espace de conception des supports haptiques pour la communication affective à distance. Leur étude expérimentale consista à demander à des pairs de participants de communiquer des émotions indiquées en utilisant un lien purement haptique. Le dispositif comportait deux poignées simples à un degré de liberté : une première poignée pour exprimer l'émotion d'un utilisateur couplée à une seconde poignée qui transmet ses actions à un autre utilisateur. Les observations objectives et subjectives suggèrent que l'émotion peut être communiquée par ce moyen et confirme que des facteurs comme le contexte d'interaction influencent les performances de la communication de l'émotion mais aussi le confort et la satisfaction.

La deuxième famille de stimulation haptique regroupe les études sur la communication affective à travers **la modalité tactile** (Figure 2.16). Salminen et al. (Salminen et al., 2008) ont utilisé un

prototype tactile exploitant la friction horizontale pour stimuler le bout du doigt afin d'examiner l'expérience émotionnelle en suivant différents paramètres de stimulation (i.e. la stimulation a été variée par la longueur de la stimulation, la continuité, et la direction).

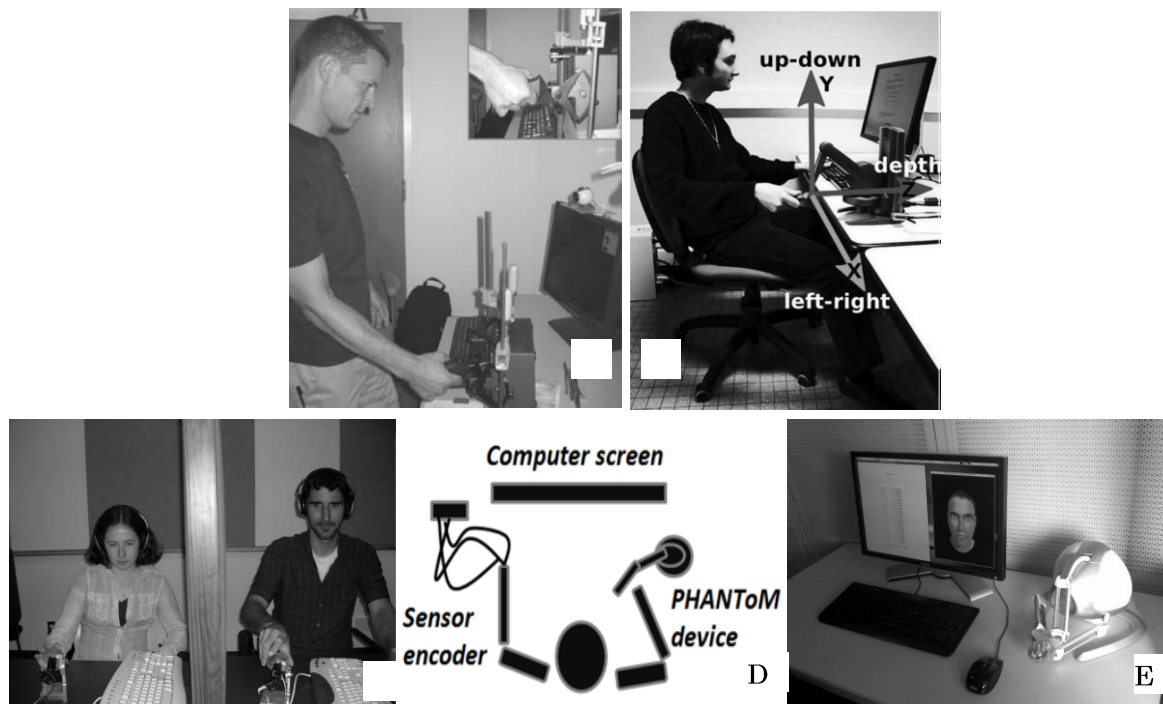


FIGURE 2.15. ETUDES SUR LA COMMUNICATION AFFECTIVE MEDIEE A TRAVERS LA MODALITE KINESTHESIQUE. A : (BAILENSEN, & AL, 2007), B : (GAFFARY & AL, 2014), C : (SMITH, 2005), D : (GATTI, CARUSO, BORDEGONI, & SPENCE, 2013), E : (BONNET, AMMI, & MARTIN, 2011).

Les stimuli étaient présentés en paires. Les participants devaient distinguer si chaque paire de stimuli était les mêmes ou différents. Puis, ils devaient évaluer les 12 types de stimuli en utilisant quatre échelles mesurant l'agréabilité, l'arousal, la dominance et l'attractivité. Les résultats ont montré que les stimuli de rotation en-avant/en-arrière continus ont été notés comme significativement plus désagréables, activants, dominants, et évitables que d'autres types de stimulations (par exemple, la rotation en avant discontinue). Les temps de réaction à ce stimulus étaient significativement plus rapides que les temps de réaction au stimulus de rotation en avant et en arrière discontinus. Les résultats montrent que la stimulation haptique même simple peut porter des informations émotionnelles.

Joung et al. (Joung & Do, 2011) ont exploré la manière dont les individus communiquent les émotions en utilisant une stimulation tactile avec la main. Leur objectif était de mettre en évidence la possibilité d'utiliser des gestes manuels tactiles pour la communication émotionnelle médiée. Dans cette étude, les paramètres dynamiques des gestes manuels tactiles utilisés pour l'interaction émotionnelle sont mesurés avec un dispositif basé sur des capteurs tactiles puis analysés. Dans leur expérimentation, ils ont demandé aux utilisateurs d'exprimer des émotions distinctes avec la main sur l'avant-bras de l'expérimentateur portant le système de capture tactile. La méthode analytique est utilisée pour reconnaître les gestes exprimés en termes de paramètres de signal comme l'intensité, les fréquences temporelles et spatiales. Cette recherche devrait permettre de développer des systèmes pour la reconnaissance automatique des émotions exprimées avec un geste manuel. Ce résultat est très encourageant car il montre qu'on peut développer des systèmes de reconnaissance automatique des émotions exprimées avec la modalité haptique et avec une précision similaire à celle des systèmes de reconnaissance des expressions faciales.

Lee et al. (Lee, 2015) ont exploré comment des stimuli émotionnels présentés avec des modalités visuelles et haptiques interagissent. Les auteurs ont construit un ensemble de données haptiques affectives et ont utilisé les stimuli visuels émotionnels (images de la base IAPS). Ils ont demandé aux participants d'évaluer séparément les stimuli visuels, haptiques et visio-haptiques. L'analyse des résultats a indiqué que la présence de stimulus haptique affecte significativement l'évaluation de l'activation mais pas celle de la valence.



FIGURE 2.16. ETUDE SUR LA COMMUNICATION AFFECTIVE MEDIEE A TRAVERS LA MODALITE TACTILE. A : (SALMINEN ET AL., 2008), B : (JOUNG & DO, 2011), C : (LEE, N.D.)

2.3.4.2 INTERFACE HAPTIQUE POUR LA COMMUNICATION AFFECTIVE MEDIEE

De plus en plus de chercheurs commencent à s'intéresser à la conception de technologies haptiques pour la communication sociale et affective. En effet, au cours des dernières années, une multitude de dispositifs ont vu le jour, et la revue complète serait trop longue (voir (Eid & Al Osman, 2015)). Nous allons présenter ici les exemples les plus pertinents. Nous les avons divisés en deux classes : les interactions haptiques sociales distantes et les interactions haptiques avec les robots.

A. INTERACTIONS HAPTQUES SOCIALES DISTANTES

Tandis que beaucoup de progrès ont été réalisés pour améliorer des retours d'information visuels et auditifs pour les communications à distance, très peu de travaux ont été entrepris concernant la modalité haptique. Quelques plates-formes haptiques ont été développées pour établir un lien physique entre des personnes éloignées. Ces dispositifs exploitent deux types de retour d'information haptique : la stimulation tactile et la stimulation kinesthésique.

Le premier type de retour d'information haptique fournit une stimulation tactile utilisant des actionneurs vibrotactiles (Figure 2.17). Par exemple, Park (Park, 2010) a présenté le dispositif CheekTouch. Ce dispositif fournit un retour d'information tactile intime via un téléphone portable sur la joue de l'utilisateur. Le retour d'information tactile correspond aux gestes du partenaire distant. Cette technique d'interaction affective combine le retour de l'information tactile délivrée sur la joue et la saisie du geste tactile sur le téléphone, tout en parlant sur le téléphone portable. Les auteurs ont conçu six comportements de contact affectifs (pincement, caresses, tapotement, claque, et chatouillement). Une étude impliquant un groupe d'utilisateurs a été conduite pour évaluer l'utilisabilité du dispositif. Les résultats ont suggéré que cette technique de stimulation tactile a été positivement évaluée par la plupart des participants.

Huisman et al. (Huisman et al., 2013) ont présenté le concept et les étapes de la conception initiale d'un dispositif vibrotactile qui permet à deux personnes de communiquer de différentes manières à distance. Il est composé de deux couches matérielles : la première est la surface extérieure sur laquelle l'utilisateur peut exprimer un toucher et la seconde est constituée d'une grille de capteurs remplis de fibres conductrices. Cette dernière couche contrôle l'intensité de vibration des moteurs situés au-dessous de la première couche. Une évaluation initiale du dispositif a révélé que cette approche était

principalement appropriée pour communiquer certains modèles de contact comme la pression et les tapotements. Dobson et al. (Dobson, Boyd, Ju, Donath, & Ishii, 2001) ont développé un dispositif de communication interpersonnel vibrotactile pour augmenter l'interaction interpersonnelle dans l'espace virtuel. En utilisant ce dispositif, appelé "Vibrobod", ils ont constaté que la vibration a aidé des utilisateurs à transmettre la présence, l'émotion et l'empathie. La plate-forme HugMe développée par (Cha et al., 2008) est une plate-forme de téléconférence haptique synchrone qui permet d'échanger des stimuli haptiques pour transmettre l'affection et l'intimité. La stimulation haptique est fournie par une veste qui contient des actionneurs vibrotactiles. Un utilisateur actif peut voir et toucher un utilisateur passif à distance.



FIGURE 2.17. INTERACTION HAPTIQUE INTERPERSONNELLE MEDIÉE. DE GAUCHE A DROITE RESPECTIVEMENT : (HASHIMOTO, NAKATA, & KAJIMOTO, 2009), (BONANNI & VAUCELLE, 1997), (ALHALABI OSAMA & SUSUMU, N.D.), (DOBSON, BOYD, JU, DONATH, & ISHII, 2001), (CHA ET AL., 2008), (HUISMAN, DARRIBA FREDERIKS, VAN DIJK, HEVLEN, & KROSE, 2013), (PARK, 2010).

B. INTERACTIONS HAPTQUES AVEC LES ROBOTS

Le deuxième type de dispositifs est basé sur le retour kinesthésique. Par exemple, (Alhalabi Osama & Susumu, 2015) ont décrit la plate-forme de serrage de main, dans un environnement virtuel, qui permet à deux personnes de se toucher et se serrer la main au moyen d'une interface haptique (Geomagic Touch). L'étude utilisateurs a montré que les forces pouvaient être transférées avec précision entre les partenaires. Les participants ont rapporté une grande cohérence entre la sensation visuelle et kinesthésique. Cependant, ils ont trouvé la poignée de main non réaliste. Une étude conduite par Tsetserukou et Neviarouskaya (Tsetserukou & Neviarouskaya, 2010) a proposé une nouvelle approche pour intensifier les interactions émotionnelles pendant la communication en ligne grâce à un robot humanoïde. Le concept est basé sur un modèle d'analyse qui reconnaît automatiquement neuf émotions du texte. L'émotion détectée est communiquée par un dispositif haptique. Les actionneurs fournissent un retour d'information kinesthésique qui simule une étreinte humaine. Les auteurs suggèrent que la plate-forme mise en œuvre devrait améliorer l'expérience émotionnelle immersive. Hashimoto et al. (Hashimoto, Nakata, & Kajimoto, 2009) ont proposé un nouveau dispositif tactile qui présente des informations tactiles avec une large bande passante. Le

système est composé d'un ou deux haut-parleurs tenus par les utilisateurs. Les vibrations générées par le haut-parleur permettent de se stimuler la main ou la joue. Ainsi, deux utilisateurs peuvent utiliser le système pour véhiculer des signaux affectifs lors de communications à distance. Bonanni et al. (Bonanni & Vaucelle, 1997) ont proposé un dispositif haptique qui se porte et qui peut enregistrer et transmettre des informations de contact. Ce système appelé 'TouchCasting' peut améliorer l'expérience audiovisuelle avec un retour haptique affectif pouvant être perçu comme une nouvelle forme d'air.

Aujourd'hui, beaucoup d'applications d'interactions homme-machine impliquent des agents intelligents pour améliorer la présence sociale. Ces agents peuvent exprimer les différents messages affectifs en utilisant principalement visage, le geste et le discours. Récemment, les chercheurs ont examiné des interactions de contact (toucher) sociales et affectives entre des humains et des agents virtuels ou des robots sociaux (Figure 2.18).

Mitsunaga (Mitsunaga, 2006) a développé un robot humanoïde de taille humaine appelé "Robovie-IV". Le robot a la capacité d'interagir avec les personnes en utilisant différents canaux de communication. Il peut communiquer avec la voix, la gestuelle et le toucher. Il est équipé de couches de capteurs tactiles incorporées dans une peau souple pour fournir des interactions haptiques. Les auteurs conduisent une expérience quotidienne dans leur bureau pour évaluer et améliorer les capacités d'interaction du robot.

En se basant sur des études portant sur les interactions humaines-animales, Yohanan et Maclean (Yohanan & MacLean, 2011) ont développé "la Créature Haptique". Il s'agit d'un robot qui imite un petit animal de compagnie interagissant avec des utilisateurs par le toucher. En utilisant ce robot, les auteurs ont étudié des gestes que les participants appliquaient pour transmettre des émotions différentes. Les analyses des propriétés physiques de l'interaction tactile ont montré les points communs de contact ainsi que la durée et l'intensité des gestes. Le "Probo" est un autre compagnon robotisé qui ressemble à un animal capable d'interagir avec des humains en ayant un contact relationnel et affectif actif (Vanderborght et al., 2012). Ce dispositif a été développé pour améliorer le bien-être lors des interactions avec les enfants.



FIGURE 2.18. INTERACTION HAPTIQUE AVEC DES ROBOTS. DE DROITE A GAUCHE, RESPECTIVEMENT (YOHANAN & MACLEAN, 2011), (VANDERBORGHT ET AL., 2012), (MITSUNAGA, 2006).

2.3.5 RESUME DE L'ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE TOUCHER LES INTERACTIONS AFFECTIVES

Les interfaces haptiques sont des dispositifs relativement récents. Elles stimulent physiquement un utilisateur par la perception tactile et kinesthésique fournissant une meilleure présence et une immersion dans des environnements distants ou virtuels. Récemment, et vu le rôle majeur du toucher dans la communication sociale et affective, de multiples dispositifs ont été conçus et développés pour maintenir le contact physique dans de longues interactions à distance, ou soutenir des interactions haptiques entre des humains et des agents. Toutes les études présentées montrent l'efficacité de l'ajout du retour d'information haptique aux systèmes de communication médiés. Cependant, la majorité de

ces plates-formes souffre de quelques contraintes techniques qui limitent la communication de certains aspects de l'émotion comme la valence.

2.4 CONCLUSION

Pour faire avancer la recherche sur la communication affective médiée par le toucher, il est primordial de disposer de systèmes haptiques capables de fournir une stimulation non-intrusive, permettant de produire des forces continues de faible amplitude, plus appropriées pour la stimulation du mécanorécepteur impliqué dans la communication affective tactile.

En examinant les différentes technologies de stimulation haptique non-intrusive, nous avons remarqué que la stimulation tactile par jet d'air semble être très prometteuse. En effet, cette technique permet de stimuler la peau sans mettre en contact un système mécanique ou un effecteur terminal. Les systèmes de contrôle d'air actuels sont adaptés pour générer des débits continus de faible intensité. Enfin, cette technique paraît totalement sûre pour l'utilisateur.

Pour qu'une telle technique soit efficace, il est primordial de proposer une méthode pour étudier l'impact des paramètres de la stimulation tactile sur la perception affective des utilisateurs. De plus, si cette technique est utilisée dans un environnement multimodal, l'impact de sa combinaison avec une modalité de communication doit aussi être étudié (exemple : l'expression faciale ou la voix).

Dans les chapitres suivants, nous proposerons un dispositif haptique pour la communication affective basé sur l'utilisation d'un jet d'air. Nous présenterons ensuite une chaîne d'études orientée utilisateur afin d'examiner comment les stimuli tactiles unimodaux ou combinés avec la voix et l'expression faciale sont évalués dans l'espace affectif.

CHAPITRE 3

CONCEPTION ET ETUDE DE LA STIMULATION TACTILE PAR JET D'AIR POUR LA COMMUNICATION D'AFFECT.

Sommaire du chapitre

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Introduction..... | 49 |
| 3.2 | Caractéristique physique de la stimulation tactile par jet d'air..... | 50 |
| 3.3 | Étude de l'effet des paramètres du jet d'air sur la perception des dimensions affectives 55 | |
| 3.4 | Conclusion..... | 62 |

3.1 INTRODUCTION

Nous avons vu dans le chapitre 2 que la majorité des dispositifs haptiques actuels nécessite un contact physique avec des systèmes mécaniques pour recevoir les stimuli. Cette configuration altère la transparence de l'interaction et limite la communication de certaines dimensions affectives comme le plaisir. L'objectif technologique de ces travaux de thèse est de proposer un dispositif haptique adapté à la communication affective. En se basant sur l'état de l'art, quatre critères ont été identifiés pour la conception de ce dispositif.

- 1) Ce dispositif doit offrir une stimulation **tactile** continue en force et en position.
- 2) La stimulation doit être fournie dans un **espace libre** sans que l'utilisateur ne porte ou ne manipule un système mécanique.
- 3) L'interface doit aussi stimuler de **larges zones** de la peau de l'utilisateur (par exemple l'avant-bras entier).
- 4) La capacité de produire des forces de **basses amplitudes**, ce qui pourrait être plus efficace pour stimuler certains mécanorécepteurs impliqués dans la communication tactile affective.

Sur la base des résultats des dernières études sur les technologies de stimulation tactile sans contact direct avec un système mécanique (chapitre 2), nous proposons une nouvelle technologie d'actionnement basée sur les caractéristiques pertinentes du jet d'air. Le concept consiste à générer un jet d'air mobile suivant les mouvements de l'utilisateur pour permettre d'atteindre de manière continue la zone à stimuler.

Afin de comprendre comment cette stimulation devrait être utilisée pour communiquer efficacement des signaux affectifs, il est important de quantifier la perception affective des utilisateurs. Cette quantification passe par l'examen de l'effet des paramètres de la stimulation par jet d'air sur la perception affective. En parcourant la littérature, on remarque qu'il n'existe pas d'études qui traitent de la perception affective liée à la stimulation tactile par jet d'air. Il est donc nécessaire de conduire une étude expérimentale afin d'évaluer cette perception, puis de comparer avec les résultats obtenus dans des recherches de stimulations tactiles similaires.

Ce chapitre est divisé en deux parties : la première partie présente le concept d'interface proposé, puis un examen synthétique des principales caractéristiques physiques du jet d'air.

La deuxième partie de ce chapitre présente une étude expérimentale ayant pour objectif d'étudier l'effet de différents paramètres physiques du jet d'air sur la perception affective représentée dans le modèle dimensionnel PAD (Plaisir-Activation-Dominance) dont nous justifierons le choix.

3.2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA STIMULATION TACTILE PAR JET D'AIR

3.2.1 LE CONCEPT DE L'INTERFACE A JET D'AIR

Le concept de cette interface est basé sur l'utilisation d'un jet d'air positionné et orienté en fonction de la configuration du bras de l'utilisateur. Le prototype inclut trois principaux composants :

- 1) Le système à jet d'air pour contrôler les caractéristiques de flux
- 2) La structure robotisée pour contrôler la position et l'orientation du jet d'air
- 3) Le système de vision informatique pour suivre la région du corps à stimuler (par exemple, la main ou l'avant-bras)
- 4) Un écran pour afficher un interlocuteur humain ou un agent virtuel.

Le jet d'air constitue la partie principale de ce dispositif. Nous nous sommes tout d'abord focalisés sur la stimulation tactile par jet d'air. Nous avons étudié et identifié les différentes configurations de stimulation, puis nous avons conçu le système à jet d'air. La deuxième étape a consisté à mettre en œuvre la plateforme robotisée pour permettre le positionnement du jet d'air dans l'espace 2D. Cette tâche inclut l'étude et le développement de la structure mécanique, la caractérisation et l'intégration des actionneurs et enfin le développement des lois de contrôle. Pour ce premier prototype, nous avons décidé de nous concentrer sur la stimulation de l'avant-bras de l'utilisateur (voir Figure 1.1). En effet, l'avant-bras constitue une zone du corps privilégiée pour la communication de stimuli tactiles affectifs. Ensuite, Nous avons développé un système de vision par ordinateur qui utilise la couleur et la carte de profondeur de la scène pour détecter la position du bras dans l'espace 3D. Dans cette section nous présenterons les caractéristiques physiques du jet d'air. Les aspects liés à l'implémentation technique de l'interface sont détaillés dans l'Annexe A.

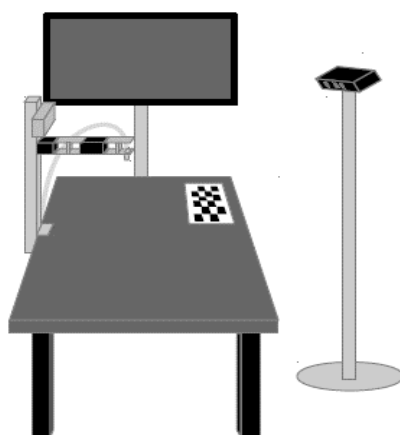


FIGURE 3.1 : ILLUSTRATION DU CONCEPT DE L'INTERFACE HAPTIQUE PROPOSEE. UNE STRUCTURE ROBOTIQUE EN SERIE A TROIS DEGRES DE LIBERTE PORTE UNE BUSE D'AIR AU NIVEAU DE L'EFFECTEUR TERMINAL. L'EFFECTEUR TERMINAL EST ASSERVI A LA POSITION DU BRAS DE L'UTILISATEUR DANS POUR FOURNIR LA STIMULATION TACTILE.

3.2.2 CONCEPTION DU SYSTEME A JET D'AIR

Afin de proposer une stimulation affective optimale, la conception de la stimulation tactile par jet d'air doit répondre à un certain nombre de contraintes physiques. Une étude théorique et une approche expérimentale ont été nécessaires pour comprendre et quantifier les caractéristiques dynamiques du jet d'air. La mécanique d'un jet d'air a été largement étudiée. Ce nombre important de travaux est dû aux multiples configurations expérimentales possibles et au nombre élevé de paramètres affectant l'aérodynamique du jet d'air.

Dans cette section, nous présentons les concepts de base de l'aérodynamique d'un jet d'air et les facteurs qui ont guidé la conception du système à jet d'air. Puis, nous développons l'étude empirique menée pour mesurer la distribution de la pression du jet d'air. Cette étude a pour objectif de permettre de lier les paramètres physiques de la stimulation tactile et la perception affective des utilisateurs.

3.2.2.1 L'AERODYNAMIQUE D'UN JET D'AIR

Un nombre important de travaux a été mené ces dernières années au sujet des jets d'air libres en impacts une surface plane Ceci est principalement dû au nombre élevé de paramètres influents sur l'aérodynamique et les transferts de chaleur entre le jet d'air et son environnement. Dans le contexte de la conception de notre système de stimulation tactile, il est nécessaire d'identifier les paramètres pertinents pour la stimulation affective. Certains chercheurs ont présenté une synthèse bibliographique des principaux travaux menés dans ce domaine. Gauntner et al. (Gauntner, Hrycak,

& Livingood, 1970) ont présenté une large gamme de résultats théoriques et expérimentaux sur l'aérodynamique du jet d'air en impact sur une surface plane. Webb et Ma (Webb & Ma, 1995) ont réalisé une revue des résultats aérodynamiques et thermiques des jets d'air impactant en fonction de différents facteurs caractéristiques (exemples : les jets d'air plans ou ronds, submergés ou non, uniques ou multiples). Roux et al. (Roux, Fénot, Lalizel, Brizzi, & Dorignac, 2011) ont repris ces travaux en réalisant une synthèse plus concise. Ici, on se limite à la présentation des principaux résultats sur l'aérodynamique d'un jet d'air perpendiculairement impacté sur une paroi plane. En effet, on considère la surface à stimuler, tels que la main ou l'avant-bras, comme étant une surface plane afin de limiter la complexité de l'étude. Il est possible de résumer les principaux paramètres influents l'écoulement d'un jet d'air dans les points suivants : le type de jet d'air (plane ou rond), le fluide environnant, la distance entre la buse et la surface soumise à l'impact, les nombres de Reynolds et de Mach à l'injection, l'angle d'impact du jet d'air, etc.

Gauntner et al. (Gauntner et al., 1970) décomposent le domaine d'écoulement d'un jet impactant en quatre parties (Figure 3.2 à gauche) :

- Région I : la région allant de l'orifice d'injection à l'extrémité du cône potentiel
- Région II : la zone d'écoulement établie caractérisée par l'affaiblissement de la vitesse sur l'axe et l'épanouissement du jet
- Région III : la région de déflexion où le jet est dévié de sa direction initiale axiale
- Région IV : la région du jet de paroi où la vitesse est principalement radiale et où la couche limite, dont l'épaisseur augmente radialement, est sujette à des gradients de pression pratiquement nuls.

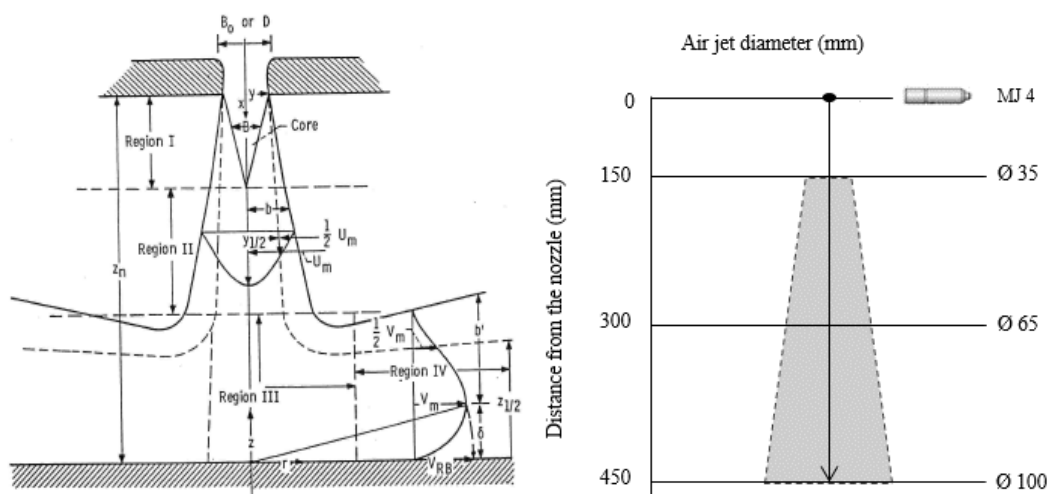


FIGURE 3.2 : (À GAUCHE) DECOMPOSITION DU DOMAINE D'ECOULEMENT D'UN JET IMPACTANT (TIRE DE GAUNTNER ET AL., 1970). (À DROITE) DIAMETRE DU JET D'AIR EN FONCTION DE LA DISTANCE DE LA BUSE (SILVENT MJ5).

Cette étude bibliographique a permis de comprendre les caractéristiques dynamiques du jet d'air. Cependant, il était nécessaire d'effectuer des études empiriques pour quantifier le jet d'air généré par notre système. En effet, il est impossible de se baser uniquement sur les modèles théoriques en raison du grand nombre de facteurs impliqués. Les résultats de cette étude empirique seront présentés dans la section suivante.

3.2.2.2 REALISATION DU SYSTEME A JET D'AIR

L'approche théorique a permis d'identifier les différentes caractéristiques influant la dynamique d'un jet d'air. Il est cependant difficile d'établir un modèle mécanique générique de l'écoulement d'un jet d'air. En effet, ce dernier étant soumis à un nombre très élevé de paramètres influents, il est nécessaire d'adopter une stratégie expérimentale pour quantifier la distribution de pression qui sera appliquée sur la peau de l'utilisateur. Cette mesure est très utile afin d'établir une relation entre le débit d'air à l'injection, la pression et la stimulation tactile. L'objectif final étant de déterminer les conditions optimales d'utilisation. À ce stade nous pouvons contrôler deux caractéristiques :

- Le **débit d'air** qui permet de contrôler la pression exercée sur la peau de l'utilisateur
- La forme de la **buse d'air** qui détermine l'angle de diffusion du jet d'air

A. CONTROLE DU DEBIT

La source d'air comprimé est un compresseur à air qui fournit une pression suffisante pour alimenter la buse d'air (4 bar). Le contrôleur de débit utilisé est un appareil industriel (Bukert MFC 8711) destiné à la régulation de débit massique de gaz (voir Figure 3.3). La valeur mesurée (X) par un capteur intégré est comparée par le régulateur électronique numérique avec la valeur de consigne (W); si une différence de régulation X_d est présente, la valeur de régulation appliquée à l'électrovanne proportionnelle sera modifiée en utilisant un algorithme de régulation de type proportionnel intégral. Le débitmètre massique peut être maintenu à une valeur fixe ou être affecté à un profil, indépendamment des variations de pression ou autres changements dans le système.

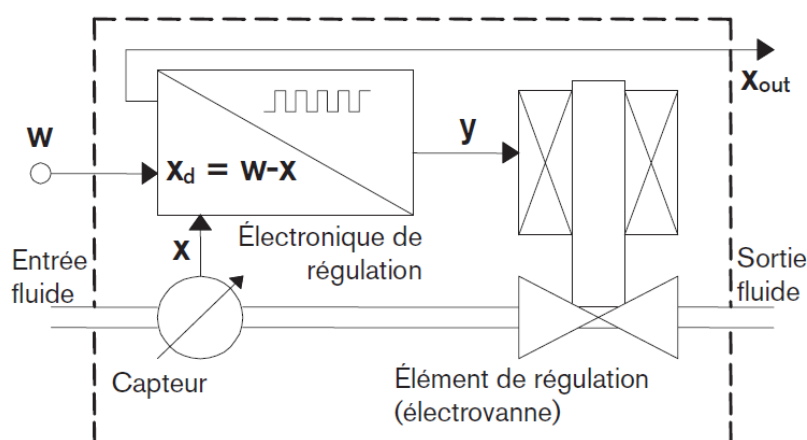


FIGURE 3.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU CONTROLEUR DE DEBIT MASSIQUE (TIRE DE BURKERT.COM).

B. CHOIX DE LA BUSE DE SOUFFLAGE

Notre objectif de base est de générer le jet d'air avec une concentration adéquate et de le projeter le plus loin possible afin d'avoir une stimulation tactile satisfaisante tout en gardant un écoulement peu turbulent. Le choix de la forme de la buse est un paramètre déterminant. En effet, il existe une relation directe entre la forme de la buse et l'angle de diffusion du jet d'air. Plusieurs types de buses ont été pris pour essai. Notre choix final s'est porté sur une buse industrielle (Silvent MJ4) fabriquée en inox et conçue avec un trou central entouré de fentes. Elle génère un jet d'air concentré, tout en limitant le niveau sonore. Le constructeur donne quelques spécifications techniques sur l'écoulement du jet d'air, notamment sur le diamètre du jet d'air en fonction de la distance (Figure 3.2 à droite).

$$F = 0.012Q + 0.082 \quad \text{ÉQUATION 3.1}$$

$$\phi = 0.215x + 1.516 \quad \text{ÉQUATION 3.2}$$

Pour cette buse, la force moyenne de soufflage (F) en Newton est linéaire en fonction du débit d'air (Q) en l/min à la sortie de la buse (Équation 3.1). Le diamètre du jet (ϕ) en millimètres est aussi linéaire en fonction de la distance de la buse (x) en millimètres.

Nous avons effectué une campagne de mesures expérimentales afin d'obtenir une modélisation plus complète de la distribution de pressions (voir Figure 3.4). Les protocoles expérimentaux ainsi que les résultats sont présentés dans l'Annexe B. Nous avons observé qu'à une distance fixe, la distribution de pression du jet d'air impactant une surface plane obéit à un modèle de gaussienne considérée comme symétrique par rapport à l'axe y (Équation 3.3).

$$P_{rom}(y) = P_{off} + P_{max} * \sigma \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp - \frac{(y-y_0)^2}{2y_*} \quad \text{ÉQUATION 3.3}$$

Avec : x , la distance entre la buse de soufflage et la plaque ; y , la distance entre le capteur et l'axe de la buse de soufflage ; D , le débit en sortie de buse ; P_{off} , Offset de pression ; y_0 , L'écart au centre.

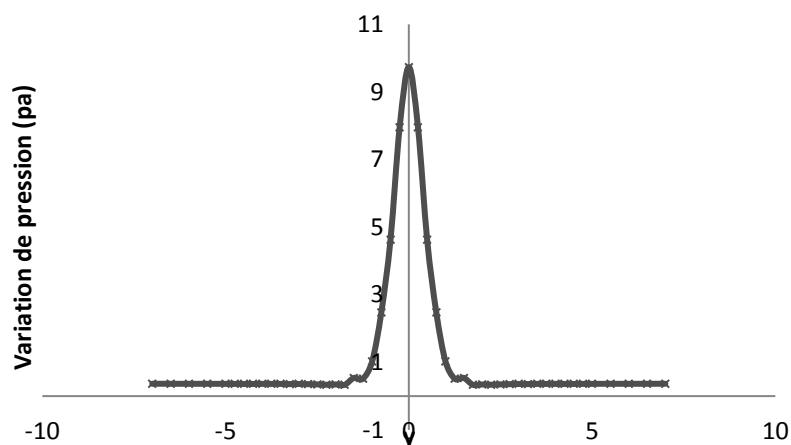


FIGURE 3.4 EXEMPLE DU MODELE (COURBE NOIRE) SUR UN JEU DE DONNEES (ETOILES NOIRES), POUR UNE DISTANCE X (60MM) ET UN DEBIT D (25 L/MIN).

Les débits produits par les systèmes de jet d'air permettent de produire des forces continues de faible amplitude. Cette configuration est adaptée à la stimulation de certains mécanorécepteurs impliqués dans la perception affective du toucher. Nous pensons que le jet d'air permettrait une meilleure communication des aspects liés à la valence émotionnelle. Il en découle la question suivante : comment les paramètres de la stimulation par jet d'air du bras influencent la perception affective ? Dans la partie suivante, nous allons donner quelques éléments de réponse à cette question. Nous présenterons une étude expérimentale afin d'examiner la perception affective des utilisateurs à l'égard de la stimulation tactile par jet d'air.

3.3 ÉTUDE DE L'EFFET DES PARAMETRES DU JET D'AIR SUR LA PERCEPTION DES DIMENSIONS AFFECTIVES

3.3.1 OBJECTIF

Notre objectif est de conduire une expérimentation avec un groupe de participants pour étudier les effets des principales caractéristiques de stimulation tactile par jet d'air sur la perception affective. Les caractéristiques de stimulation étudiées consistent en deux paramètres contrôlés du jet d'air, à savoir : le débit (D) et la vitesse de mouvement (VM) du jet d'air sur la peau. La stimulation est effectuée à une distance fixe et le mouvement est effectué le long du bras.

La perception subjective des participants est représentée dans le modèle PAD. Nous avons choisi ce modèle d'émotion pour deux raisons principales. Premièrement, les perceptions affectives des participants peuvent être projetées sur des échelles numériques continues simplifiant leurs traitements informatiques. En effet, les valeurs numériques des réponses peuvent être superposées sur les paramètres du jet d'air qui prennent elles aussi des valeurs continues. Deuxièmement, des entités émotionnelles différentes peuvent être représentées sur la même échelle, permettant d'effectuer différentes opérations entre ces entités. Ceci serait particulièrement utile pour représenter l'émotion perçue à travers plusieurs modalités. Plusieurs chercheurs ont utilisé ce modèle afin de quantifier la perception affective en réponse à plusieurs techniques de stimulation (Salminen et al., 2008) (Rantala, Salminen, Raisamo, & Surakka, 2013) (Hoirul, Corresponding, Bade, Sunar, & Daman, 2009) (Bonnet et al., 2011). Pour obtenir la projection de la perception affective à l'égard des stimuli tactiles, nous avons demandé à un groupe de participants de rapporter leurs perceptions des trois dimensions bipolaires (i.e. échelles) de valence/plaisir (désagréable - agréable), l'arousal/activation (détendu - activé) et la dominance (le sentiment de contrôle). Dans cette partie, nous présentons nos hypothèses, la méthodologie adoptée et les résultats obtenus. Enfin, dans les deux dernières sections, nous discuterons les résultats de l'expérimentation et nous donnerons les limites et les orientations futures de cette étude.

3.3.2 METHODE EXPERIMENTALE

3.3.2.1 PLATEFORME EXPERIMENTALE

La plateforme expérimentale est composée de deux parties principales. La première partie est un système à jet d'air (Figure 3.5). La deuxième partie est un PC qui contrôle l'expérience et permet de déclencher les stimuli et de rapporter les évaluations des participants. Le système à jet d'air est une version simplifiée de l'interface présentée dans la première partie de ce chapitre. Elle est composée d'un compresseur d'air, d'un contrôleur de débit massique, d'une buse de soufflage et d'un servomoteur. Le contrôleur de débit massique (MFC Bunker 8711) règle précisément le débit de sortie (jusqu'à 50l/min \pm 0.02). Le servomoteur contrôle l'orientation du jet d'air et donc sa position et sa vitesse sur l'avant-bras. La buse montée sur le servomoteur est mise à l'intérieur d'une boîte. Pour contrôler le déroulement de l'expérimentation, nous avons réalisé un programme qui inclut deux modules principaux (Figure 3.6). Le module nommé "Le Manager d'Expérience" gère l'interface utilisateur graphique (GUI) qui permet au participant de répondre à un questionnaire après chaque présentation de stimulus tactile. De plus, il déclenche le stimulus suivant en envoyant des requêtes au contrôleur de débit. Les caractéristiques physiques du jet d'air ont été étudiées et présentées dans la première partie de ce chapitre.

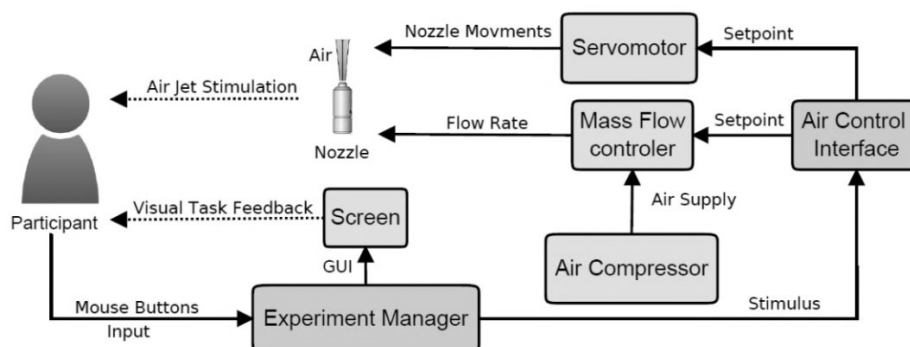


FIGURE 3.5 ARCHITECTURE EXPERIMENTALE.

3.3.2.2 STIMULI ET CONDITIONS

Dans la vie quotidienne, les interactions interpersonnelles impliquant le contact physique sont généralement brèves, intentionnelles et relativement limitées à certains emplacements du corps, comme le bras ou la main. Les études ont montré que les personnes peuvent communiquer des émotions distinctes en touchant l'avant-bras d'une autre personne (Hertenstein et al., 2009). Les humains utilisent des modes de toucher différents pour communiquer des émotions spécifiques. Par exemple, les coups sont associés à la colère et les caresses sont utilisées pour communiquer l'amour. Des chercheurs ont mis en évidence l'existence de mécanorécepteurs consacrés au traitement des aspects affectifs du toucher (Olausson et al., 2010). Ces fibres appelées CT sont identifiées dans la peau velue seulement. En prenant en considération toutes ces caractéristiques, l'avant-bras semble être un site du corps approprié pour le contact affectif médié par la machine.

Dans l'expérience que nous décrivons ici, les stimuli ont été livrés sur l'avant-bras gauche avec une distance de 10 cm à la buse. La température des jets d'air était approximativement semblable à la température de la pièce expérimentale (22° C). Sur la base des paramètres de contrôle principaux du système du jet d'air, nous avons produit un stimulus tactile présentant les variables suivantes :

- **Profil du jet d'air** : le jet d'air peut être continu ou discontinu (c'est-à-dire, la période de 500 ms) ; un débit faible ou élevé de 7.5 l/min et 50 l/min respectivement. Quatre types de profil jet d'air sont présentés aux participants : continu faible, discontinu faible, continu élevé et discontinu élevé.
- **Le mouvement du jet d'air** : l'orientation dynamique du jet d'air permet la génération d'un stimulus mobile sur la peau. Trois types de mouvements ont été examinés : stimulus statique (pas de mouvement donc vitesse nulle), lente (0.6 rad/s) et vitesse de mouvement rapide (12 rad/s).

Chaque participant a été testé avec toutes les combinaisons de chaque niveau des deux paramètres de contrôle, formant 12 types de stimulus (4 profils de jet d'air * 3 mouvements de jet d'air).

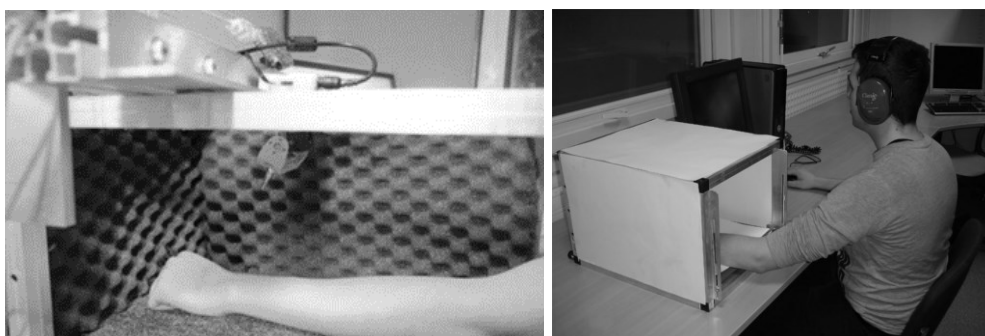


FIGURE 3.6 PLATEFORME EXPERIMENTALE. LE SERVOMOTEUR PORTANT LA BUSE PERMET DE FAIRE MOUVOIR LE JET D'AIR LE LONG DU BRAS DE L'UTILISATEUR.

3.3.2.3 HYPOTHESES

Nous avons conduit une expérimentation afin de mesurer l'effet des paramètres de la stimulation tactile sur la perception affective. Nous mettons particulièrement l'accent sur la dimension de plaisir véhiculée par le jet d'air.

Nos hypothèses sont basées sur les études pertinentes menées sur la perception affective à travers le canal tactile. Cette étude regroupe l'expérimentation sur la perception de matières ou de stimuli générés par une machine mais aussi, les études effectuées sur le toucher interpersonnelle (voir chapitre 2). Par exemple, Essick et al. (Essick et al., 2010) ont rassemblé les évaluations de l'agréabilité du toucher durant la stimulation de la peau avec différentes matières. Cette stimulation était contrôlée en vitesse et en force grâce à un système mécatronique. Les auteurs ont ensuite utilisé des tests statistiques pour examiner l'effet des paramètres de contrôle et les évaluations de l'agréabilité par les participants. Ils ont mis en évidence des interactions statistiquement significatives entre les matières, les zones de stimulations, les vitesses et les forces. Les résultats ont montré que les participants avaient trouvé les matières douces et lisses comme étant agréables, tandis que les matières qui étaient raides, dures, ou grossières étaient perçues comme étant désagréables. Les auteurs mettent aussi en évidence qu'une augmentation de la vitesse ou des forces diminue l'agréabilité des stimuli tactiles. D'autres auteurs (Löken et al., 2011) ont étudié la perception de l'aspect hédonique de la stimulation tactile. Cette dernière diffère entre la peau velue du bras et la peau glabre de la paume de la main. Dans cette étude, trois groupes de participants ont évalué la douceur de la stimulation d'une brosse souple appliquée avec des vitesses différentes sur la paume de la main ou l'avant-bras. La perception de douceur pour la stimulation est différente suivant la zone et la vitesse de stimulation. Ainsi, la stimulation sur l'avant-bras semble être perçue plus positivement que la paume de la main. Ce résultat confirme l'existence de fibres de bas seuil (tactile C, CT) qui seraient responsables de la sensation agréable du toucher.

Dans cette expérience, nous mettons en évidence la relation entre les caractéristiques physiques de la stimulation par jet d'air (profil du débit du jet d'air et mouvement du jet d'air sur le bras) et la perception affective des participants. Nous étudions l'effet individuel de chaque paramètre du jet d'air ainsi que l'effet de leur interaction sur les trois dimensions de l'espace affectif : valence, activation et dominance. En considérant des résultats obtenus dans les études présentées dans la littérature, nous avons émis les hypothèses suivantes :

- **H1** : les stimuli présentant un bas débit sont perçus comme étant plus agréables que les stimuli présentant un haut débit.
- **H2** : les stimuli présentant des mouvements lents sont perçus comme étant plus agréables que les stimuli présentant des mouvements rapides.
- **H3** : les stimuli présentant un écoulement d'air continu sont perçus comme étant plus agréables que les stimuli présentant un écoulement d'air discontinu.
- **H4** : les stimuli présentant un haut débit sont perçus comme étant plus activant que les stimuli présentant un bas débit.
- **H5** : les stimuli présentant des mouvements rapides sont perçus comme étant plus activant que les stimuli présentant des mouvements lents.
- **H6** : les stimuli présentant un haut débit sont perçus comme étant plus dominants que les stimuli présentant un bas débit.
- **H7** : les stimuli présentant des mouvements rapides sont perçus comme étant plus dominant que les stimuli présentant des mouvements lents.

3.3.2.4 LES PARTICIPANTS

16 participants (10 hommes et 6 femmes âgés entre 22 et 53 ans) ont pris place à cette étude. Tous les participants étaient droitiers. Aucun des sujets n'avait de dommage corporel ou neurologique qui aurait affecté la sensibilité du bras. Avant de débiter l'expérimentation, les sujets ont donné leur consentement pour y participer.

3.3.3 LES MESURES

Pour chaque stimulus tactile présenté, les participants ont évalué les trois dimensions de l'espace affectif en utilisant des échelles de Likert bipolaire avec sept points :

M1 : Valence (de très négatif à très positif)

M2 : Activation (de très relaxé à très activé).

M3 : Dominance (de très dominant à très dominé)

3.3.3.1 PROCEDURE EXPERIMENTALE

Les participants ont été invités à s'asseoir devant un bureau sur lequel un dispositif tactile, un écran et une souris informatique étaient posés. Les participants devaient mettre l'avant-bras gauche à l'intérieur de la boîte où le dispositif tactile était placé (Figure 3.6). Durant l'expérimentation, les participants recevaient une stimulation tactile sur le bras gauche et interagissaient avec l'interface utilisateur en manipulant la souris avec la main droite. Avant le début de l'expérience, la plate-forme expérimentale était présentée aux sujets. Une session d'entraînement rapide était accomplie pour assurer la bonne compréhension des instructions et du déroulement de l'expérimentation par les participants. Au total, 36 essais ont été réalisés par chaque participant. En effet, l'expérimentation contenait 12 types de stimuli tactiles à jet d'air présentés dans un ordre aléatoire. Chaque stimulus a été répété trois fois. Tous les stimuli ont duré 5 secondes. Après chaque stimulus tactile, on a demandé aux participants de donner un score pour **M1**, **M2** et **M3**. Les évaluations de chaque dimension ont été rapportées utilisant les 7 points de l'échelle bipolaire. Il a été demandé aux participants de garder la même posture du corps tout au long du déroulement de la session. Les sujets portaient un casque audio jouant un bruit blanc pour empêcher le son du flux d'air d'influencer la perception tactile.

3.3.4 RESULTATS

Une analyse de variance à mesures répétées (ANOVA) à deux facteurs (4 profils de jet d'air * 3 mouvements de jet d'air) a été utilisée pour l'analyse statistique de l'effet de ces facteurs ainsi que leur interaction sur l'évaluation de chaque dimension affective. La méthode de petite différence significative de Fisher a été utilisée pour les comparaisons des paires (post hoc). On a considéré le seuil de significativité de $p\text{-value} < 0.05$. Les analyses ont mis en évidence que le profil du débit d'air et le mouvement du jet d'air avaient une influence sur l'évaluation de la valence, l'activation, et la dominance. Nous présentons dans la section suivante les principaux résultats des analyses sont résumés dans les sections suivantes selon chacune des dimensions de l'espace affectif.

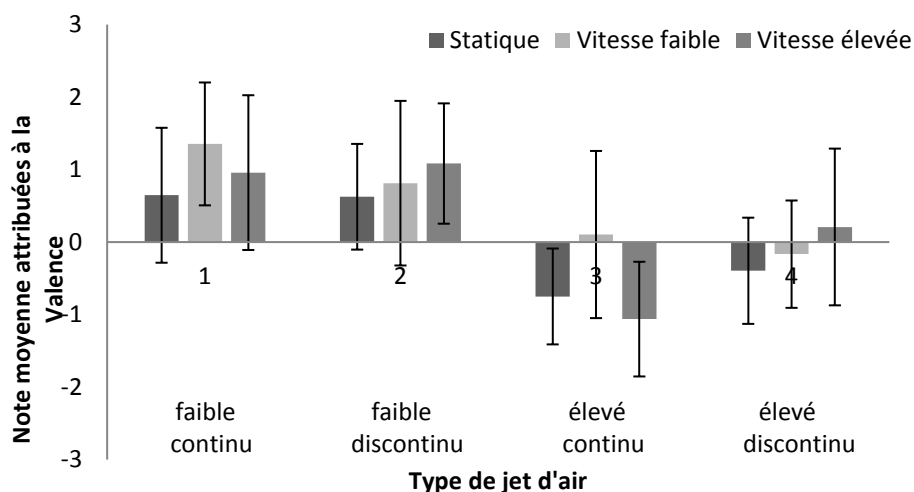


FIGURE 3.7: NOTES MOYENNES ATTRIBUEES A LA VALENCE PERÇUE.

3.3.4.1 VALENCE

Les moyennes de l'évaluation de la valence en fonction des différents stimuli sont présentées dans la Figure 2.3. L'ANOVA a montré un effet principal du profil du jet statistiquement significatif [$F(3, 45) = 27, p < 0.0001$] et un effet principal du mouvement du jet d'air statistiquement significatif [$F(2, 30) = 4.9, p < 0.05$]. L'interaction de ces deux effets principaux était statistiquement significative ($F(6, 90) = 5.6, p < 0.0001$). Les comparaisons multiples par paires (Post-hoc) ont montré que les participants ont évalué les stimuli de faible débit continus et discontinus comme significativement plus agréables que les stimuli de débit élevé continus et discontinus ($MD = 1.5, p < 0.0001$ et $MD = 0.9, p < 0.0001$). En outre, les participants ont évalué le jet d'air de faible débit et de vitesse de mouvement faible comme étant plus agréable que les mouvements de jet d'air statiques ou rapides. ($MD = 0.43, p < 0.05$ and $MD = 0.72, p < 0.0001$). Les autres comparaisons n'étaient pas statistiquement significatives. Ces résultats confirment que les hypothèses **H1**, **H2** sont validées alors que l'hypothèse **H3** n'est pas validée.

3.3.5 ACTIVATION

Des évaluations moyennes de l'activation sont présentées dans la Figure 3.8. L'ANOVA à deux facteurs (4 profils de jet d'air * 3 mouvements de jet d'air) a montré un effet principal statistiquement significatif pour le profil du jet d'air [$F(3, 45) = 45, p < 0.0001$] et un effet principal significatif pour le mouvement du jet [$F(2, 30) = 7.9, p < 0.05$]. Les interactions des effets principaux n'étaient pas statistiquement significatives. Les tests post hoc ont montré que les participants ont évalué des stimuli de débit élevé continus et discontinus comme significativement plus activant que des stimuli de faible débit continus et discontinus [$MD = 2.2, p < 0.0001$ et $MD = 2.4, p < 0.0001$]. L'autre comparaison de paires n'était pas statistiquement significative. Ces résultats confirment que l'hypothèse **H4** est validée alors que l'hypothèse **H5** n'a pas été validée.

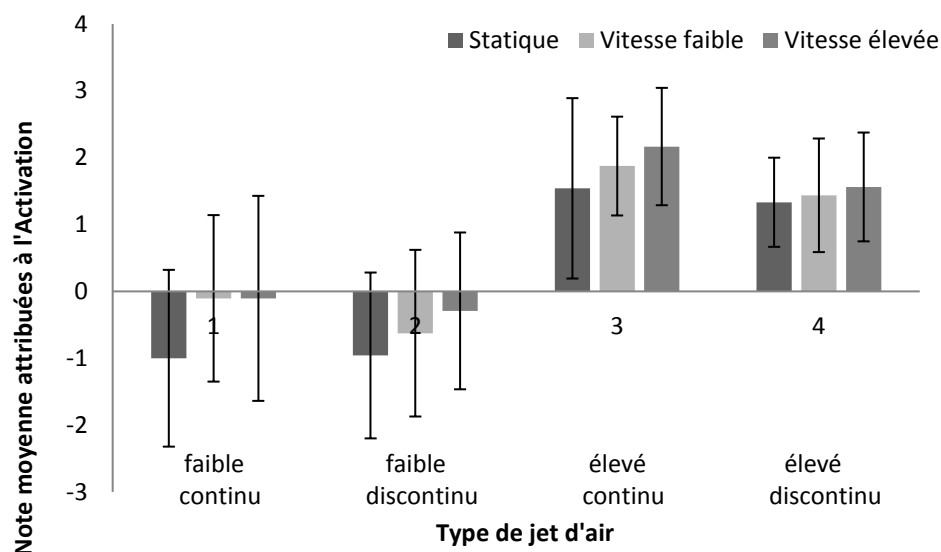


FIGURE 3.8. NOTES MOYENNES ATTRIBUEES A L'ACTIVATION PERÇU

3.3.5.1 DOMINANCE

La Figure 3.9 présente les évaluations moyennes et l'écart-type pour la dominance. L'ANOVA à deux facteurs (4 profils de jet d'air * 3 mouvements de jet d'air) a montré un effet principal statistiquement significatif du profil du jet d'air ($F(3, 45) = 28.1$, $p < 0.0001$). L'effet principal du mouvement du jet d'air et l'interaction des effets des deux facteurs n'étaient pas statistiquement significatifs sur l'évaluation de la dominance perçue. Les comparaisons multiples par paires ont montré que les participants ont évalué les stimuli de débit élevé continu et discontinu comme significativement plus dominants que des stimuli continus et discontinus de faible débit ($MD = 1.4$, $p < 0.0001$ et $MD = 1$, $p < 0.0001$). Les autres paires comparées n'étaient pas statistiquement significatives. L'hypothèse **H6** est validée mais L'hypothèse **H7** n'est pas validée.

3.3.1 DISCUSSION

Dans cette expérimentation, les participants ont reçu une stimulation tactile par jet d'air sur leur avant-bras gauche. Ils ont utilisé des échelles bipolaires pour quantifier leur perception subjective des dimensions émotionnelles PAD. Les résultats ont révélé un effet des deux paramètres de stimulation par jet d'air étudiés, à savoir, le profil du jet d'air et son mouvement de jet sur la peau. En général, les jets d'air avec un faible débit et donc une faible force ont été évalués comme étant plus agréables que ceux de force plus élevée. De plus, les participants ont perçu les jets d'air de faible intensité combinés à des déplacements longs sur la peau comme étant plus agréables que des stimulations statiques ou des mouvements rapides. Sachant que le jet d'air est un fluide de basse densité, le mouvement des particules de l'air à la vitesse basse est très lisse. Ces résultats sont en accord avec des recherches suggérant que des matériaux doux et lisses sont perçus comme agréables (Essick, James, & McGlone, 1999).

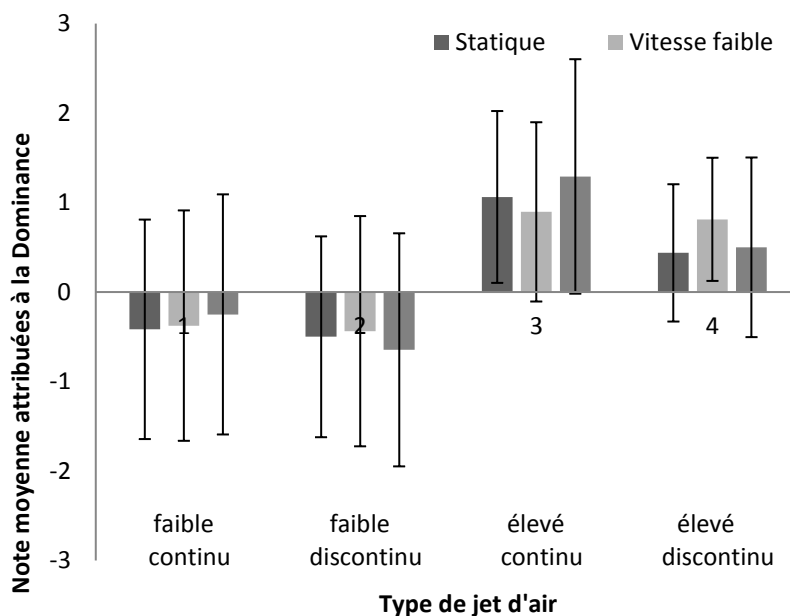


FIGURE 3.9: NOTES MOYENNES ATTRIBUEES A LA DOMINANCE PERÇUE.

Dans une étude plus récente, ces auteurs ont aussi observé qu'une augmentation de la force et de la vitesse d'un stimulus avait un impact négatif sur les évaluations de l'agréabilité d'une stimulation tactile (Essick et al., 2010). Nous supposons que les stimuli à jet d'air long et faible peuvent stimuler les fibres CT (C Tactile) à bas seuil. La stimulation de ces fibres identifiées dans la peau velue seulement (ici l'avant-bras) peut susciter l'expérience subjective agréable. Cette hypothèse pourrait être confirmée avec une étude physiologique en utilisant des techniques d'observation du cerveau comme l'imagerie à résonance magnétique (MRI) ou l'électroencéphalogramme (EEG). D'autre part, le jet d'air long et faible ressemble à une caresse. Il a été montré que ce pattern tactile (caresse) pouvait être utilisé pour communiquer des catégories d'émotions positives comme l'amour, la gratitude ou encore la sympathie (Hertenstein, Keltner, et al., 2006). Nous pouvons conclure que les caractéristiques des paramètres de contrôle du jet d'air peuvent être discriminées sur la dimension de valence.

Nos résultats sur les évaluations de la dimension activation suggèrent que les stimuli d'intensité élevée communiquent une activation plus élevée que les stimuli de faibles intensités. Cette observation soutient les résultats déjà obtenus dans la littérature (Hertenstein, Keltner, et al., 2006) (Salminen et al., 2008). En effet, il a été démontré que les émotions à forte activation présentent des patterns tactiles d'intensités élevées. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la perception de l'énergie perçue dans le contact physique.

Enfin, pour la dominance, les stimuli de forte intensité ont été perçus comme étant les plus dominants. Ce résultat prouve que nous pouvons communiquer la dimension de dominance en utilisant une stimulation tactile, même simple. Henley (Henley, 1973) a théorisé que le toucher, aussi bien que d'autres canaux de communication non-verbaux, pourrait communiquer le statut social, le pouvoir, ou la dominance. En outre, l'initiation de contact non réciproque pouvait être associée à des variables comme l'âge ou la situation socioéconomique. Plus tard, ce même auteur a mis en évidence que la dominance pouvait être communiquée en touchant le bras, le visage, l'épaule ou la taille (Henley, 1977). Avec la stimulation par jet d'air, l'intensité élevée combinée avec une valence négative des stimuli à forte intensité peut être la source de la perception de la dominance.

Enfin, nous pouvons dire que les résultats de notre étude suggèrent que la stimulation tactile à jet d'air permet de communiquer les différents aspects des émotions. Le changement des paramètres d'un jet d'air peut changer la perception de la valence, l'activation et la dominance.

Pour finir, il est important de souligner les limites de cette étude. En effet, la complexité physique du sens tactile peut conduire à différentes interprétations affectives. L'attribution des dimensions émotionnelles à une stimulation tactile continue peut dépendre d'une part, de facteurs physiques comme l'intensité des stimulations et des modèles appliqués sur la peau, la vitesse à laquelle une stimulation se déplace sur la peau, l'emplacement et la durée de la stimulation et d'autre part, des facteurs concernant les différences individuelles comme le sexe, la culture, la personnalité, ou encore les contextes liés à la stimulation. Tous ces facteurs pourraient affecter l'interprétation de la stimulation tactile affective et doivent être étudiés afin d'avoir une meilleure connaissance des capacités de communication affective de la stimulation tactile par jet d'air.

3.4 CONCLUSION

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté un nouveau dispositif de stimulation tactile pour communication affective. Il exploite un jet d'air mobile pour fournir une stimulation non intrusive sur des zones différentes du corps comme l'avant-bras. Dans la deuxième partie, nous avons présenté une étude qui a pour objectif de caractériser l'émotion perçue durant une stimulation tactile par jet d'air. Plus précisément, une expérience a été menée afin d'étudier l'impact des caractéristiques des paramètres contrôlés de stimulation tactile sur la perception des stimuli dans trois dimensions de l'espace affectif PAD (valence, activation, dominance). Les résultats ont révélé des effets principaux de la vitesse d'écoulement du jet d'air sur la perception des trois dimensions affectives. De manière générale, les participants ont évalué les stimuli à faible débit comme étant agréables alors que les stimuli à haut débit étaient activants et dominants. Notre étude a permis de caractériser la perception affective grâce à une stimulation tactile totalement nouvelle dans le domaine des interactions affectives médiées. En effet, notre étude fait partie des premiers travaux qui étudient la stimulation tactile par jet d'air pour la communication de dimensions émotionnelles. Cette étude a aussi permis de comparer cette caractérisation avec d'autres types de stimulations tactiles. Il nous paraît évident que des paramètres comme l'intensité de la force et la vitesse de la stimulation ont un effet sur la perception affective, et ce, quel que soit le type de matière en contact avec la peau (air ou autre).

Plus spécifiquement, cette étude a montré que la stimulation par jet d'air permet de communiquer plusieurs niveaux de valence positive et négative (au moins deux). Ce premier résultat nous permet de conclure que l'interface proposée peut être utile comme dispositif afin de communiquer la valence. Cependant, comme expliqué dans l'état de l'art (voir la première partie du chapitre 2), le sens du toucher est très complexe et peut être facilement modulé par l'environnement. Un des facteurs principaux qui conditionne la perception d'affect est la présence de plusieurs modalités au cours de la communication affective.

Étant donné l'interdépendance entre les modalités dans la communication des émotions (Bänziger et al., 2009), on ne peut se baser uniquement sur les paradigmes unimodaux (c'est-à-dire, quand le toucher est utilisé seul) sans tenir compte des interactions avec d'autres modalités, telles que les expressions du visage. Il est aussi nécessaire d'étudier les relations et les impacts de la combinaison de la stimulation tactile que nous proposons (stimulation par jet d'air) avec les modalités majeures de communication d'émotions.

Dans cette perspective, le chapitre 4 présente une étude pour examiner les mécanismes qui sous-tendent la combinaison des expressions faciales et la stimulation tactile par jet d'air pour la perception

subjective de la valence. Dans le chapitre 5, une troisième expérimentation présente une étude pour examiner les processus de la combinaison de la voix et la stimulation tactile par jet d'air pour l'évaluation subjective de la valence. L'objectif de ces études est de proposer un modèle fonctionnel qui permettrait d'améliorer la synthèse de la valence à travers les combinaisons visio-tactiles et audio-tactiles.

CHAPITRE 4

LA COMBINAISON DE LA STIMULATION PAR JET D’AIR AVEC LES EXPRESSIONS FACIALES POUR LA COMMUNICATION DE LA VALENCE.

Sommaire du chapitre

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | Introduction..... | 65 |
| 4.2 | Théorie de l’intégration de l’information (TII) : Cadre théorique pour l’étude de la perception bimodale..... | 66 |
| 4.3 | Etude de la combinaison de la stimulation tactile par jet d’air avec des expressions faciales pour l’évaluation de la valence émotionnelle..... | 69 |
| 4.4 | Conclusion..... | 78 |

4.1 INTRODUCTION

Les humains sont capables d'exprimer et de reconnaître les émotions à travers une variété de canaux non verbaux (comme les expressions faciales, la prosodie et la gestuelle) (Knapp & Hall, 2010). De ce fait, la conception des interfaces homme-machine doit exploiter efficacement et conjointement ces différents canaux non-verbaux afin de transmettre efficacement les émotions. Considérant les progrès récents dans le traitement du signal audio et de l'informatique graphique, de nombreux chercheurs ont exploité ces deux canaux simultanément pour améliorer le rendu et la synthèse d'expressions des émotions. Par exemple, la plateforme d'agents expressifs MARC (Courgeon & Clavel, 2013) permet aux utilisateurs d'interagir avec des agents virtuels capables d'afficher des émotions à travers les expressions faciales et corporelles. L'ajout de la stimulation haptique à ce type de plateforme pourrait permettre d'améliorer la communication de plusieurs émotions à l'utilisateur. Certains chercheurs ont montré que le toucher combiné à l'expression faciale d'un agent virtuel pouvait améliorer la communication des affects et de l'empathie (Bickmore et al., 2010). D'autres chercheurs ont observé que le toucher pouvait mieux soutenir la perception des dimensions d'activation et de dominance lors de la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles (Gaffary et al., 2014). Plusieurs dispositifs haptiques ont été développés afin de maintenir le contact physique entre des interlocuteurs dans des systèmes de communication audio-visuels. Le toucher permettrait dans ce contexte d'améliorer la présence et la communication d'affect (ex. Brave & Dahley, 1997). Dans le cadre de la conception d'un dispositif haptique pour la communication affective médiée, il est nécessaire d'étudier comment cette stimulation est combinée avec d'autres modalités pour la perception des émotions. En effet, ce dispositif pourrait être implémenté dans des plateformes d'agents virtuels (tel que MARC) ou dans un système de communication interpersonnelle distante. En interaction homme-machine, comme en psychologie, peu de recherches ont été conduites pour modéliser la manière dont les utilisateurs perçoivent l'information émotionnelle provenant de plusieurs sources d'information. Ce faible taux d'étude se traduit par le manque d'un cadre théorique et empirique permettant d'étudier et modéliser l'intégration affective multimodale côté utilisateur. En parcourant la littérature, nous avons identifié deux cadres théoriques pour l'étude du traitement multimodal de l'information affective : le premier est la théorie de l'intégration de l'information (Norman Henry Anderson, 1989). Le deuxième est le modèle de logique floue de la perception (Massaro, 2004). Selon ces modèles, de multiples influences sensorielles sont continuellement combinées au cours de la catégorisation, menant à l'expérience perceptuelle et à l'action.

Dans ce chapitre, nous présentons une étude expérimentale qui examine la combinaison de la stimulation tactile par jet d'air avec les expressions faciales pour la perception de la valence.

Dans le cadre de cette thèse, nous souhaitant étudier comment les individus évaluent la valence Nous avons sélectionné la Théorie de l'Intégration de l'Information comme cadre théorique et expérimental à cette étude pour trois principales raisons :

- Ce cadre théorique permet de modéliser la combinaison des deux modalités avec une algèbre simple.
- L'identification du modèle d'intégration est basée sur les données empiriques.

La décomposition du processus de traitement de l'information bimodale en plusieurs étapes est très adaptée aux contraintes des modèles computationnels.

4.2 THEORIE DE L'INTEGRATION DE L'INFORMATION (TII) : CADRE THEORIQUE POUR L'ETUDE DE LA PERCEPTION BIMODALE

La Théorie de l'Intégration de l'Information (TII) a été proposée par Norman H. Anderson (N. H. Anderson, 1981). Elle constitue un cadre théorique général visant à décrire et modéliser comment une personne intègre des informations issues de plusieurs sources afin de porter un jugement global. Ce cadre théorique repose sur des lois psychologiques (algèbre cognitive) pour fournir une base valable à l'échelle subjective du stimulus perçu. La TII a été largement utilisée pour examiner l'intégration de l'information notamment dans la prise de décision, le développement cognitif, le traitement du langage etc. Ces différents champs d'application reflètent l'adaptabilité de cette théorie. Hofmans et al. ont récemment présenté un aperçu des domaines d'application de cette théorie (Hofmans, Shanteau, & Masin, 2012). L'un des aspects fondamentaux de la TII est qu'elle est fondée sur des bases conceptuelles et empiriques. Pour arriver à une évaluation globale, plusieurs sources d'information observables doivent être analysées cognitivement. Ce processus est divisé dans la TII en trois étapes correspondant à l'évaluation, l'intégration et la production de réponse (voir Figure 4.1). La fonction de valuation V correspond à la transformation de la stimulation physique Φ Si vers une valeur subjective projetée sur l'échelle de réponse.

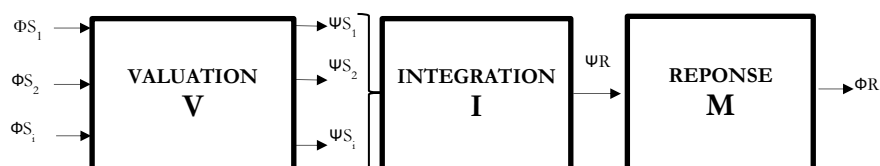


FIGURE 4.1 : SCHEMA DU PRINCIPE DE LA THEORIE DE L'INTEGRATION D'INFORMATIONS TII (VOIR LES EXPLICATIONS DANS LA SECTION 1.1).

Cette évaluation est gérée séparément pour chaque source d'information. La fonction d'intégration I est ensuite utilisée pour combiner les différentes valeurs subjectives ΨS_i dans une réponse interne ΨR . Une classe de règles algébriques (algèbre cognitive) est utilisée pour modéliser le processus d'intégration : addition, multiplication ou moyenne (avec des pondérations égales ou différentes). Enfin, l'évaluation interne intégrée est traduite par la fonction de réponse M dans une réaction ΦR observable dans le monde physique. La Mesure Fonctionnelle (FM) a été développée dans le cadre de la TII pour identifier les différentes étapes de combinaison de l'information. En se basant sur l'affichage graphique des données empiriques et l'analyse statistique, on peut déterminer les règles adoptées par les personnes qui intègrent les sources d'information pour évaluer un phénomène complexe. Par exemple, lorsque on étudie l'intégration de deux sources d'information, une règle d'addition est suggérée par le parallélisme des courbes et confirmée par une interaction non statistiquement significative entre les effets des deux sources. La règle de multiplication correspond à un modèle en éventail et une interaction significative en conséquence (voir la Figure 4.2 pour des illustrations). La mesure fonctionnelle a déjà été utilisée pour modéliser la combinaison de plusieurs sources d'information dans le cadre de la perception des émotions. Par exemple, Oliveira et al. (Armando Oliveira et al., 2006) ont mis en évidence comment un groupe de participants évaluent l'intensité émotionnelle véhiculée par des paires fusionnées d'expressions faciales émotionnelles (par exemple, un visage exprimant la joie avec un autre visage exprimant la colère). Les résultats ont montré qu'en général, les participants ont évalué l'intensité émotionnelle en intégrant les deux aspects étudiés du visage suivant une règle moyenne. En se basant sur la TII, Prigent et al., (Prigent, Amorim, Leconte, & Pradon, 2014) ont examiné comment deux sources d'informations visuelles, à savoir, les

cinématiques du corps (posture et les expressions faciales) sont intégrées afin d'estimer l'amplitude de la douleur et de l'effort vécus par un patient en rééducation motrice. Les résultats ont montré que les modèles psychophysiques de l'intégration des informations visuelles étaient différents entre les participants praticiens de médecine et les non praticiens.

Dans les sections suivantes, nous aborderons plus en détails les différents concepts de la théorie de l'intégration de l'information.

4.2.1 LES ETAPES DE COMBINAISON DE L'INFORMATION DANS LA TII

Le schéma de la Figure 4.1 illustre le processus de l'intégration des informations issues de sources multiples. Dans ce schéma, ΦS_i est la présentation psychologique correspondant à la valeur du stimulus physique ΨS_i interprétée par la fonction de valuation $V(s)$. La fonction d'intégration est représentée par l'algèbre cognitive des stimuli psychologiques pondérés $I(s)$. $M(s)$ représente la réaction physique au produit de l'information interne intégrée.

La valuation des stimuli $V(s)$: Un stimulus peut être physique ou psychologique. Les stimuli physiques peuvent être observés, mesurés et contrôlés au cours des expérimentations. Les stimuli psychologiques sont inobservables. Il est donc difficile de leur attribuer une valeur numérique. L'un des principaux objectifs de la TII est de permettre la quantification de ces processus psychologiques non observables. La fonction de valuation est le processus par lequel une personne traite l'information et lui attribue une valeur psychologique. Ce processus cognitif est influencé par l'expérience personnelle, l'environnement externe et l'objectif de la tâche. De plus, la valuation permet de mettre en évidence les différences individuelles dans la valuation d'un stimulus. Par exemple, deux personnes différentes peuvent interpréter et réagir différemment à la même intensité d'un son.

Intégration des stimuli $I(s)$: En général, l'évaluation des informations est basée sur l'interaction de plusieurs sources. Par exemple, la perception de la profondeur implique plusieurs facteurs comme la perspective, les textures ou encore les couleurs. Il est donc nécessaire de comprendre comment ces multiples variables sont intégrés pour produire une évaluation globale. La TII propose une méthode pour analyser comment plusieurs variables psychologiques sont intégrées en modélisant ce mécanisme avec une algèbre cognitive et l'utilisation de méthode d'analyse quantitative.

La réponse $M(S)$: la dernière étape, la fonction de réponse, est directement liée à l'intégration des stimuli multiples. La réponse peut être une action, un son, une expression du visage, un mouvement du corps ou tout autre variable observable.

$$\Phi R = C_0 + C_1 \Psi R \quad \text{ÉQUATION 4.1}$$

Dans le cadre expérimental, la réponse (ΦR) est représentée par une valeur numérique attribuée à l'information combinée (ΨR). L'Équation 4.1 montre la fonction de réponse physique comme étant linéaire. Le graphique factoriel révélera si le modèle sous-jacent de la cognition est linéaire.

4.2.2 LE PLAN FACTORIEL

Le plan factoriel est un moyen de manipuler plusieurs variables pour produire des graphiques. C'est l'analyse des configurations dans le graphique factoriel qui permet d'identifier le modèle de l'algèbre cognitive utilisé. Dans le plan factoriel, les données sont organisées en matrice. Chaque cellule dans cette matrice correspond à une combinaison des niveaux des facteurs d'entrée. Dans les plans factoriels complets, des cellules correspondant aux évaluations des facteurs seuls sont aussi présentes dans la matrice. Par exemple, dans l'étude d'Oliveira et al. (Oliveira et al., 2006) le plan expérimental était composé d'une paire d'expressions (telle que la colère et la joie). Chaque expression faciale avait trois intensités différentes (faible, moyenne, élevée). Les participants ont observé la combinaison de

ces deux expressions faciales pour les trois intensités mais aussi chaque expression faciale seule avec trois intensités. Par conséquent, la tâche d'évaluation obéissait à un **plan factoriel** complet à deux facteurs (3x3).

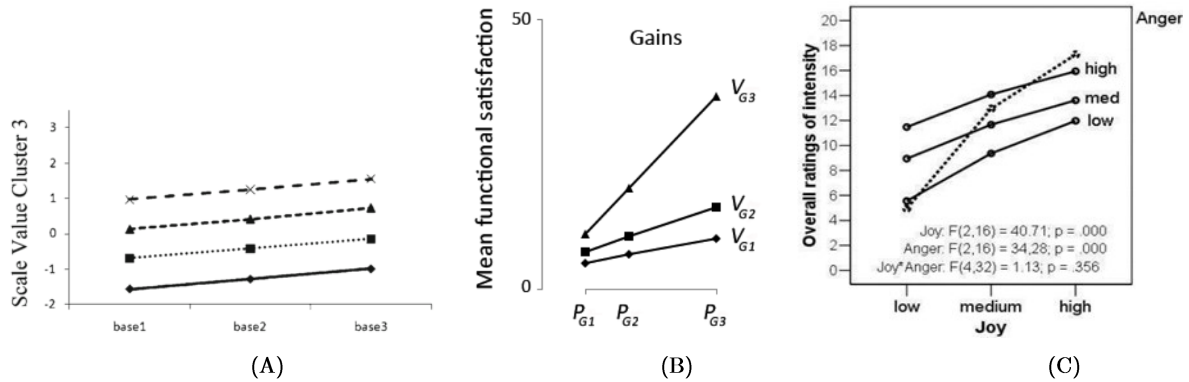


FIGURE 4.2: EXEMPLE DE GRAPHIQUE FONCTIONNEL DECRIVANT LES MODELES D'INTEGRATION. LE GRAPHIQUE (A) DECRIT UN MODELE ADDITIF (HOFMANS & MULLET, 2013). LE GRAPHIQUE (B) DECRIT UN MODELE MULTIPLICATIF (VIEGAS, OLIVEIRA, & GARRIGA-TRILLO, 2012). LE GRAPHIQUE (C) DECRIT UN MODELE DE MOYENNE (ARMANDO OLIVEIRA ET AL., 2006).

4.2.3 L'ALGEBRE COGNITIVE

L'algèbre cognitive représente le formalisme par lequel est représentée la fonction d'intégration. Norman Anderson (Anderson, 1981) a décrit plusieurs modèles algébriques pouvant être interprétés par des données empiriques. Les plus récurrents sont le modèle additif, de moyenne et multiplicatif. Afin d'identifier quel modèle de l'algèbre cognitif est présenté par un individu, la principale méthode utilisée se base sur l'analyse des graphiques factoriels. Ces graphiques peuvent être complétés par des analyses statistiques descriptives. Nous allons décrire les trois principaux modèles algébriques cognitifs :

Le modèle additif : ce modèle apparaît quand les valeurs des variables observées sont additionnées pour produire une réponse. Pour tester l'hypothèse que deux variables sont additivement intégrées, il est nécessaire de manipuler les stimuli dans un plan factoriel. Ce modèle est déduit en observant un parallélisme des données graphiques. La Figure 4.2.(A) montre un graphique factoriel des évaluations d'un groupe de sujet basé sur deux (i.e. A et B) informations en entrées. Chaque entrée possède trois niveaux. Cette expérimentation est donc basée sur un plan factoriel 3 x 3. Le graphique factoriel montre une distance des lignes parallèles. Il s'agit d'une inspection visuelle du parallélisme observé. En utilisant le plan factoriel, il est possible d'ajouter un support mathématique au parallélisme graphique.

$$\Psi R_{ij} = \Psi A_i + \Psi B_j \quad \text{ÉQUATION 4.2}$$

L'Équation 4.2 représente un modèle additif où les valeurs psychologiques ΨA_i et ΨB_j des sources d'information A et B sont combinées en utilisant une opération d'addition avec i et j qui représentent les lignes et les colonnes (respectivement) du plan factoriel. Le parallélisme peut également être statistiquement soutenu par l'absence d'une interaction significative dans une ANOVA à mesures répétées.

Le modèle multiplicatif : ce modèle semble naturel dans de nombreux procédés d'intégration cognitive (Anderson, 1996). Par exemple, dans l'évaluation de satisfaction du gain obtenue dans une mise financière (Viegas et al., 2012). Cette satisfaction est évaluée en fonction de deux facteurs combinés, la valeur du gain (A) et la probabilité de gagner (B). L'outil d'identification des règles de

multiplication est la présence d'un graphique factoriel sous la forme d'un éventail (voir l'Équation 4.3) :

$$\Psi R_{ij} = \Psi A_i \times \Psi B_j \quad \text{ÉQUATION 4.3}$$

Le modèle de multiplication peut être appuyé par une interaction statistiquement significative dans le test ANOVA à mesures répétées.

Le modèle de moyenne : selon le diagramme schématisant le processus de la TII, ΨR représente la réponse intégrée des échelles de valeurs différentes ΨS_i produites par un individu pour une seule source d'information. Si W_{n_i} sont les valeurs des poids représentant l'importance de la valeur ΨS_i . Le modèle de moyenne stipule que ΨR est une somme pondérée des valeurs divisées par la somme des poids.

$$\Psi R_{ij} = \frac{w_{A_i} \Psi A_i + w_{B_j} \Psi B_j}{w_{A_i} + w_{B_j}} \quad \text{ÉQUATION 4.4}$$

Si dans l'Équation 4.4, les niveaux d'un facteur n'ont pas le même poids, alors le modèle de moyenne est différentiellement pondéré (en Anglais, Differential Averaging Model) et la règle de l'intégration devient non linéaire. Si tous les niveaux d'un facteur ont les mêmes poids, ce facteur est alors appelé équipondéré (en Anglais, Equal Averaging Model, EAM). Le modèle EAM et DAM peuvent être identifiés dans le graphique factoriel quand les courbes bimodales sont parallèles avec une ligne unimodale traversante.

4.3 ETUDE DE LA COMBINAISON DE LA STIMULATION TACTILE PAR JET D'AIR AVEC DES EXPRESSIONS FACIALES POUR L'ÉVALUATION DE LA VALENCE ÉMOTIONNELLE

4.3.1 OBJECTIF DE L'ÉTUDE

Nous avons conduit une étude expérimentale pour mettre en évidence la façon dont sont perçues les combinaisons d'expressions faciales et tactiles du point de vue émotionnel. Nous nous concentrons sur la perception subjective de la valence (c'est-à-dire : dimension positive vs négative de l'émotion ressentie). Dans l'expérimentation que nous avons mise en place et que nous décrivons dans ce chapitre, les stimuli visuels consistaient en des images d'expressions faciales des émotions affichées par des humains. La stimulation tactile a été fournie à l'aide du dispositif expérimental de jet d'air (chapitre 3). Les participants devaient évaluer la valence émotionnelle des stimuli unimodaux (faciaux ou tactiles) et bimodaux (faciaux et tactiles). En utilisant les données recueillies, nous avons étudié comment les participants combinaient sur le plan cognitif ces deux sources d'information en se basant sur la Théorie de l'Intégration d'Information. Dans cette partie, nous présentons et discutons notre étude expérimentale visant à mettre en évidence et modéliser le processus d'intégration de la valence émotionnelle dans le cadre de TII.

4.3.2 PLATEFORME EXPERIMENTALE

Deux types de stimuli ont été présentés aux participants : 1) des images statiques d'expressions faciales, présentées sur un écran ; 2) des stimulations tactiles appliquées sur l'avant-bras gauche en utilisant le système de jet d'air.

Le système de jet d'air est présenté dans le chapitre 3. Les expressions faciales statiques étaient affichées sur un écran de 22 pouces positionné devant le participant à une distance de 75 cm (voir Figure 4.3). Après chaque stimulus, une consigne demandait aux participants d'évaluer la valence perçue. Les participants donnaient leurs réponses en déplaçant un curseur sur une échelle continue présentée à l'écran à l'aide d'une souris (voir Figure 4.3).

4.3.3 HYPOTHESES

Au cours des communications interpersonnelles, le toucher est généralement combiné avec d'autres modalités pour transmettre des messages affectifs. Cette communication multimodale des émotions peut être représentée par la situation où le visage et le toucher sont utilisés simultanément. Les études existantes qui traitent la combinaison de l'expression faciale et du toucher dans le cadre de la perception des émotions suggèrent que les personnes se basent principalement sur la modalité visuelle pour évaluer la dimension de valence (par exemple (Gaffary et al, 2014)(Ammi et al, 2014)). Toutefois, ces études concernaient le sens kinesthésique qui ne semble pas être efficace pour la communication de la valence. La stimulation tactile proposée (i.e. jet d'air) permet de discriminer différents niveaux de valence (voir chapitre 3). Dans cette étude, nous avons confirmé que les stimuli tactiles et visuels unimodaux sont bien discriminés sur l'échelle de valence en émettant les hypothèses **H1**. Ensuite, nous avons examiné le modèle de combinaisons des deux modalités pour l'évaluation de la valence en se basant sur les hypothèses **H2**.

H1. Évaluations unimodales :

- A) Les stimuli tactiles sont bien discriminés sur la dimension émotionnelle de valence.
- B) Les expressions faciales sont bien discriminées sur la dimension émotionnelle de valence.

H2. Évaluations bimodales :

- A) Les participants fondent leurs jugements sur les deux modalités pour évaluer la valence émotionnelle.
- B) Les participants donnent plus d'importance à l'expression du visage lors de l'évaluation de la valence.

4.3.4 METHODE EXPERIMENTALE

4.3.4.1 LES PARTICIPANTS

20 participants (14 hommes et 6 femmes âgés de 22 à 38 ans) ont participé à cette étude. Tous les participants étaient droitiers. Aucun des sujets n'avait de lésions corporelles ou neurologiques qui auraient pu modifier ou entraver la sensibilité du bras ou le sens de la vision. Les sujets ont donné leur consentement avant de participer à l'expérimentation.



FIGURE 4.3 MONTAGE EXPERIMENTAL. LA PHOTO A GAUCHE MONTRE UN PARTICIPANT LORS D'UNE SESSION EXPERIMENTALE. LA PHOTO DE DROITE MONTRE LE SYSTEME DE STIMULATION DU JET D'AIR APPLIQUANT UNE STIMULATION SUR LE BRAS GAUCHE D'UN PARTICIPANT.

4.3.5 CONDITIONS ET ETUDES DES STIMULI

Afin d'étudier l'interaction entre la stimulation tactile et l'expression du visage pour la perception de la valence, nous avons sélectionné plusieurs niveaux de stimuli unimodaux (tactiles et faciaux) pouvant communiquer différents niveaux de valence :

4.3.5.1 CONDITIONS UNIMODALES

Les **stimuli visuels (VS)** se composaient d'un total de 18 photographies d'expressions faciales d'émotions exprimées par un homme et une femme. Ces photographies proviennent de la base de données d'expressions faciales émotionnelles appelée KDEF (Calvo & Lundqvist, 2008). Les stimuli variaient de l'expression de colère ($\Phi VS - 100\%$) à l'expression de joie ($\Phi VS + 100\%$) avec des pas progressifs de 25% , l'expression neutre ($\Phi VS 0\%$) étant entre les deux. Les niveaux intermédiaires (i.e. -75% , -50% , -25% , $+25\%$, $+50\%$, $+75\%$) ont été obtenus en effectuant une opération de morphing linéaire entre l'expression faciale émotionnelle (i.e. joie et colère) et l'expression du visage neutre (Harris, Young, & Andrews, 2012). Même s'il est connu que l'interpolation linéaire de différentes zones du visage n'est pas réaliste, elle permet de manipuler des bases de données validées comme KDEF. Les stimuli générés sont présentés dans la figure 4.4. Les émotions de joie et de colère ont été spécifiquement sélectionnées pour obtenir plusieurs niveaux de valence. En effet, ces deux émotions sont représentées à l'opposé l'une de l'autre sur l'échelle de valence (Russell, 1980).

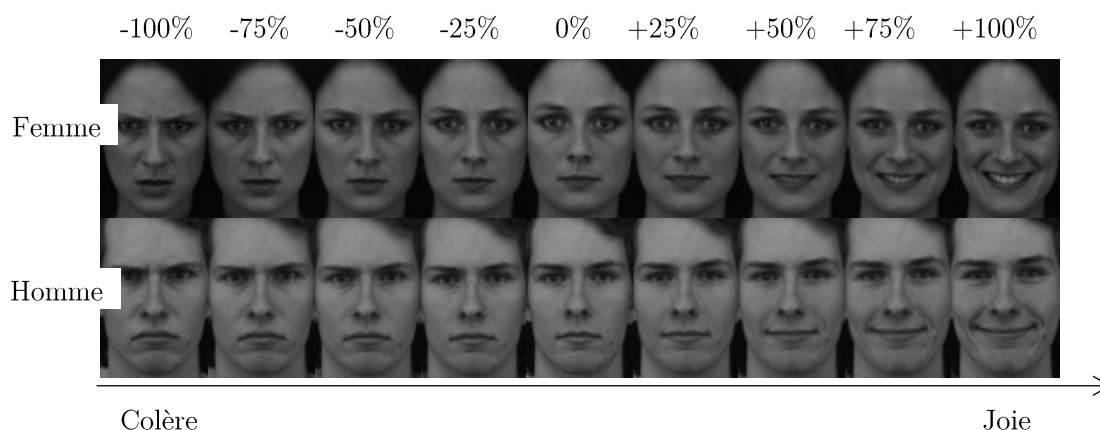


FIGURE 4.4. IMAGES D'EXPRESSIONS FACIALES PRESENTEES AUX PARTICIPANTS

Les **stimuli tactiles (TS)** étaient basés sur la stimulation tactile par jet d'air. Les paramètres contrôlés de la stimulation tactile sont le débit du jet d'air et la vitesse de déplacement du jet d'air sur l'avant-bras. Trois types de stimuli tactiles ont été présentés aux participants :

- Un stimulus tactile de haute intensité ($\Phi TSHI$) qui présentait un débit élevé ($nL50/min$) avec une vitesse de mouvement élevée ($12\ rad/s$)
- Un stimulus tactile de niveau d'intensité moyenne ($\Phi TSME$) avec un débit moyen ($25nl/min$) et une position statique
- Un stimulus tactile faible intensité ($\Phi TSLO$) avait un faible débit ($7.5nl / min$) avec une vitesse de mouvement faible ($0,6\ rad/s$)

Ces paramètres du jet d'air ont été choisis selon notre étude antérieure présentée dans le chapitre 3). En effet, l'étude a permis de mettre en évidence la relation entre la stimulation tactile par jet d'air et les dimensions émotionnelles. Les résultats ont montré que $\Phi TSHI$ était perçu avec une valence négative. $\Phi TSME$ a été évalué comme neutre. $\Phi TSLO$ a été évalué positivement. Ces résultats fournissent une première validation des stimuli sélectionnés.

4.3.5.2 CONDITIONS BIMODALES

Les stimuli Visuels et tactiles (VSTS) se composaient de stimuli visuels (Φ VS) présentés simultanément avec des stimuli tactiles (Φ TS). Chaque type de stimulus visuel a été présenté avec tous les types de stimuli tactiles : 9 niveaux d'expressions faciales x 2 personnages x 3 stimuli tactiles.

4.3.5.3 PLAN FACTORIEL

Le plan factoriel expérimental est un plan factoriel complet à deux facteurs (VS 9 * TS 3).

4.3.6 PROCEDURE

Pendant l'expérience, les participants étaient assis devant un bureau où étaient posé l'appareil tactile, un écran et une souris d'ordinateur. Les participants devaient maintenir leur avant-bras gauche à l'intérieur d'une zone où se trouvait l'appareil tactile (voir Figure 4.3). Les participants ont utilisé leur bras droit pour indiquer leurs réponses. Une session d'entraînement a été réalisée afin de s'assurer que le participant avait bien compris les instructions. Ils devaient garder la même position du corps pendant l'expérience et portaient des casques pour empêcher le bruit de l'écoulement du jet d'air de biaiser la perception tactile. L'expérience comprenait 8 blocs d'essais :

- Un des blocs contenait les 18 VS unimodaux. Le bloc de chaque stimulus VS a été présenté une seule fois pendant 3 secondes. Les stimuli ont été présentés dans un ordre aléatoire dans ce bloc.
- Un deuxième bloc contenait 9 stimuli tactiles unimodaux TS. Dans ce bloc, chacun des 3 stimuli VS a été présenté pendant 3 secondes et a été répété trois fois dans un ordre aléatoire. Chacun des 6 blocs restants incluait 9 essais bimodaux, où les expressions faciales ont été présentées simultanément avec les stimuli tactiles. Dans le bloc bimodal, les stimuli ont été présentés pendant 3 secondes (dans un ordre aléatoire dans le bloc).

La séquence des blocs bimodaux et unimodaux était ordonnée aléatoirement suivant les participants. Après chaque stimulus, les participants évaluaient la valence perçue sur une échelle continue allant de très négative (-100) à très positive (+ 100). Au-dessus de l'échelle la consigne affichait : « vous percevez la stimulation comme étant : »

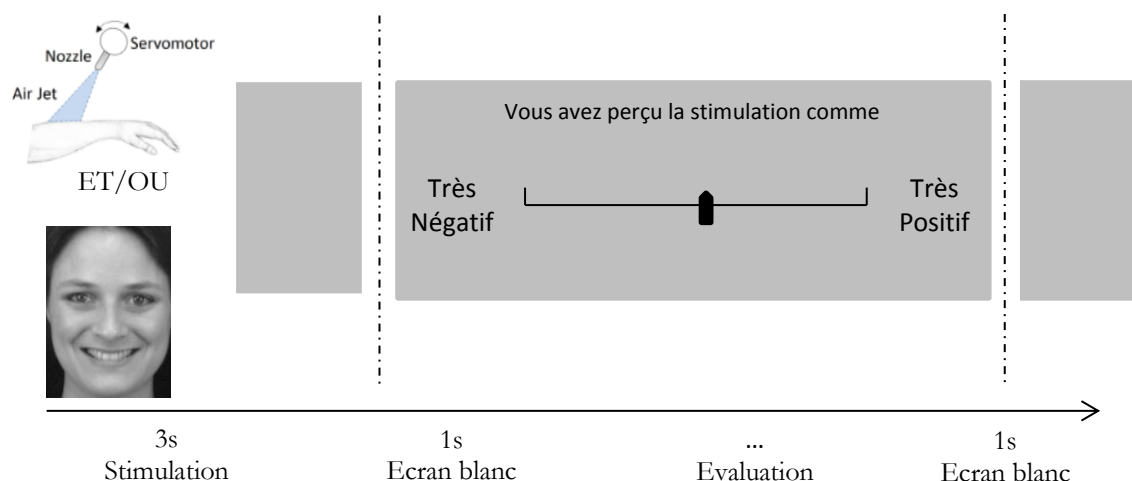


FIGURE 4.5. DEROULEMENT D'UNE SEQUENCE EXPERIMENTALE

4.3.7 RESULTATS

Tout d'abord, nous avons analysé les données à l'aide d'outils statistiques classiques. Nous avons effectué une analyse de variance (ANOVA) suivie par les comparaisons des paires (post hoc avec la méthode la plus petite différence significative de Fisher) pour étudier l'effet de chaque facteur expérimental (stimulation tactile et expression faciale) sur la perception de valence. Le seuil de significativité a été fixé à $p < 0,05$. Ensuite, nous avons utilisé la méthode de la mesure fonctionnelle afin d'examiner le processus d'intégration de la perception de l'émotion bimodale.

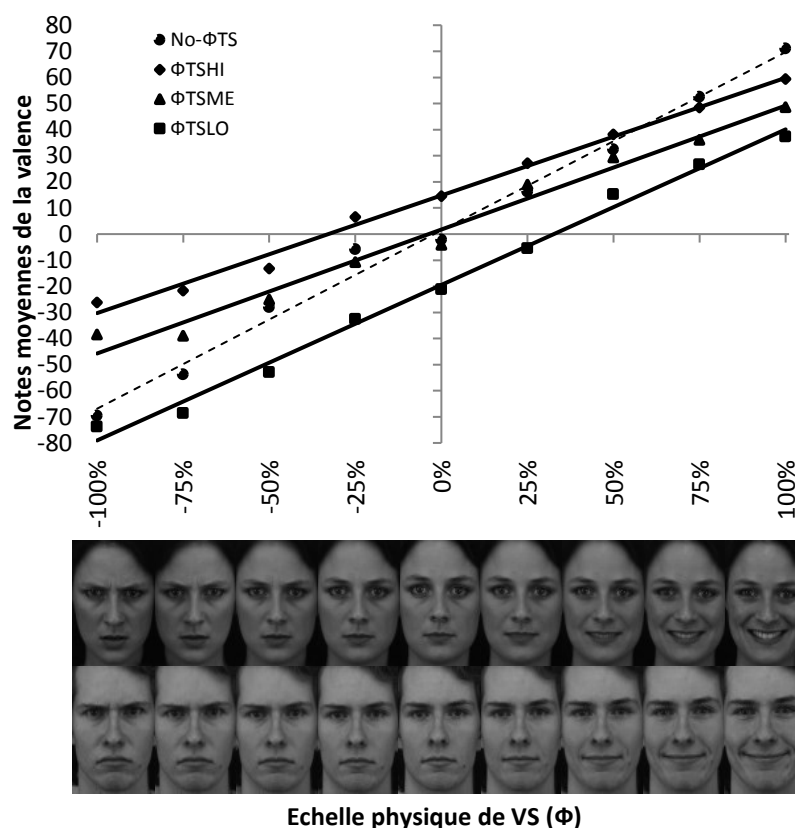


FIGURE 4.6. NOTES MOYENNES ATTRIBUEES A LA VALENCE PAR LE GROUPE DE PARTICIPANTS

4.3.7.1 ANALYSES STATISTIQUES

A. STIMULATIONS UNIMODALES

Des ANOVAs à mesures répétées à un facteur ont été réalisées sur les réponses des participants pour tous les blocs unimodaux visuels et tactiles. Les facteurs intra-sujets suivants ont été considérés pour l'analyse : TS unimodal avec trois niveaux (Φ TSHI, Φ TSME, Φ TSLO). VS unimodal avec neuf niveaux (Φ VS - 100 % Φ VS + 100 % par palier de 25 %, allant de la colère -100% au bonheur +100%).

Stimuli tactile unimodaux (TS) : les résultats ont révélé des différences significatives dans l'évaluation de la valence entre les niveaux de TS [$F(2,38) = 26,22$, $p = 0,0001$]. Φ TSHI étaient perçus comme négatifs/désagréables ($M = -41.11$, $SD = 49.07$). La classe inter-corrélation (CPI) pour les mesures des Φ TSHI unimodaux était de 0.748 avec un intervalle de confiance de 95 % de 0,555 à 880, [$F(19,40) = 9.98$, $p < 0,0001$]. Φ TSME étaient perçus comme proches du neutre ($M = 6.03$, $SD = 20.88$). ICC a 0.442 avec un intervalle de confiance de 95 % de 0,171 à 0,696, [$F(19,40) = 3,375$, $p = 0,001$]. Φ TSLO étaient perçus comme positifs ($M = 47.3$, $SD = 31,09$). ICC a 0.800) avec un

intervalle de confiance de 95 % de 0,635 à 0,907, [F (19,40) = 12 983, $p = 0,001$]. Ces résultats confirment l'hypothèse **H1.A**.

Stimuli visuelles (VS) : Pour les expressions faciales, les résultats ont montré des différences significatives dans l'évaluation de la valence entre les 9 niveaux de VS [F (8,152) = 197, $p < 0,0001$]. Le test post hoc a indiqué que toutes les comparaisons des notes moyennes attribuées à la valence étaient significativement différentes entre tous les niveaux d'expressions faciales, sauf entre -VS25 % et VS - 0 %. Nous avons constaté que la valence augmentait linéairement avec le niveau de l'expression faciale [F (1,19) = 377.37, $p < 0,0001$]. Cette tendance linéaire, illustrée par la FIGURE 4.6, a montré que la valence perçue suit qualitativement et proportionnellement le continuum de morphing de VS, (valence = 0.6827 Φ VS 1,4065, $r^2 = 0,99$). **H1.B** est donc confirmée.

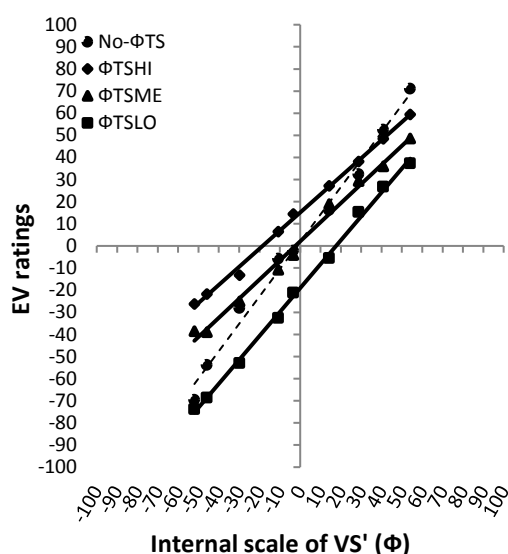


Figure 4.7 Graphique fonctionnel des notes moyennes regroupées de la valence perçue exprimée en fonction de leur mise à l'échelle subjective Ψ VS.

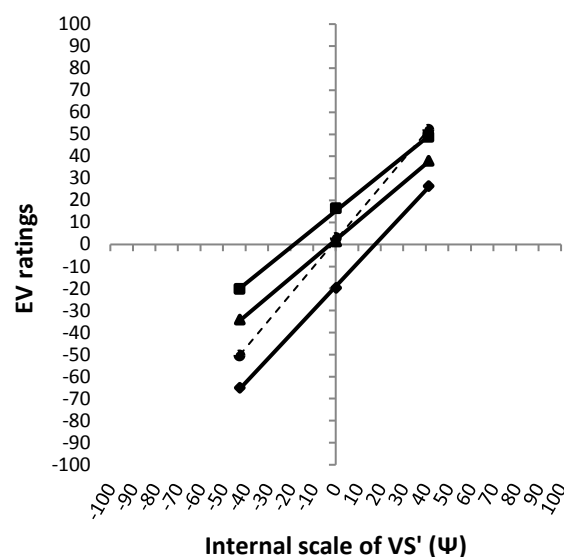


Figure 4.8 Graphique fonctionnel des notes moyennes de la valence perçue exprimée en fonction de leur mise à l'échelle subjective Ψ VS'.

B. STIMULATIONS BIMODALES

Afin de mesurer l'interaction entre les modalités tactiles (jet d'air) et faciales (expression faciale) pour la perception de la valence, nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées sur les notes moyennes des participants avec deux facteurs intra-sujets pris en considération : TS avec quatre niveaux (TSHI, TSME, TSLO et non-TS) et VS avec neuf niveaux (Φ VS - 100 % à Φ VS + 100 %). Les résultats ont montré un effet principal significatif de TS [F (3,57) = 12,7, $p < 0,0001$] et VS [F (8 152) = 177, $p < 0,0001$] et une interaction entre ces deux facteurs [F (24, 456) = 5.2, $p < 0,0001$] sur la valence perçue.

Les analyses statistiques ainsi que l'inspection visuelle de la Figure 4.6 ont conduit à plusieurs constatations. Tout d'abord, les conditions bimodales diminuent la sensibilité aux stimuli visuels. Cela a été illustré par des pentes peu inclinées dans les conditions bimodales comparativement aux VS unimodaux. C'était particulièrement évident pour TSME par rapport aux non-TS (unimodal VS). Cependant, on s'attendait à des pentes plus raides pour des stimuli congruents et des pentes peu plates pour des stimuli incongruents, comparativement aux VS unimodaux. Cela se traduit par des

courbes asymétriques, par exemple pour TSHI (perçue comme désagréable), une pente plus raide pour l'expression faciale de colère, avec une pente moins exprimée pour les expressions visuelles positives. En revanche, nous avons constaté que TSHI a diminué l'ordonnée à l'origine de la tendance linéaire par rapport à TSME tandis que TSLO a augmenté l'ordonnée à l'origine. Le parallélisme des TSHME en ce qui concerne les TSHI et TSLO suggère que TS a un effet plutôt additif : TSHI ajoute une valence négative en ce qui concerne les TSME, tandis que TSLO ajoute une valence positive à VS.

4.3.7.2 MESURE FONCTIONNELLE

Echelle interne de l'évaluation de la valence : La Figure 4.7 illustre les évaluations de la valence par les participants exprimés en fonction de leur perception subjective (ΨVS). Les valeurs subjectives (Ψ) sont approximées par les moyennes marginales des réponses données par les participants pour chaque condition physique ΦVS . En conséquence, les valeurs sur l'axe des abscisses de la Figure 4.7 (i.e. $\Psi VS - 100\%$ à $\Psi VS + 100\%$) représentent l'estimation fonctionnelle des valeurs de stimuli physiques présentés sur l'axe des abscisses Figure 4.6. (I.e. ΦVS à 100% à $\Phi VS + 100\%$). Par exemple, les participants ont estimé la valence pour les stimuli visuels négatifs ($\Phi VS - 100\%$) à -69.5% lorsqu'ils étaient présentés seuls, à -73.7% lorsqu'ils étaient présentés avec une stimulation tactile haute intensité ($\Phi TSHI$), $-38,4\%$ avec stimulation tactile à intensité moyenne ($\Phi TSME$), et -26.15% avec une stimulation tactile de faible intensité ($\Phi TSLO$). En conséquence, la valeur subjective correspondante à $\Psi VS - 100\%$ (c'est-à-dire Ψ_{min}) était de -51.9% . Cette valeur correspond à la moyenne des notes attribuées au stimuli visuels VS - 100% pour tous les niveaux de stimulations tactiles (i.e. moyenne de -69.5% , $-73,7\%$, $-38,4\%$ et $-26,15\%$).

Effet des facteurs : La mesure fonctionnelle permet d'accéder à la plage de l'échelle interne correspondant au processus d'évaluation subjective. Cette échelle de mesure (c'est-à-dire la différence entre Ψ_{min} et Ψ_{max}) quantifie la taille de l'effet de chaque source d'information (VS et TS) sur l'estimation de la valence du stimulus multimodal. La Figure 4.7 illustre bien le fait que l'effet de la stimulation visuelle ($\Psi VS - 100\%$ moins $\Psi VS + 100\%$ = 106) sur la valence est nettement supérieur à celui de TS ($\Psi TSHI$ moins $\Psi TSLO$ = 40). Ceci est confirmé par une comparaison statistique des deux plages [$t(19) = 4,48$ $p < 0,0001$].

Modèle cognitif de combinaison des stimuli tactiles et visuels : La FIGURE 4.7 suggère que les participants ont utilisé une règle de calcul de la moyenne pour combiner les informations provenant des deux modalités. Toutefois, pour déterminer quel processus (règle algébrique) les participants ont utilisé pour intégrer des informations visuelles et tactiles pour l'évaluation de la valence, nous avons examiné les graphiques factoriels et appliqué une ANOVA au niveau individuel. Les résultats précédents ont mis en évidence l'effet général de TS et VS. Toutefois, au niveau individuel, les résultats de l'analyse de variance peuvent différer entre les participants. Pour effectuer des analyses statistiques pour chaque participant, nous avons besoin d'au moins 6 répétitions pour chaque condition. Malheureusement, dans notre conception, il y avait seulement 2 répétitions par cellule pour chaque niveau bimodal. Pour augmenter le nombre de répétitions, nous avons mis en commun des notes de ΦVS présentant des intensités de morphing proches, comme suit (voir Figure 4.8): $-\Phi VS'$ correspond à la moyenne des notes pour $\Phi VS - 100\%$, 75% de $-\Phi VS$ et $\Phi VS - 50\%$; $\Phi VS0'$ correspond à la moyenne des notes pour $\Phi VS - 25\%$, $\Phi VS0\%$ et $\Phi VS+25\%$; $+\Phi VS'$ représente la moyenne des notes pour $\Phi VS+ 50\%$, $\Phi VS+75\%$, $\Phi VS+100\%$.

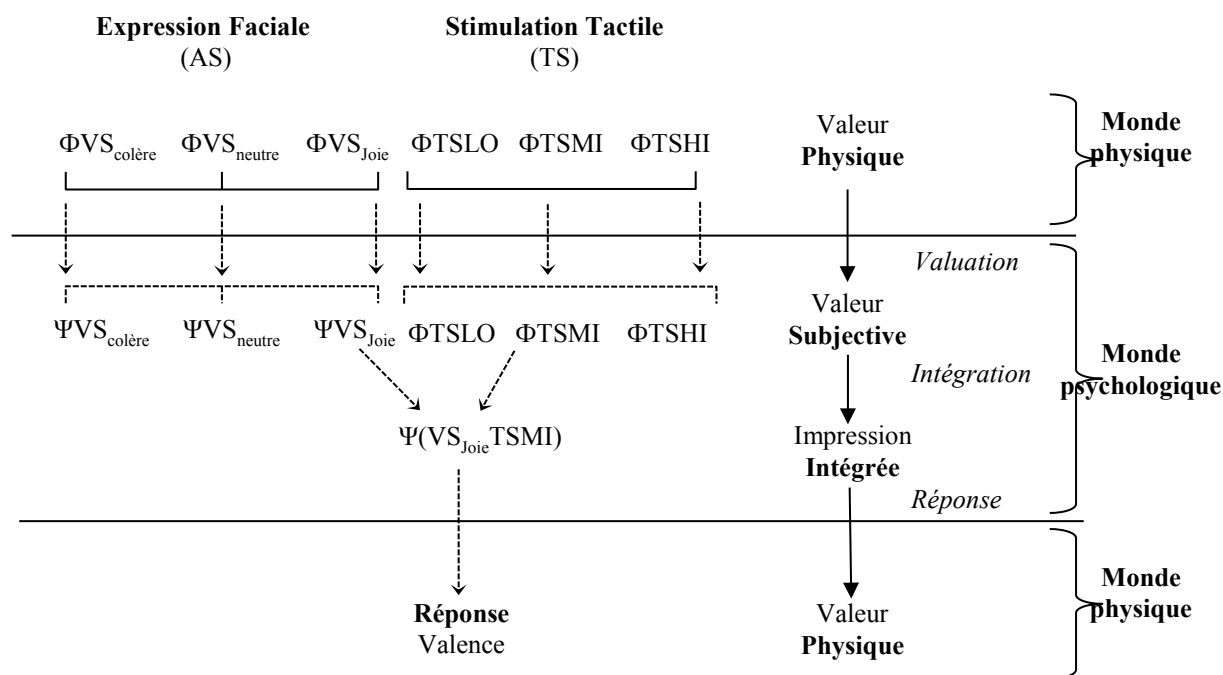


FIGURE 4.9. ILLUSTRATION DU CADRE DE LA THEORIE DE L'INTEGRATION DE L'INFORMATION (ITI) APPLIQUE A NOTRE EXPERIENCE: DEPUIS LA PRESENTATION DU STIMULUS JUSQU'A LA REPONSE DES PARTICIPANTS.

4.3.7.3 ANALYSES INDIVIDUELLES

Tout d'abord, les analyses des tendances confirment que la valence augmente de façon linéaire avec des niveaux VS pour chaque condition de TS [TSHI, $F(1,19) = 89.44$, $p < 0,0001$; TSME, $F(1,19) = 122.17$, $p < 0,0001$; TSLO, $F(1,19) = 175.03$, $p < 0,0001$; non-TS, $F(1,19) = 361.86$, $p < 0,0001$]. Ensuite, la ligne de non-TS qui traverse les lignes bimodales a été confirmée avec la pente de tendance linéaire (condition unimodale) comme étant différente de celle de TSME [$F(1,19) = 17,19$, $p = 0,0005$] et à celle de TSLO [$F(1,19) = 34,56$, $p < 0,0001$], à l'exception de TSHI [$F(1,19) = 0,96$, $p = 0,33$]. En outre, le parallélisme des conditions bimodales s'est traduite par des pentes similaires pour TSME vs TSLO [$F(1,19) = 0,6$, $p = 0,44$], à l'exception de la pente de TSHI qui diffère de TSME [$F(1,19) = 7.86$, $p = 0,01$] et de TSLO [$F(1,19) = 9.53$, $p = 0,006$]. Ces résultats concordent avec ceux obtenus pour l'analyse de tous les niveaux de ΦVS (une analyse plus détaillée du modèle de calcul de la moyenne est fournie ci-dessous dans la section 1.7.3). Afin d'analyser les modèles d'intégration d'informations au niveau individuel nous avons étudié les graphiques factoriels des données fonctionnelles ($\Psi VS'$) des réponses moyennes du groupe de participants à ΦVS . Le modèle global exprimé en fonction de leur échelle subjective ($\Psi VS-$, $\Psi VS0$ et $\Psi VS+$) correspondant aux moyennes marginales de chaque niveau VS' ($\Phi VS'-$, $\Phi VS'0$ et $\Phi VS'+$, respectivement) est illustré sur la Figure 4.8. Le graphique montre un parallélisme dans l'évaluation des stimuli bimodaux. La ligne en pointillés sur le graphique, correspond aux notes attribuées à la valence des expressions faciales VS' (condition non-TS). Les analyses statistiques ci-dessous montrent les effets principaux de chaque source d'information et une interaction entre ces deux facteurs, ce modèle global établit une opération de moyenne comme le modèle le plus approprié dans le cas présent (Anderson, 1982).

La conjugaison des mesures fonctionnelles et les analyses statistiques prouvent que le modèle de moyenne présente des pondérations égales (C'est-à-dire même poids pour les différents niveaux au sein de chaque facteur, EAM) a été le modèle déployé par le groupe participant pour combiner la stimulation tactile et l'expression faciale dans la perception de la valence. Ce résultat confirme l'hypothèse **H2.A**. Toutefois, l'EAM global peut cacher des règles d'intégrations différentes au niveau

individuel dissimulant les différences individuelles dans les règles d'intégration déployées par les participants.

Par conséquent, nous avons visuellement examiné les graphiques factoriels et appliqué une ANOVA sur la moyenne des réponses de chaque individu (avec répétitions, traitées comme des effets aléatoires), à la recherche de profils spécifiques d'intégration de l'information. À la suite de ces analyses, nous avons observé que les modèles d'intégration peuvent être classés en cinq catégories : règle additive, règle multiplicative, règle de moyenne avec des pondérations égales pour la même source, règle de moyenne avec des pondérations différentes pour la même source, les règles d'intégration non-identifiées, et enfin les participants qui n'intègrent pas d'informations multi sources, mais qui basent leur jugement uniquement sur la modalité visuelle (voir la FIGURE 4.9). Le Tableau 4.1 résume les analyses factorielles et statistiques individuelles. Pour la plupart des participants, le modèle de moyenne a été déployé pour intégrer l'information bimodale. La prévalence des paternes EAM avec la règle additive explique la structure du graphique globale. Dans la section suivante, nous donnons plus de détail sur le modèle de moyenne et l'estimation des paramètres du modèle pour chaque participant.

Tableau 4.1. Résumé des analyses fonctionnelles et statistiques au niveau individuel

| Nombre de sujet (n=20) | Effet VS | Effet TS | Effet d'interaction | Type de graphique factoriel | Modèle d'intégration |
|------------------------|----------|----------|---------------------|--|----------------------|
| 2 | Sig | Sig | Non Sig | Lignes parallèles | Additive |
| 2 | Sig | Non Sig | Sig | Fan | Multiplicative |
| 7 | Sig | Sig | Sig | Lignes bimodales parallèles avec une ligne unimodale traversante | EAM |
| 3 | Sig | Sig | Sig | Lignes bimodales parallèles avec une ligne unimodale traversante | DAM |
| 2 | Sig | Sig | Non Sig | Non parallélisme des lignes | Autre |
| 4 | Non Sig | Sig | Non Sig | Lignes groupées | Pas d'intégration |

4.3.7.4 CALCUL DES PARAMETRES DU MODELE DE MOYENNE

Les paramètres de poids/valeur des participants présentant un modèle de moyenne ont été estimés à l'aide du logiciel "rAverage" (Vidotto & Padua, 2007). Ce logiciel exploite l'algorithme BFGS-L-B qui minimise la somme résiduelle des carrés du modèle non linéaire (Byrd, Lu, Nocedal, & Zhu, 1995). Le logiciel fournit des estimations Ψs_i fiables et des valeurs de poids théoriquement valides en particulier lorsque les limites sont fournies à la fonction de minimisation (dans notre cas ± 100). Le calcul de la règle de moyenne équipondérée a fourni une bonne description des résultats. Le R-carré de la convergence du modèle de moyenne équipondérée pour chacun des participants varie entre 0,90 et 0,97, avec $M = 0,96$ et $SD = 0,027$. Nous avons comparé les pondérations attribuées à chaque modalité dans l'intégration bimodale des stimuli tactiles et visuels. Parmi les sept participants présentant un modèle de moyenne à pondérations égales, trois d'entre eux ont donné un poids plus élevé pour les TS, trois participants ont attribué un poids plus élevé pour VS et un seul participant a donné des poids égaux. Pour les participants qui montrent un modèle d'intégration de moyenne différentielle pondérée, le R-carré de chacun des participants varie entre 0,91 et 0,98, avec $M = 0,96$ et $SD = 0,09$. Les trois participants qui ont déployé un modèle de moyenne différentielle ont donné

un poids moyen plus élevé pour les expressions faciales dans l'intégration bimodale. Ces résultats montrent que l'hypothèse **H2.B** n'est pas systématique pour tous les individus.

4.3.8 DISCUSSION GENERALE

Par la présente étude, nous avons examiné la perception des émotions à travers les expressions faciales et tactiles. Durant l'expérimentation, trois conditions étaient présentées aux participants (i.e. expression faciale seule, stimulation tactile seule et expression faciale combinée avec la stimulation tactile). Les résultats montrent que ces deux canaux sont efficaces pour communiquer la valence. Pour la stimulation tactile unimodale, les stimuli tactiles de faible intensité ont été perçus plus positivement que les stimuli d'intensité moyenne et élevée. Les stimuli tactiles élevés sont perçus plus négativement que les stimuli d'intensité moyenne et faible. Ces résultats sont compatibles avec notre étude précédente sur les relations entre les paramètres tactiles et l'évaluation de valence (voir Chapitre 3). Nous supposons que les stimuli par jet d'air lent et de faible intensité stimulent efficacement les mécanorécepteurs spécialisés dans la perception affective.

Pour la stimulation visuelle unimodale, l'expression faciale de la colère a été évaluée négativement, et l'expression de la joie a été évaluée positivement. Les notes attribuées à la valence étaient proportionnelles au niveau du morphing. Ces résultats sont largement documentés dans la littérature (Adolphs, 2002), (Carroll & Russell, 1996), (Ekman & Friesen, 1975).

Concernant la stimulation bimodale, l'approche de la Mesure Fonctionnelle a été utilisée pour évaluer la règle algébrique utilisée pour combiner la perception de la valence émotionnelle de la combinaison de l'expression du visage et de la stimulation tactile. La plupart des participants (80 %) ont intégré les deux sources d'information pour juger de la valence émotionnelle. Le modèle de moyenne équipondérée a été la règle la plus déployée par les participants. De plus, les participants qui moyennaient le canal visuel et tactile ont donné un poids plus élevé au canal visuel. Cette observation concorde avec l'hypothèse que l'expression du visage pourrait être la modalité dominante pour percevoir les émotions par rapport à notre dispositif haptique. Au niveau individuel, les participants ont présenté différentes stratégies d'intégration (additive, moyenne, multiplicative, pattern indéterminé). Quelques participants (20 %) n'ont pas intégré les informations multi sources mais ont basé leur jugement sur les expressions faciales visuelles seulement.

La variabilité des stratégies d'évaluation reflète la complexité de la perception émotionnelle et les différences entre les individus. Ces différences peuvent être associées à des aspects physiologiques ou psychologiques. Malheureusement, la petite taille de l'échantillon étudié dans notre expérience ne permettait pas de tester la contribution des caractéristiques individuelles pour la prévision du modèle d'intégration du participant. Deuxièmement, l'utilisation simultanée des deux canaux a changé la perception des émotions par rapport à un canal unimodal de communication. Compte tenu des résultats obtenus dans cette étude, nous concluons que la stimulation tactile par jet d'air peut être utilisée conjointement avec les expressions faciales pour communiquer la valence émotionnelle.

4.4 CONCLUSION

Ce chapitre met en évidence des modèles algébriques formels qui représentent le processus cognitif de l'intégration bimodale de l'information affective issue des stimulations tactiles et visuelles. On se basant sur ces modèles perceptifs, nous pourrions concevoir des modèles computationnels qui permettraient l'affichage des émotions au moyen de l'expression faciale et la stimulation tactile. Par exemple, nous pourrions mettre en œuvre le modèle sur une plateforme multimodale d'avatar expressif. La plate-forme afficherait des messages affectifs par le biais du canal visuel (par exemple,

l'expression faciale affichée par l'avatar) et du canal haptique (par exemple, les repères tactiles de jet d'air). Le système présenterait différents stimuli pour recueillir les données factorielles. En utilisant ces données, le système pourrait déterminer le modèle d'intégration présenté par l'utilisateur. Si à un moment donné de l'interaction le système doit afficher un message affectif spécifique dans l'espace bimodal, il utilisera le modèle d'intégration de l'utilisateur pour générer la combinaison appropriée de l'expression du visage et de la stimulation tactile. Dans le contexte de la communication affective multimodale, les expressions faciales ne constituent pas la seule modalité pouvant être associée au toucher pour communiquer des émotions. La voix représente un canal de communication affectif tout aussi privilégié. La partie suivante décrit une étude expérimentale examinant la combinaison de la stimulation tactile par jet d'air et la voix pour l'évaluation de la valence émotionnelle.

CHAPITRE 5 :

ETUDE DE LA COMBINAISON DE LA VOIX ET DU TOUCHER DANS LA PERCEPTION DE LA VALENCE

Sommaire du chapitre

| | | |
|-----|---|----|
| 5.1 | Introduction..... | 81 |
| 5.2 | Objectif..... | 81 |
| 5.3 | Hypothèses | 81 |
| 5.4 | Méthode expérimentale..... | 82 |
| 5.5 | Analyses globales des résultats | 85 |
| 5.6 | Analyses individuelles des résultats..... | 88 |
| 5.7 | Discussion Générale..... | 91 |
| 5.8 | Conclusion | 91 |

5.1 INTRODUCTION

La voix constitue un canal de communication affective efficace et largement utilisé. Les états affectifs internes ont un effet direct sur les caractéristiques physiologiques de l'élocution (respiration, phonation). Ces caractéristiques sont encodées par des indices acoustiques observables par un interlocuteur (par exemple, tremblement de la voix). Les descripteurs acoustiques pertinents dans la voix ont été exploités par les chercheurs pour proposer des systèmes capables de synthétiser des discours expression contenant des affects (Andersson, Badino, Watts, & Aylett, 2008). Ces systèmes peuvent s'intégrer à des plateformes d'agents virtuels conversationnels afin de d'offrir une interaction affective multimodale. Un de nos objectifs de recherche est d'ajouter le dispositif tactile à jet d'air à ce type de Plateforme afin de permettre de combiner la modalité tactile avec les autres canaux pour communiquer des affects. Dans ce sens, il nécessaire d'étudier comment les utilisateurs perçoivent les informations affectives issues simultanément des stimuli auditives et tactiles. Dans le domaine de la psychologie les études traitant la perception bimodale des affects impliquant la voix se sont focalisé sur la situation ou ce canal et combiné avec les expressions faciales (Dolan, Morris, & de Gelder, 2001). Ces études ont montré que cette modalité pouvait avoir un effet significatif sur la perception la caractérisation des émotions. Dans ce chapitre, nous reprendrons la démarche suivie dans le chapitre 4 pour examiner la combinaison des stimuli tactiles jet d'air et des expressions vocales pour la perception de la valence émotionnelle.

5.2 OBJECTIF

Cette étude expérimentale vise à examiner les mécanismes d'intégration qui sous-tendent la combinaison de la voix et du toucher dans la perception de la valence. Pendant l'expérience, les participants devaient évaluer la valence de stimuli unimodaux (voix ou tactile) et bimodaux (voix combinée avec le tactile) des stimuli. En utilisant les données recueillies, nous avons étudié comment les participants intégraient les informations bimodales en utilisant la théorie de l'intégration de l'information (TII) (N. H. Anderson, 1981).

5.3 HYPOTHESES

La voix est une modalité efficace pour transmettre des signaux liés à l'activation et à la valence et par le biais d'indices acoustiques (Scherer, 2003)(Callaway & Sima'an, 2006). Plusieurs études ont examiné les caractéristiques acoustiques qui décrivent ou catégorisent des expressions vocales d'émotion. Parmi ces paramètres acoustiques on trouve la fréquence fondamentale (F0), l'amplitude, la durée ou des mesures provenant d'analyses spectrales (Pierre-Yves, 2003). Grace à la manipulation de ces paramètres, des systèmes de synthèse vocale sont développés pour produire des voix pouvant être discriminées sur le plan affectif. Nous voulions valider les résultats de la littérature avec l'hypothèse **H1.A**. L'hypothèse **H1. B** permet de valider les résultats obtenus dans les chapitres 3 et 4. Le toucher peut être utilisé conjointement avec la voix pour communiquer des signaux affectifs (Knapp & Hall, 2010). C'est dans ce sens que nous voulions mettre en évidence les mécanismes qui sous-tendent cette combinaison et spécifiquement avec la stimulation tactile par jet d'air. En se basant sur ces études nous avons émis les hypothèses **H2**.

H1. Estimations unimodales :

- A) les expressions tactiles sont bien discriminées sur la dimension émotionnelle de valence.
- B) les expressions audio sont bien discriminées sur la dimension émotionnelle de valence.

H2. Estimations bimodales :

- A) Les participants fondent leurs jugements sur les deux modalités pour évaluer la valence émotionnelle.
- B) Les participants donnent plus d'importance à l'expression audio lors de l'évaluation de la valence.

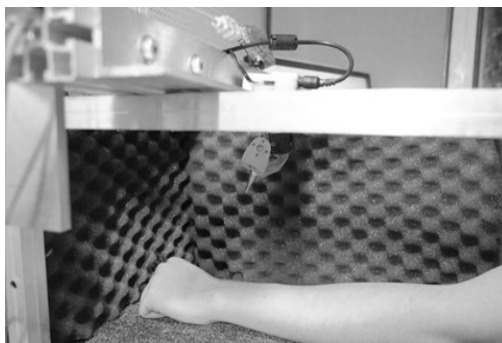


FIGURE 5.1 : PLATFOME EXPERIMENTALE

5.4 METHODE EXPERIMENTALE

5.4.1 PARTICIPANTS

Au total, 23 participants (18 hommes et 5 femmes âgés entre 21 et 55 ans) ont participé à cette étude. Tous les participants étaient droitiers. Aucun des sujets n'avait de blessures physiques ou neurologiques qui auraient pu affecter la sensibilité du bras ou l'audition. Les sujets ont donné leur consentement au début de la session d'expérimentation.

5.4.2 PLATEFORME EXPERIMENTALE

Deux types de stimuli étaient présentés aux participants : (1) les expressions vocales et (2) les stimuli tactiles par jet d'air. Les expressions vocales se composaient d'une pseudo-phrase prononcée avec prosodie. Les voix ont été synthétisées et ensuite soumises à une opération de morphing pour obtenir différents niveaux de prosodie. La section 3.3.3 détaille la méthodologie suivie pour générer les stimuli audio. Les expressions ont été présentées aux participants à l'aide d'un casque audio (SENNHEISER HD 280 PRO). La stimulation tactile a été appliquée sur le bras du participant en utilisant le système de jet d'air (voir chapitre 3).

5.4.3 CONDITIONS ET STIMULI

Nous avons sélectionné plusieurs niveaux de stimuli unimodaux, (tactiles et auditifs) pouvant communiquer différents niveaux de valence. Pour les stimuli tactiles nous avons utilisé ceux examinés dans l'étude précédente. Pour les stimuli vocaux, nous nous sommes basés sur une technique de morphing pour générer des stimuli allant d'une émotion à valence négative (colère) à une émotion à valence positive (joie).

5.4.3.1 CONDITIONS UNIMODALES

A. LES STIMULI AUDIO (AS)

Constitution des stimuli : la synthèse des stimuli vocaux était une des principales problématiques de cette expérimentation. En effet les corpus d'expressions affectives actées sont constitués d'expression vocale de catégorie d'émotion et ne présente pas de niveau intermédiaire entre ces catégories. Ensuite, la qualité de corpus ne permet pas de les exploiter proprement pour la synthèse

d'autres expressions. Nous avons donc choisi de constituer nous même les stimuli vocaux. La méthodologie utilisée pour recueillir les voix reposait sur le protocole utilisé pour collecter le corpus GEMEP (Bänziger, Mortillaro, & Scherer, 2012). Les échantillons numériques (32 bits, mono, fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz) ont été récoltés en enregistrant un orateur adulte mâle prononçant une pseudo-phrase ("nekal ibam soud molen !") avec prosodie. Cette pseudo-phrase n'a pas de signification sémantique afin de ne pas influencer la perception des participants. Les émotions étudiées se composaient de colère (valence négative), joie (valence émotionnelle positive) et neutralité (pas de valence). Pour effectuer cette prononciation, l'orateur a reçu une liste de brèves descriptions illustratives de la signification des émotions étudiées ainsi que trois scénarios pour chacune des trois catégories. L'enregistrement des voix a eu lieu dans le studio du LIMSI (salle acoustique). Nous avons choisi un échantillon pour chacune des deux émotions ainsi que la neutralité. Puis, les trois échantillons sélectionnés ont été normalisés en puissance (RMS). Les expressions avaient une durée entre 1200ms et 1400ms. Pour obtenir des niveaux intermédiaires de stimuli, une opération de morphing de voix a été effectuée en utilisant le programme STRAIGHT sous Matlab. Ce morphing a été réalisé entre l'expression neutre et les deux expressions émotionnelles. Le logiciel STRAIGHT (Kawahara & Irino, 2005)(Kawahara & Morise, 2011) effectue un lissage spectral du pitch de chaque stimulus pour la séparation des constituantes du signal vocal résultant de la source glottale (y compris la fréquence fondamentale F0) et aussi un filtrage des composantes issues des sources supralaryngéal (distribution des pics spectraux, les premiers formants, F1) (Bruckert et al., 2010).

Nous avons identifié manuellement (voir Figure 5.2) des repères de temps-fréquence dans chaque stimulus à mettre en correspondance entre le neutre et l'expression de la colère, puis entre le neutre et l'expression de la joie. Des stimuli intermédiaires étaient ensuite générés par synthèse basée sur l'interpolation (linéaire, logarithmique pour F0, fréquence et amplitude) de ces modèles de point de repère de temps-fréquence. Enfin, nous avons obtenu cinq expressions de voix, allant de la colère (valence négative maximale = $\Phi AS - 100\%$) à la joie (valence positive maximale = $\Phi AS + 100\%$), ce qui correspond à 100% de ΦAS , $\Phi AS - 50\%$, $\Phi AS 0\%$, $\Phi AS + 50\%$ et $\Phi AS + 100\%$.

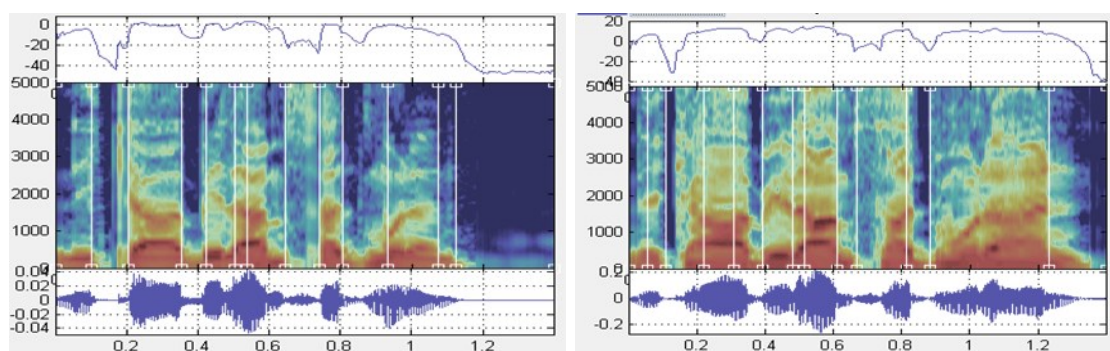


FIGURE 5.2. OPERATION DE MORPHING ENTRE LES SIGNAUX VOCAUX DE COLERE ET NEUTRE. A DROITE L'ENREGISTREMENT DE LA PSEUDO-PHRASE AVEC UN TON NEUTRE. LES LIGNES VERTICALES REPRESENTENT LES POINTS D'INTERET MIS EN CORRESPONDANCE AVEC LES POINTS DU TON JOYEUX A DROITE.

Validation des stimuli vocaux : Nous avons effectué une expérience visant à examiner comment les stimuli générés étaient perçus sur l'échelle de valence. 15 adultes ont testé les 5 stimuli. Chaque stimulus a été répété 6 fois et présenté dans un ordre aléatoire. Après chaque stimulus, les participants devaient évaluer la valence à l'aide d'une échelle continue de suivi allant du très négatif au très positif. Nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées (avec un seuil de significativité fixé à $p < 0,05$) des réponses des participants. Nous avons trouvé une différence significative entre les niveaux de voix [$F(4, 46) = 88.93, p < 0,0001$]. Les tests Posthoc ont révélé que chaque niveau est significativement différent des autres niveaux. Nous avons également constaté que la valence a augmenté linéairement

avec les niveaux des voix [$F(1,73) = 374,9, p < 0,0001$]. Cette tendance linéaire, a montré que la valence perçue suit qualitativement et proportionnellement le continuum des stimuli AS, mais avec le bon ajustement (valence = $28,83 * \Phi AS - 014, r^2 = 0,837$).

B. LES STIMULI TACTILES (TS)

Sur la base des stimuli de l'étude présentée dans le chapitre 4, les paramètres contrôlés de la stimulation tactile pour cette étude sont le débit du jet d'air et la vitesse de déplacement du jet d'air sur l'avant-bras. Trois types de TS ont été présentés aux participants :

- Un stimulus tactile de haute intensité ($\Phi TSHI$) qui présentait un débit élevé (NL50/min) une vitesse de mouvement élevée (12 rad/s),
- Un stimulus tactile de niveau d'intensité moyenne ($\Phi TSME$) avec un débit moyen (25nl/min) et une position statique.
- Un stimulus tactile de faible intensité ($\Phi TSLO$) et un faible débit (7.5nl / min) avec une vitesse de mouvement faible (0,6 rad/s).

Ces paramètres du jet d'air ont été choisis selon les résultats obtenus dans l'étude présentée dans le chapitre 4. Cette étude a présenté une expérience qui met en évidence la relation entre la stimulation tactile par jet d'air et les dimensions émotionnelles. Les résultats ont montré que $\Phi TSHI$ était perçu avec une valence négative, $\Phi TSME$ a été évalué comme neutre alors que $\Phi TSLO$ a été évalué positivement.

5.4.3.2 CONDITIONS BIMODALES

Les stimuli audio-tactiles (ASTS) se composaient de stimuli audio (AS) présentés simultanément avec des stimuli tactiles (TS). Chaque type de stimulus audio a été combiné avec tous les types de stimuli tactiles : 5 expressions audio x 3 niveaux tactiles.

5.4.3.3 PLAN FACTORIEL

Le plan factoriel de cette expérimentation est un plan factoriel complet à deux facteurs (VS 5 * TS 3).

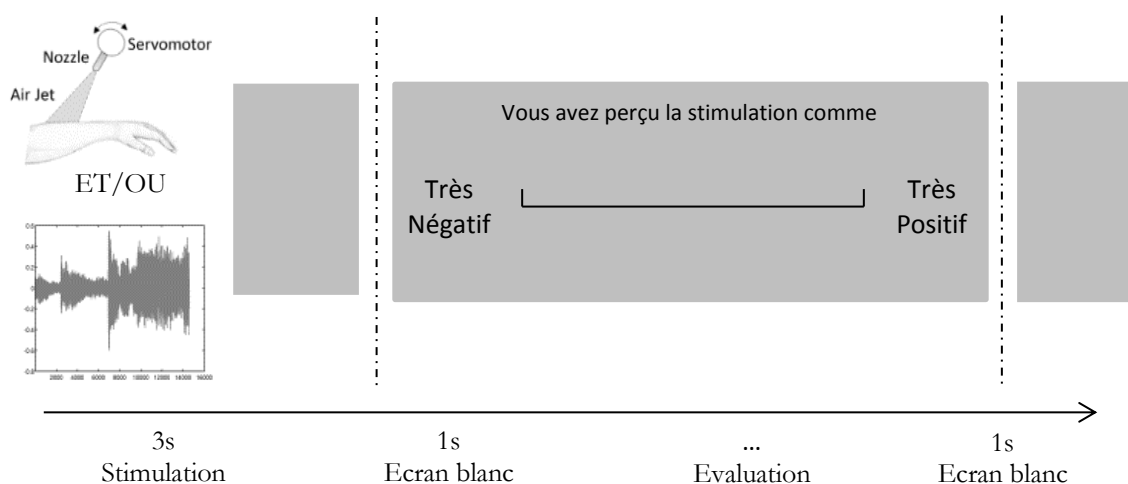


FIGURE 5.3 DEROULEMENT DE LA SEQUENCE EXPERIMENTALE.

5.4.4 PROCEDURE

Les participants étaient assis devant un bureau avec le dispositif de jet d'air, un écran et une souris d'ordinateur. Ensuite, le casque a été fixé. Une séance d'entraînement de six stimuli a été réalisée afin de s'assurer que les participants avaient compris le déroulement de l'expérience. Dans cette session, les valeurs extrêmes des différents stimuli étaient affichées. Les participants devaient maintenir leur avant-bras gauche à l'intérieur de la zone où l'appareil tactile avait été fixé (voir Figure 5.1). Les participants ont reçu pour consigne de garder la même posture pendant l'expérience entière. L'expérience comprenait six blocs de stimuli. Les conditions unimodales consistaient en des stimuli AS (cinq niveaux * six répétitions) et 18 Φ TS stimuli (trois niveaux * six répétitions). Les conditions bimodales se composaient de 90 stimuli Φ ASTS (cinq audio * trois haptiques * six répétitions). On a présenté à chaque participant un total de 132 essais. Chaque essai a duré 3 s. Le flux audio a commencé 1 s après les stimuli tactiles, la durée des stimuli audio varie entre 1200 et 1400 ms. La séquence des blocs bimodaux et unimodaux a été ordonnée aléatoirement entre les participants. Après chaque stimulus, les participants ont utilisé leur bras droit pour indiquer leurs réponses sur l'écran.

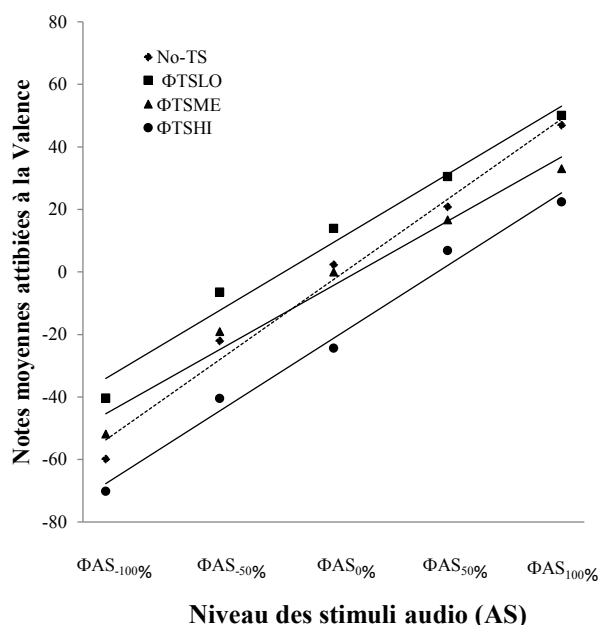


FIGURE 5.4 GRAPHIQUES FONCTIONNELS DES REPNSES DES PARTICIPANTS SUR LES VALENCES EXPRIMEES EN FONCTION DE L'ECHELLE PHYSIQUE (ϕ) DES CATEGORIES DE AS ET TS.

5.5 ANALYSES GLOBALES DES RESULTATS

Les mesures fonctionnelles ont été effectuées afin d'identifier le processus d'intégration utilisé par les participants pour combiner AS et TS. Cette approche repose sur l'inspection visuelle des modèles graphiques (appelés graphiques fonctionnels) et les analyses statistiques. Tout d'abord, nous avons mis en évidence la tendance moyenne du groupe de participants. Ensuite, nous avons examiné les réponses individuelles car les stratégies de combinaison bimodale peuvent être différentes entre les participants.

5.5.1 GRAPHIQUES FACTORIELS

La Figure 5.4 fournit une illustration fonctionnelle classique des données. Les notes moyennes attribuées à la valence sont exprimées en fonction de l'échelle physique (ΦAS) pour chaque catégorie de stimulation tactile (ΦTS). En revanche, la Figure 5.5 illustre la représentation fonctionnelle des mêmes données où la note moyenne de la valence est exprimée en fonction de la valence subjective (ΨAS) mise à l'échelle des stimuli physiques audio (ΦAS) et des différents niveaux des stimuli tactiles ΦTS . Les valeurs subjectives (Ψ) sont approximées par des moyennes marginales des réponses données par les participants pour chaque condition physique ΦAS . Cette opération représente une mise à l'échelle des stimuli physiques audio (ΦAS) et des différents niveaux des stimuli tactiles ΦTS . En conséquence, chaque coordonnée abscisse de la Figure 5.5 ($\Psi AS - 100\%$ à $\Psi AS + 100\%$) est l'estimation fonctionnelle des valeurs physiques dans la Figure 5.6 ($\Phi AS - 100\%$ à $\Phi AS + 100\%$). Par exemple, pour les stimuli audio négatifs extrêmes ($\Phi AS - 100\%$), les participants estimaient la valence comme suit : -60 quand présentés sans stimulation tactile (Φ non-TS), -70 quand présentés avec stimulation tactile haute intensité ($\Phi TS HI$), -52 avec stimulation tactile à intensité moyenne ($\Phi TS ME$) et -40.4 avec stimulation tactile de faible intensité ($\Phi TS LO$) (voir Figure 5.4). Par conséquent, la valeur subjective correspondante de $\Psi AS - 100\%$ (c'est-à-dire Ψ_{min}) est -55, calculée comme étant la moyenne de -60, -40.4, -51.8 et -70.

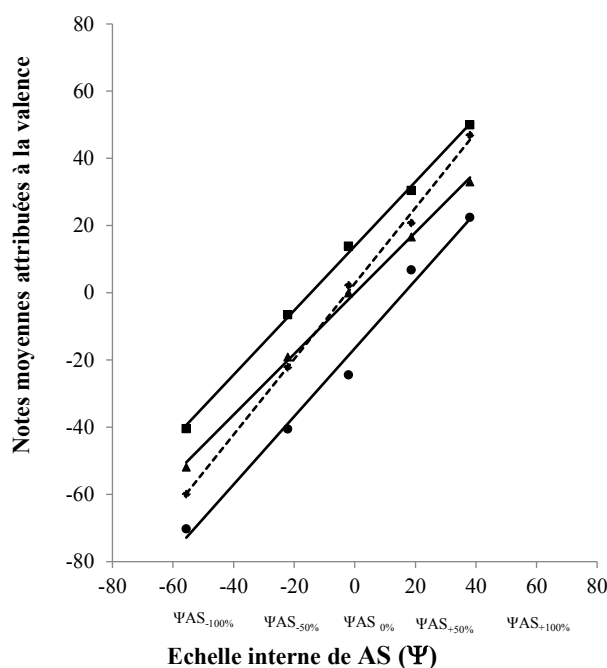


FIGURE 5.5 : GRAPHIQUES FONCTIONNELS DES REponses DES PARTICIPANTS SUR LES VALENCES EXPRIMEES EN FONCTION DE LEUR MISE A L'ECHELLE SUBJECTIVE (Ψ) POUR CHAQUE CATEGORIE DE STIMULUS. LA VALEUR ΨAS CORRESPOND A LA MOYENNE MARGINALE DES COTES DES VALENCES SELON CHAQUE NIVEAU AS.

5.5.2 ANALYSES STATISTIQUES

Pour appuyer les observations faites à l'aide de graphiques fonctionnels, les données ont été analysées à l'aide d'outils de statistiques classiques. Nous avons effectué des analyses de variances (ANOVA) suivies à posteriori de comparaisons (test de la plus petite différence significative de Fisher) pour étudier l'effet de chaque facteur expérimental (audio et tactile) sur la perception de valence. Le seuil de significativité a été fixé à $p < 0,05$.

5.5.2.1 LES STIMULATIONS UNIMODALES

Des ANOVA à mesures répétées ont été réalisées sur la note moyenne attribuée à la valence par les participants pour les blocs audio et tactiles unimodaux. Les facteurs intra-sujets suivants ont été considérés pour l'analyse : unimodal TS avec les trois niveaux (Φ TSHI, Φ TSME, Φ TSLO) et unimodal AS avec cinq niveaux (Φ AS - 100 %, 50 % de- Φ AS, Φ AS - 0 %, Φ AS + 50 % et Φ AS + 100 %). Pour les stimuli tactiles unimodaux TS, les résultats ont montré des différences significatives entre trois différents TS [$F(2,44) = 101.4, p < 0,0001$]. Φ TSHI étaient perçus comme négatifs (c.-à-d., désagréable) ($M = 53.45, SD = 30,35$). Φ TSME étaient perçus comme très proches du neutre ($M = 2.23, SD = 12.54$). Φ TSLO étaient perçus comme positifs (par exemple, agréable) ($M = 42,60, SD = 18,61$). Les tests post hoc ont révélé que toutes les comparaisons étaient statistiquement significatives. Ces résultats concordent avec l'hypothèse **H1.A**. Pour les Φ AS unimodaux, les résultats ont montré une différence significative entre les notes attribuées à la valence entre les cinq niveaux testés [$F(4,88) = 123.48, p < 0,0001$]. Les tests post hoc ont indiqué que toutes les comparaisons des notes moyennes de la valence étaient significatives. Ces résultats concordent avec l'hypothèse **H1. B**. la représentation fonctionnelle offre un accès direct à la plage de l'échelle interne correspondant au processus d'évaluation de la TII. Cette échelle de mesure (c'est-à-dire la différence entre Ψ_{\min} et Ψ_{\max}) quantifie la taille de l'effet de chaque source d'information (AS et TS) sur l'estimation de la valence du stimulus multimodal. La **Figure 5.5** illustre le fait que l'effet de la stimulation visuelle (Ψ AS + 100 % moins Ψ AS-100%=93.6) sur la valence était plus important que celui de la stimulation tactile (Ψ TSHI - Ψ TSLO = 30). Cet effet a été confirmé par une comparaison statistique des deux plages [$t(22) = 6.35, p < 0,0001$]. Par conséquent, cela ne permet pas de conclure sur l'importance relative des modalités tactiles.

5.5.2.2 LES STIMULI BIMODAUX

Pour comprendre l'effet de l'interaction entre les stimuli tactiles, audio et sur la perception de la valence, nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées sur les réponses des participants, avec deux facteurs intra-sujets pris en considération pour l'analyse : TS sur quatre niveaux (TSHI, TSME, TSLO et non-TS) et AS qu'avec cinq niveaux (Φ AS - 100 %, 50 % de- Φ AS, Φ AS - 0 %, Φ AS + 50 %, Φ AS + 100 %). Les résultats ont montré un effet principal significatif de TS [$F(3,66) = 31.33, p < 0,0001$] et AS que [$F(4,88) = 107.5, p < 0,0001$] et une interaction entre ces deux facteurs principaux [$F(12, 264) = 4, p < 0,0001$] sur la valence perçue. La **Figure 5.5** montre une règle de moyenne dans la combinaison des deux AS et TS. En effet, le graphique fonctionnel désigne des lignes parallèles pour des conditions bimodales, avec une ligne de croisement pour la condition unimodale (Norman Henry Anderson, 1982).

5.5.3 DISCUSSION

La validation de **H1.A** montre que les résultats sont conformes à notre étude précédente. La validation de **H1.B** montre que l'opération de morphing de la voix a été efficace car elle produit des niveaux intermédiaires distincts de la valence perçue. En se basant sur la littérature, la discrimination des stimuli naturels prosodiques de la voix était prévisible (Bänziger et al., 2012) (Bänziger et al., 2009). Toutefois, notre capacité à distinguer les niveaux intermédiaires synthétisés par une opération de morphing n'était pas évidente a priori. Les technologies et les recherches actuelles dans ce domaine ne permettent pas d'effectuer l'opération de morphing sur des voix du type sélectionné dans es graphiques fonctionnels, ainsi que les analyses statistiques mettent en évidence le fait que les participants ont basé leur jugement sur les deux modalités (i.e. l'expression vocale et la stimulation tactile) pour évaluer la valence émotionnelle. La tendance globale des patterns factoriels suggère que la règle principale de l'intégration a été le modèle de moyenne. En outre, les résultats ont montré que l'échelle interne (subjective) pour l'expression vocale était plus grande que celle de la stimulation

tactile. Cette différence peut s'expliquer par la différence dans la qualité des expressions entre les deux types de stimulation. Les expressions de la voix que nous avons présenté aux participants sont proches des expressions naturelles (sauf qu'elles ne correspondaient pas à une phrase syntaxiquement et sémantiquement correcte), tandis que la stimulation par jet d'air pourrait être perçue comme étant tout à fait différente du toucher interpersonnel. Cependant, même ces contraintes, l'effet significatif de la stimulation tactile lors de la combinaison des modalités montre que l'ajout de la stimulation tactile par jet d'air est efficace pour moduler l'information perçue par la modalité auditive.

5.6 ANALYSES INDIVIDUELLES DES RESULTATS

Les analyses globales décrites ci-dessus suggèrent que les participants déployaient un modèle de moyenne pour combiner les informations entrantes depuis les deux AS et TS. Toutefois, l'intégration globale moyenne des deux modalités peut entraîner des règles d'intégration différentes au niveau individuel. Nous avons donc examiné les graphiques factoriels et appliqué des tests ANOVA au niveau individuel afin d'étudier les différences individuelles dans le processus d'intégration. Tout d'abord, nous avons réalisé une opération de regroupement pour classer les participants dans les différents groupes présentant des patterns d'intégration similaires. Ensuite, nous avons effectué des analyses de mesures fonctionnelles sur chaque groupe afin d'examiner son processus d'intégration.

5.6.1 GRAPHIQUE FACTORIEL

Afin d'examiner si les participants affichaient différents modes d'intégration (règles algébriques : additive, multiplicative ou moyenne), nous avons effectué une analyse de groupes participants en nous basant sur leurs profils de réponses. Dans le contexte de la TII, des recherches antérieures (Hofmans & Mullet, 2013) ont proposé l'utilisation d'une procédure de classification hiérarchique ascendante, avec l'algorithme de classification ascendante centroïde. Cet algorithme inclut tous les points de données. Il est aussi moins affecté par les valeurs aberrantes que sont les autres méthodes hiérarchiques. Après une inspection visuelle de l'analyse graphique individuelle, nous avons opté pour une solution à trois clusters. Deux clusters contiennent plus d'un participant. Le cluster 1 constitue un groupe de 17 participants et le cluster 2 constitue un groupe de cinq participants.

La Figure 5.6 et la Figure 5.7 représentent des graphiques fonctionnels de la moyenne des notes de valence des sous-groupes 1 et 2, respectivement. Le modèle factoriel du premier sous-groupe montre des lignes presque parallèles pour les évaluations bimodales avec une ligne linéaire transverse pour l'évaluation unimodale (voir Figure 5.6), ayant des caractéristiques semblables à la structure de la Figure 5.5. Ce groupe comprend 80 % des participants. Le second sous-groupe montre des lignes courbées et parallèles pour les évaluations bimodales avec une courbe d'intercommunication (voir Figure 5.7). Dans ce groupe, les niveaux positifs d'AS pour chaque niveau TS ne sont pas bien discriminés. Les tendances affichées par les deux sous-groupes sont une signature d'une règle d'intégration moyenne. Pour confirmer les règles d'intégration déduites des modèles graphiques, nous avons effectué des analyses de variance (ANOVA) sur chaque groupe avec un seuil de signification fixé à $p < 0,05$.

5.6.2 ANALYSES STATISTIQUES

Groupe 1 : les résultats ont révélé des effets principaux des deux facteurs TS [$F(3,48) = 22.16, p < 0,0001$] et AS [$F(4,64) = 190,7, p < 0,0001$], ainsi qu'une interaction entre ces deux facteurs sur la valence perçue [$F(212, 264) = 4, p < 0,0001$].

Groupe 2 : les résultats ont révélé des effets principaux des deux facteurs TS [$F(3,12) = 16.35, p < 0,0001$] et en tant que [$F(4,16) = 50,94, p < 0,0001$], ainsi qu'une interaction entre ces deux facteurs sur la valence perçue [$F(12,48) = 2.96, p = 0,004$]. Les graphiques fonctionnels ainsi que les analyses statistiques indiquent que les deux groupes de participants ont basé leur jugement sur les expressions de la voix et les stimulations tactiles pour évaluer la valence et intégrer les deux sources d'information à l'aide d'une règle de calcul de la moyenne. Nous avons évalué la qualité de l'ajustement du modèle de moyenne aux données à l'aide d'un logiciel dédié.

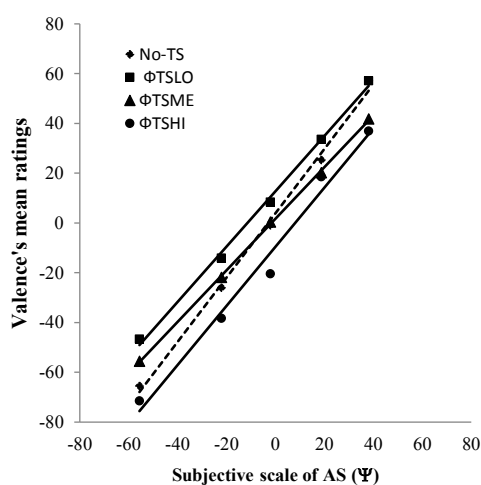


FIGURE 5.6. GRAPHIQUE FONCTIONNEL DU GROUPE 1.

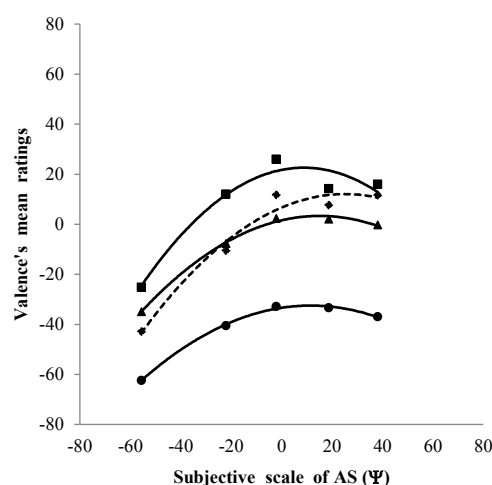


FIGURE 5.7 GRAPHIQUE FONCTIONNEL DU GROUPE 2.

5.6.3 PRECISION DU MODELE

Nous avons utilisé le programme de R-moyenne, qui évalue indépendamment les valeurs de poids et l'ampleur des stimuli. L'estimation a été effectuée sur une base des réponses pour chaque sujet reposant sur le poids égal en moyenne du modèle (EAM). L'ajustement a été évalué à l'aide d'une analyse ANOVA à mesures répétées sur les résidus laissés par le modèle pour chaque cluster :

Groupe 1 : Les principaux effets de TS et AS ont été annulés dans les résidus du premier groupe (respectivement $F(3,48) = 0,003, p = 1$ et $F(4,64) = 0,001, p = 1$), cependant, l'interaction est restée significative dans ce groupe [$F(12,192) = 1,123, p = 0,021$].

Groupe 2 : Les principaux effets de TS et AS ont été annulés dans les résidus pour le deuxième groupe (respectivement $F(3,12) = 0,17 [p = 1]$ et $F(4,16) = 0,23, p = 1$). Le même résultat est obtenu avec l'interaction TS \times AS interaction [$F(12,48) = 1,66, p = 0,1$].

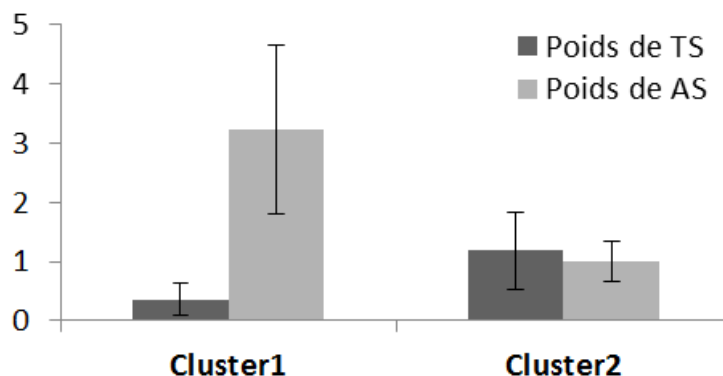


Figure 5.8. Poids moyen des stimuli tactiles (TS) et stimuli audio (AS) dans le modèle de moyenne selon les deux groupes de participants

5.6.4 MESURE DE L'IMPORTANCE DES MODALITES

La Figure 5.8 présente le poids moyen estimé. Les poids sont obtenus sur une échelle de ratio ce qui permet d'effectuer des comparaisons directes au sein des groupes. Pour les participants du groupe 1, le poids des stimuli de voix a été plus élevé que le poids des stimuli tactiles [$t(16) = 7.38, p < 0,0001$]. Pour le groupe 2, les poids de la voix et les stimuli tactiles étaient similaires [$t(4) = 0,35, p = 0.740$]. Pour faire place à des comparaisons entre les groupes, les valeurs ont été normalisées par rapport à la somme totale des poids. Les valeurs ordonnées représentent donc l'importance relative moyenne (variant entre 0 et 1) de chaque niveau de chaque facteur. Ensemble, les résultats montrent que le toucher avait une plus grande importance pour le groupe 2 que pour le groupe 1 [$t(20) = 3.15, p = 0,005$]. Dans l'ensemble, l'importance de la voix est plus élevée pour le groupe 1 que pour le groupe 2 [$t(20) = 2.43, p = 0,024$].

5.6.5 DISCUSSION

L'examen visuel des graphiques factoriels et l'analyse des groupements a permis d'identifier deux groupes de participants qui représentaient tous les modèles d'intégration individuels, à l'exception d'un des participants. Le premier groupe était composé de 4/5 des participants, tandis que le second groupe impliquait 1/5 des participants. Les analyses fonctionnelles ont montré des différences dans l'évaluation des stimuli visuels unimodaux entre les deux groupes. Cependant, le modèle de moyenne semble être déployé par les participants des deux groupes pour l'évaluation de la valence. Le programme de R-moyenne a permis de calculer les convergences des différents types de modèle de moyenne pour l'ensemble des données. Pour les deux groupes, le logiciel a retourné l'EAM comme le modèle le mieux ajusté. D'après ce résultat, nous avons mené des ANOVA à mesures répétées sur les résidus laissés par le modèle pour chaque groupe. Les analyses ont confirmé la validité de l'ajustement de ce modèle. Pour chaque groupe, on a calculé les poids de chaque modalité audio et tactile. Les deux ont différencié dans l'évolution des valences selon AS et TS. Le premier groupe a donné plus d'importance à la modalité audio pour combiner l'expression vocale et la stimulation tactile. Le deuxième groupe a donné une importance similaire pour les deux modalités. Nous n'avons pas trouvé de corrélation entre ces résultats et les différences individuelles comme l'âge ou le sexe. Les recherches futures aborderont l'effet des différences individuelles dans le mode d'intégration affiché par un individu et impliqueront un plus grand nombre de participants afin de permettre de procéder à de nouvelles analyses.

5.7 DISCUSSION GENERALE

Cette partie a présenté une étude expérimentale visant à mettre en évidence comment la stimulation tactile par jet d'air est combinée avec des signaux audio, lorsque la valence émotionnelle est estimée. Trois types de stimuli étaient présentés aux participants (à savoir : des stimuli tactiles, des stimuli vocaux et des stimuli tactiles et vocaux combinés). Les réponses des participants ont été analysées en utilisant des mesures fonctionnelles. Pour la stimulation tactile unimodale, les TS de faible intensité ont été perçus plus positivement que les stimuli d'intensité moyenne et élevée. Les TS de forte intensité ont été perçus plus négativement que les stimuli d'intensité moyenne ou faible. Ces résultats sont compatibles avec l'étude précédente sur les relations entre les caractéristiques physiques tactiles et l'évaluation de valence. Concernant la stimulation audio unimodale, l'expression de colère a été évaluée négativement, et les expressions de joie ont été évaluées positivement. En règle générale, la cote de valence était proportionnelle au niveau de l'expression de morphing. Ces résultats concordent avec les recherches qui soutiennent le rôle de l'expression vocale dans la communication des émotions. Le programme STRAGHT est un outil utile pour les opérations de morphing de voix. Manipulant des caractéristiques acoustiques, il nous a permis d'obtenir des niveaux d'expressions intermédiaires discriminés sur une échelle de valence.

Au sujet des stimuli bimodaux, l'approche de mesure fonctionnelle a révélé que le groupe de participants a combiné la voix et le toucher les avec un modèle de moyenne équipondérée pour évoluer la valence. Les analyses des groupes ont révélé un modèle de calcul de la moyenne pour les deux sous-groupes étudiés. La plupart des participants (80 %) ont présenté une évolution linéaire de la valence des stimuli audio. Le premier groupe a montré une prédominance du canal audio au cours de la stimulation tactile pour estimer la valence. Le deuxième groupe a donné une importance similaire pour les deux modalités puisque tous les stimuli audio ont été distingués. Les recherches futures devraient se concentrer sur les effets du sexe, de l'âge, des traits de personnalité sur le modèle de perception déployé par les participants.

5.8 CONCLUSION

Compte tenu de tous les résultats de ce chapitre, nous concluons que les stimuli tactiles véhiculés par des dispositifs haptiques devraient jouer un rôle majeur dans la communication affective. Même si notre technique de stimulation tactile (c'est-à-dire la stimulation tactile par jet d'air) est inhabituelle, nos résultats ont révélé qu'il pouvait communiquer efficacement la valence. L'utilisation simultanée des stimuli tactiles et auditifs peut changer la perception des émotions par rapport aux stimuli vocaux seuls. Cette étude a mis en évidence l'utilité des modèles algébriques formels pour représenter les processus qui sous-tendent l'intégration multimodale de l'information émotionnelle. Notre étude peut aussi contribuer à la conception d'un modèle informatique qui permettra l'affichage de dimensions affectives par le toucher transmis simultanément avec la voix.

CHAPITRE 6

CONCLUSION GENERALE

Sommaire du chapitre

| | | |
|-----|--|----|
| 6.1 | Rappel des objectifs de recherche | 93 |
| 6.2 | Contributions de la thèse..... | 93 |
| 6.3 | Contributions transverses à cette thèse..... | 94 |
| 6.4 | Poignée de main affective avec un robot humanoïde..... | 96 |
| 6.5 | Limites de cette thèse et perspectives de recherche..... | 96 |

6.1 RAPPEL DES OBJECTIFS DE RECHERCHE

Dans cette thèse nous nous sommes intéressés à la communication affective médiée via une interface tactile. Les nouvelles technologies permettent de communiquer les signaux affectifs par l'intermédiaire de différents types de supports, ceci dans des applications de communications interpersonnelles distantes ou dans le cadre d'interactions homme-machine. Les humains sont capables d'exprimer et de reconnaître les émotions à travers une variété de canaux non verbaux comme l'expression faciale, la voix ou encore la stimulation tactile. Afin de transmettre cette multimodalité de la communication émotionnelle, la conception de systèmes de communication affective doit exploiter efficacement et conjointement ces différents canaux non verbaux. Considérant les progrès dans les domaines du traitement de signal audio et optique, de nombreux chercheurs ont étudié ces canaux pour développer des systèmes capables d'afficher et de reconnaître les affects. Étonnamment, le canal haptique a reçu moins d'attention dans le domaine de l'informatique affective. Cependant, des recherches récentes ont clairement démontré son potentiel à transmettre des signaux affectifs.

La conception d'interactions haptiques affectives médiées reste un challenge pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les dispositifs haptiques existants ne peuvent pas transmettre toutes les caractéristiques physiques du toucher humain. De plus, la majorité des dispositifs haptiques actuels utilisent des structures mécaniques intrusives nécessitant un contact physique avec les régions stimulées du corps. Cette configuration limite les mouvements de l'utilisateur et par conséquent, la transparence de l'interaction. Le deuxième obstacle est le manque de recherches concernant la communication haptique par rapport aux autres canaux non verbaux. Par conséquent, plusieurs questions fondamentales peuvent être posées : quelle technique de stimulation peut fournir un rendu haptique dans une configuration non intrusive ? Comment les paramètres de cette technique de stimulation influencent la perception affective des utilisateurs ? Comment les paramètres de cette technique de stimulation sont combinés avec d'autres modalités non verbales pour la perception des émotions ?

Nous avons choisi d'aborder cette problématique sur deux axes. Le premier consistait à proposer une interface haptique permettant de communiquer des signaux affectifs tout en garantissant une interaction sans contact avec des dispositifs mécaniques. Le deuxième axe avait pour but de conduire une série d'études expérimentales afin d'examiner et de modéliser la perception affective des utilisateurs à l'égard de cette technique de stimulation.

6.2 CONTRIBUTIONS DE LA THESE

6.2.1 DISPOSITIF TACTILE POUR LA COMMUNICATION AFFECTIVE

Une étude bibliographique nous a permis de mettre en évidence la pertinence de l'utilisation du **jet d'air** comme technique de stimulation sans contact avec des systèmes mécaniques. Sur la base des caractéristiques physiques du jet d'air, nous avons présenté une nouvelle interface haptique pour la communication affective médiée. Ce dispositif permet de produire des forces continues de plusieurs amplitudes pouvant être mobiles sur le bras de l'utilisateur.

6.2.2 EFFETS DE LA STIMULATION TACTILE PAR JET D'AIR SUR LA PERCEPTION AFFECTIVE DES UTILISATEURS

Sur la base des résultats de certaines études pertinentes soulignant le rôle du toucher dans la perception affective, nous avons mené une expérience pour étudier les relations entre les caractéristiques physiques de la stimulation tactile par jet d'air et la perception subjective d'un groupe de participants. Plus précisément, nous avons examiné l'impact de chaque paramètre tactile sur la

perception des trois grandes dimensions de l'espace affectif : la valence, l'activation et la dominance. Les résultats de cette étude ont montré que la manipulation des paramètres du jet d'air (i.e. débit et mouvement du jet d'air) permet de discriminer différents niveaux de l'espace PAD. Nous avons conclu donc que la technique de stimulation tactile par jet d'air peut être utilisée pour médier des affects.

6.2.3 COMBINAISON DE LA STIMULATION TACTILE AVEC L'EXPRESSION FACIALE POUR LA PERCEPTION DE LA VALENCE

En général, le toucher est utilisé conjointement avec d'autres modalités pour transmettre des messages affectifs. Parmi ces modalités, les expressions faciales et la voix semblent être les plus importantes. Nous avons mené une étude expérimentale afin de mettre en évidence la manière dont les combinaisons d'expressions tactiles et visuelles affectives sont perçues. Nous nous sommes particulièrement concentrés sur la dimension du plaisir. Nous nous sommes basés sur un cadre théorique appelé théorie de l'intégration de l'information pour modéliser les mécanismes d'intégration qui sous-tendent la combinaison bimodale de la perception subjective de la valence (c'est-à-dire positive ou négative).

6.2.4 COMBINAISON DE LA STIMULATION TACTILE ET VOCALE POUR LA PERCEPTION DE LA VALENCE

Nous avons examiné les mécanismes qui sous-tendent la combinaison de la stimulation tactile et la voix pour la perception de la valence. Les participants devaient évaluer la valence émotionnelle des stimuli unimodaux (vocaux ou tactiles) et des stimuli bimodaux (vocaux et tactiles). En utilisant les données recueillies, nous avons étudié comment les participants intègrent ces sources bimodales dans un cadre appelé théorie de l'intégration de l'information. Semblablement à l'étude visio-tactile, les résultats ont montré que la perception bimodale ne présente pas les mêmes caractéristiques pour tous les individus.

6.3 CONTRIBUTIONS TRANSVERSES A CETTE THESE

6.3.1 MESURE DES POTENTIELS EVOQUES AU COURS DE LA STIMULATION TACTILE PAR JET D'AIR

Dans le cadre de mon séjour scientifique d'un mois à l'université Northern-Michigan chez le Dr. Mounia Ziat, nous avons effectué des mesures physiologiques afin d'apporter plus de preuves concernant l'efficacité de la stimulation tactile par jet d'air à transmettre des signaux affectifs (voir Annexe C pour plus de détails). Nous avons mené une étude pour analyser le traitement temporel cérébral des paramètres de la stimulation par jet d'air à l'aide d'un électroencéphalogramme. Nous avons examiné si la stimulation par jet d'air combinée aux expressions faciales pourrait modifier les potentiels évoqués (ERPs) spécifiques au traitement des affects (Figure 6.1). Nous nous attendions à des ERPs plus élevés lorsque le toucher est associé à un contexte émotionnel comparé à des images neutres telles que des bâtiments. Cette étude est limitée par le nombre moyen de participants, néanmoins, elle présente des informations sur la manière de traiter la stimulation tactile par jet d'air tel que l'effet des niveaux de paramètres du jet d'air (vitesse d'écoulement, vitesse du mouvement à travers la peau) sur l'activation des ERPs dans le cortex somatosensoriel. Les futurs travaux aborderont notamment la combinaison de l'expression du visage et de la stimulation tactile sur les électrodes du cortex frontal pour son importance dans la perception du plaisir ainsi que l'éventuelle capacité des niveaux du jet d'air à provoquer des réponses perceptives de plaisir. Ces travaux font

l'objet d'une communication à "cognitive neuroscience society annual meeting 2015" et soumission au journal IEEE Trans on Haptics.

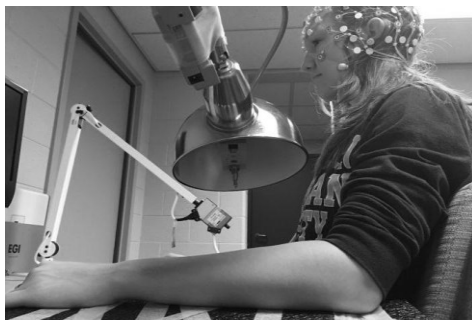


FIGURE 6.1 ETUDE DES POTENTIELS EVOQUES AU COURS DE LA STIMULATION TACTILE PAR JET D'AIR

6.3.2 SYSTEME DE TELE-PRESENCE A BASE DE STIMULATION TACTILE PAR JET D'AIR

Dans cette thèse nous avons présenté un dispositif haptique pour communiquer des affects à un utilisateur. Nous avons développé un système de télé-présence pour permettre à deux utilisateurs d'avoir une interaction haptique à distance. Le concept de ce dispositif est présenté dans la Figure 6.2. La position des bras des deux personnes qui sont distantes est capturée par un système de vision par ordinateur puis représentée dans un environnement virtuel commun. Quand la personne disposant de la partie droite du dispositif touche le bras virtuel de son interlocuteur, elle reçoit un jet d'air sur la paume de la main. Tandis que l'interlocuteur reçoit une stimulation tactile par jet d'air sur son bras qui simule le contact. Ainsi, ce système permet de communiquer des patterns tactiles affectifs comme les caresses.

Les résultats obtenus dans les différentes études présentées dans cette thèse devraient permettre d'améliorer le rendu de ce dispositif pour transmettre efficacement des signaux affectifs. De plus, nous avons conduit une étude psycho-physique pour caractériser la perception des stimuli jet d'air sur la paume de la main (voir Annexe D pour plus de détails sur cette expérimentation).

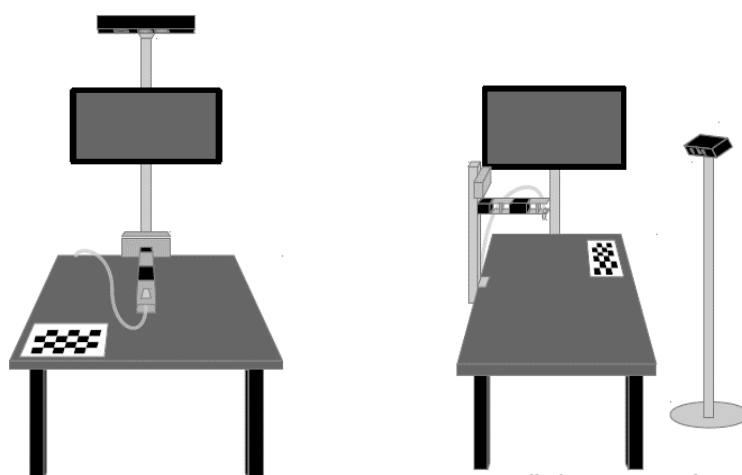


FIGURE 6.2 STSTEME DE COMMUNICATION AFFECTIVE INTERPERSONELLE BASEE SUR LA STIMULATION TACTILE PAR JET D'AIR.

6.3.3 POIGNEE DE MAIN AFFECTIVE AVEC UN ROBOT HUMANOÏDE

Cette étude présente une expérience mettant en évidence la manière dont les participants combinant les expressions faciales et haptiques perçoivent les émotions lorsqu'ils interagissent avec un robot humanoïde expressif. Les participants ont été invités à interagir avec le robot humanoïde (Figure 6.3) à travers une poignée de main (avec plusieurs forces exercées et la rigidité de mouvements) tout en regardant ces expressions faciales émotionnelles (joie, tristesse, neutralité). Des données expérimentales ont été examinées dans le cadre de la théorie de l'intégration de l'information. Les résultats ont révélé que les participants combinaient les expressions additivement afin d'évaluer les dimensions de valence, d'activation et de domination. L'importance relative de chaque modalité était différente dans les dimensions émotionnelles. Les participants ont donné plus d'importance aux expressions faciales lors de l'évaluation de la valence. En revanche, ils ont donné plus d'importance à la rétroaction haptique lors de l'évaluation de l'excitation et de la dominance. Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec Pr. Adrian Tapus (ENSTA). Ils ont fait l'objet de publication aux conférences HRI'2015 (Ammi et al, 2015) et ACII'2015 (Tsalamlal et al, 2015).

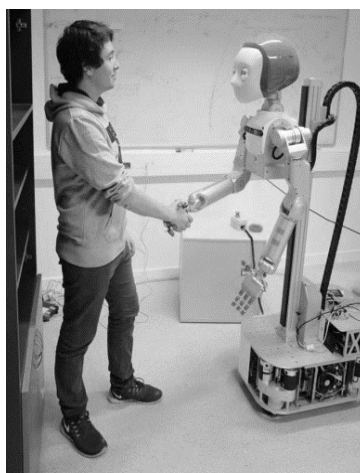


FIGURE 6.3 : ETUDE DE LA PERCEPTION DES EMOTIONS COMMUNIQUEES PAR LES EXPRESSIONS FACIALES ET HAPTIQUES D'UN ROBOT HUMANOÏDE.

6.4 LIMITES DE CETTE THESE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Des éléments de réponse ont pu être apportés aux questions de recherche émises au début de cette thèse. Nos contributions soulèvent de nouvelles interrogations.

Nous avons présenté une nouvelle technique de stimulation pour la communication affective médiée. Plusieurs améliorations techniques peuvent être apportées à ce dispositif. Notamment, le contrôle de la température du jet d'air. Nous avons déjà entamé l'examen de cette caractéristique physique du jet d'air en développant un dispositif capable de contrôler la température du jet d'air tout en effectuant des mesures physiques pour le quantifier. Il serait intéressant d'étudier l'effet du paramètre de la température sur la perception affective des utilisateurs.

Nous avons étudié l'effet des paramètres du débit et du mouvement du jet d'air sur le bras sur la perception affective d'un groupe de participants. Cette perception subjective a été évaluée sur l'espace dimensionnel PAD. Il serait aussi intéressant de manipuler ces paramètres de contrôle pour permettre la distinction des catégories des émotions comme la colère ou la joie.

Concernant la perception des expressions bimodales, nous nous sommes particulièrement penchés sur la perception de la valence. Il serait utile de mesurer la perception des combinaisons des stimuli par jet d'air avec les expressions faciales ou vocales sur les échelles de l'activation et de la dominance.

L'utilisation de la théorie de l'intégration de l'information a permis d'identifier des modèles algébriques décrivant la combinaison bimodale des participants pour l'évaluation de la valence. Nous avons observé que les participants suivaient différents modèles. Il est donc nécessaire d'étudier quels sont les facteurs qui déterminent le type du modèle de combinaison. Par exemple, le sexe, la sensibilité au toucher social ou encore la personnalité.

La technique de stimulation par jet d'air a été développée pour être intégrée à une plateforme d'agents virtuels expressifs (MARC). Les prochains travaux devront aborder cette implémentation en conduisant des études de l'effet de la stimulation tactile au cours d'une interaction affective entre un utilisateur et un agent virtuel. Il a été démontré que les modèles perceptifs obtenus dans les études de la perception bimodale peuvent permettre d'afficher aux utilisateurs des stimuli bimodaux de façon adaptée.

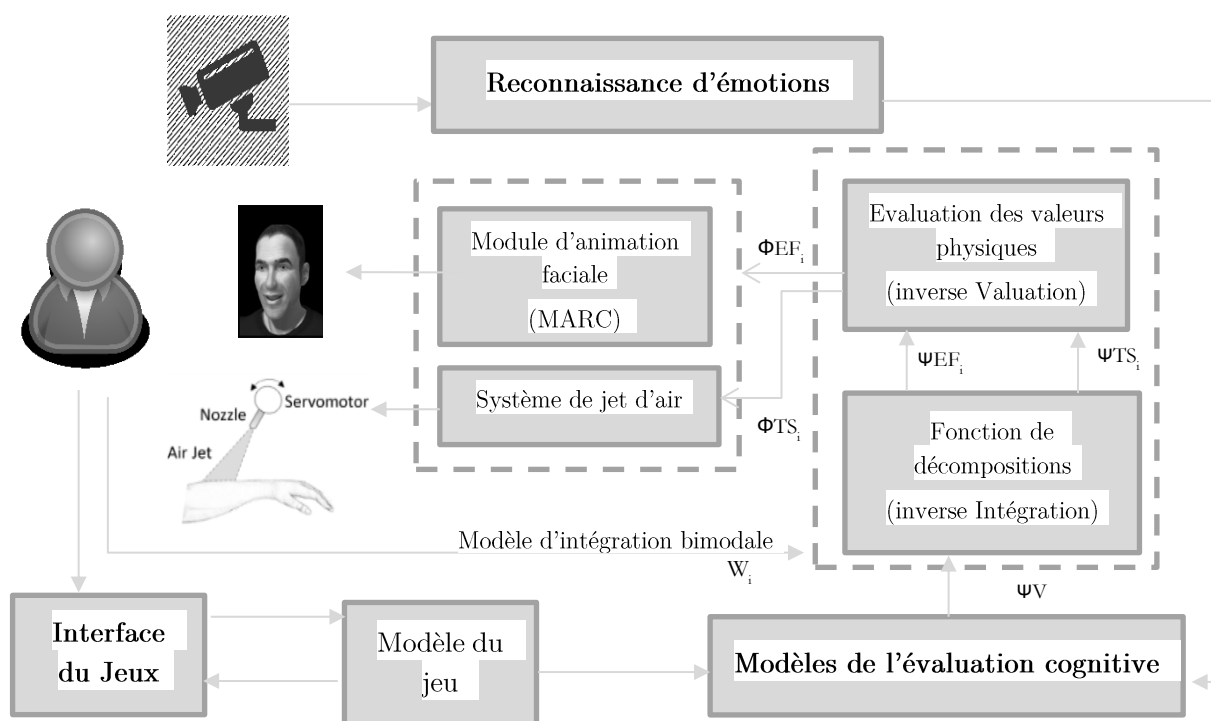


FIGURE 6.4 : PROPOSITION DU SCHEMA DESCRIPTIF DE L'IMPLEMENTATION DU MODELE PERCEPTIF BIMODAL POUR L'AFFICHAGE DES AFFECTS LORS D'UNE INTERACTION ENTRE UN AVATAR VIRTUEL ET UN UTILISATEUR.

Il est possible, par exemple, de se mettre dans la configuration où l'agent virtuel est un compagnon de jeux de l'utilisateur (Figure 6.4). Plusieurs situations déclenchent des événements émotionnels quand l'utilisateur joue (gagne ou perd). Afin d'afficher l'affect adéquat (l'encouragement), on peut utiliser le modèle de l'évaluation cognitive CPM en validant les étapes de l'évaluation cognitive. Par exemple, le rapport aux buts, le potentiel de maîtrise, les standards externes et internes) (Scherer, 2001). Les contextes d'interaction que nous avons considérés nécessitent un historique des événements de jeu et l'état émotionnel du participant de l'utilisateur. Cet état émotionnel peut être mesuré grâce à un système de reconnaissance automatique des émotions dans les expressions faciales. Pour chaque événement, l'application d'évaluation cognitive utilise un arbre de décision pour calculer une valeur pour chaque étape. Ces valeurs déterminent ensuite le niveau de valence à communiquer à l'utilisateur. Grâce au modèle de perception bimodale de la valence spécifique à l'utilisateur (règle algébrique,

valeur des poids de chaque modalité) et en fonction de la configuration de l'interaction (telle que la disponibilité de l'utilisateur à recevoir une stimulation tactile), le système va générer des expressions faciales et tactiles adéquates.

Enfin, des recherches pourraient être menées pour comparer les dispositifs à jet d'air à d'autres dispositifs haptiques et pour évaluer son utilisabilité et acceptabilité dans des applications réelles.

BIBLIOGRAPHIE

- Abelin, Å., & Allwood, J. (2000). Cross linguistic interpretation of emotional prosody. *Proceedings of the ISCA Workshop on Speech and Emotion*, 1(i), 110–113.
- Ackerley, R., Eriksson, E., & Wessberg, J. (2013). Ultra-late EEG potential evoked by preferential activation of unmyelinated tactile afferents in human hairy skin. *Neuroscience Letters*, 535, 62–6. <http://doi.org/10.1016/j.neulet.2013.01.004>
- Ackerley, R., Hassan, E., Curran, A., Wessberg, J., Olausson, H., & McGlone, F. (2012). An fMRI study on cortical responses during active self-touch and passive touch from others. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 6(August), 51. <http://doi.org/10.3389/fnbeh.2012.00051>
- Adolphs, R. (2002). Recognizing emotion from facial expressions: psychological and neurological mechanisms. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, 1(1), 21–62. <http://doi.org/10.1177/1534582302001001003>
- Alhalabi Osama, & Susumu, S. (n.d.). Tele-Handshake: A Cooperative Shared Haptic Virtual Environment. In *Eurohaptics 2001* (pp. pp. 60–64). Birmingham, UK.
- Alves, N. T. (2013). Recognition of static and dynamic facial expressions: a study review. *Estudos de Psicologia*, 18(1), 125–130. <http://doi.org/10.1590/S1413-294X2013000100020>
- Ammi, M., Demulier, V., Caillou, S., Gaffary, Y., Tsalamlal, Y., Martin, J.-C., and Tapus, A. (2015). Haptic Human-Robot Affective Interaction in a Handshaking Social Protocol. In *IEEE Human-Robot Interaction Conference*. Oregon.
- Anderson, N. H. (1981). *Foundations of Information Integration Theory* (New York:).
- Anderson, N. H. (1982). *Methods of information integration theory* (Vol. 2). Academic Press New York.
- Anderson, N. H. (1989). Information Integration Approach to Emotions and Their Measurement. In R. P. Kellerman (Ed.), *The Measurement of Emotions* (pp. 133–186). Academic Press. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-558704-4.50012-8>
- App, B., McIntosh, D. N., Reed, C. L., & Hertenstein, M. J. (2011). Nonverbal channel use in communication of emotion: how may depend on why. *Emotion (Washington, D.C.)*, 11(3), 603–17. <http://doi.org/10.1037/a0023164>
- Arnold, M. B. (1960). *Emotion and personality*. Columbia University Press.
- Auvray, M., Myin, E., & Spence, C. (2010). The sensory-discriminative and affective-motivational aspects of pain. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34(2), 214–223. <http://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.07.008>
- Bailenson, J. N., Yee, N., Brave, S., Merget, D., & Koslow, D. (2007). Virtual Interpersonal Touch : Expressing and Recognizing Emotions Through Haptic Devices. *Human-Computer Interaction*, 22, 325–353.
- Balci, K. (2004). Xface. *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI)*, 399. <http://doi.org/10.1145/989863.989935>
- Banse, R., & Scherer, K. R. (1996). Acoustic profiles in vocal emotion expression. *Journal of Personality and Social Psychology*, 70(3), 614–636. <http://doi.org/10.1037/0022-3514.70.3.614>

- Bänziger, T., Grandjean, D., & Scherer, K. R. (2009). Emotion recognition from expressions in face, voice, and body: the Multimodal Emotion Recognition Test (MERT). *Emotion (Washington, D.C.)*, 9(5), 691–704. <http://doi.org/10.1037/a0017088>
- Bänziger, T., Mortillaro, M., & Scherer, K. R. (2012). Introducing the Geneva Multimodal expression corpus for experimental research on emotion perception. *Emotion (Washington, D.C.)*, 12(5), 1161–79. <http://doi.org/10.1037/a0025827>
- Barnett, K. (1972). A theoretical construct of the concepts of touch as they relate to nursing. *Nursing Research*, 21(2), 102–109.
- Bashyal, S., & Venayagamoorthy, G. K. (2008). Recognition of facial expressions using Gabor wavelets and learning vector quantization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(7), 1056–1064. <http://doi.org/10.1016/j.engappai.2007.11.010>
- Bavkar, S. S. (2015). Geometric Approach for Human Emotion Recognition using Facial Expression. *International Journal of Computer Applications*, 118(14), 17–22.
- Berkowitz, L. (1993). Towards a general theory of anger and emotional aggression: Implications of the cognitive-neoassociationistic perspective for the analysis of anger and other emotions.
- Bianchi, M., Gwilliam, J. C., Degirmenci, A., & Okamura, A. M. (2011). Characterization of an air jet haptic lump display. *Conference Proceedings: ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference, 2011*, 3467–70. <http://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6090937>
- Bickmore, T., Fernando, R., & Ave, H. (2009). Towards Empathic Touch by Relational Agents, (Aamas), 8–11.
- Bickmore, T. W., Fernando, R., Ring, L., & Schulman, D. (2010). Empathic Touch by Relational Agents. *Affective Computing, IEEE Transactions on*, 1(1), 60–71. <http://doi.org/10.1109/T-AFFC.2010.4>
- Black, M. J. M. J., & Yacoob, Y. (1997). Recognizing Facial Expressions in Image Sequences Using Local Parameterized Models of Image Motion. *International Journal of Computer Vision*, 25(1), 23–48. <http://doi.org/10.1023/A:1007977618277>
- Boisacq-Schepens, N., & Crommelinck, M. (2000). *Abr{é}g{é}s de neuro-psycho-physiologie*. Dunod. Retrieved from https://books.google.fr/books?id=xub_GwAACAAJ
- Bonanni, L., & Vaucelle, C. (1997). Affective TouchCasting, 1.
- Bonnet, D., Ammi, M., & Martin, J.-C. (2011). Improvement of the recognition of facial expressions with haptic feedback. *2011 IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Games*, 81–87. <http://doi.org/10.1109/HAVE.2011.6088396>
- Bordegoni, M., Cugini, U., Belluco, P., & Aliverti, M. (2009). Evaluation of a Haptic-Based Interaction System for Virtual Manual Assembly. In *Virtual and Mixed Reality, Proceedings* (Vol. 5622, pp. 303–312). http://doi.org/10.1007/978-3-642-02771-0_34
- Bosch, L. Ten. (2000). Emotions: what is possible in the asr framework. *Proceedings of the ISCA*, 189–194.
- Bozkurt, E., Erzin, E., & Yemez, Y. (2015). Affect-expressive hand gestures synthesis and animation. *Proceedings - IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2015-Augus*. <http://doi.org/10.1109/ICME.2015.7177478>
- Brave, S., & Dahley, A. (1997). inTouch: A Medium for Haptic Interpersonal Communication.
- Broeren, J., Dixon, M., Sunnerhagen, K. S., & Rydmark, M. (2006). Rehabilitation after stroke using virtual reality, haptics (force feedback) and telemedicine. *Studies in Health Technology and Informatics*, 124(2), 51–6.

- Bruckert, L., Bestelmeyer, P., Latinus, M., Rouger, J., Charest, I., Rousselet, G. a., ... Belin, P. (2010). Vocal Attractiveness Increases by Averaging. *Current Biology*, *20*(2), 116–120. <http://doi.org/10.1016/j.cub.2009.11.034>
- Byrd, R., Lu, P., Nocedal, J., & Zhu, C. (1995). A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization. *SIAM Journal on Scientific Computing*, *16*(5), 1190–1208. <http://doi.org/10.1137/0916069>
- Cahn, J. (1990). The Generation of Affect in Synthesized Speech. *Journal of the American Voice I/O Society*, 1–19. <http://doi.org/10.1.1.34.8410>
- Calder, A. J., Burton, A. M., Miller, P., Young, A. W., & Akamatsu, S. (2001). A principal component analysis of facial expressions. *Vision Research*, *41*(9), 1179–1208. [http://doi.org/10.1016/S0042-6989\(01\)00002-5](http://doi.org/10.1016/S0042-6989(01)00002-5)
- Callaway, C., & Sima'an, K. (2006). Wired for Speech: How Voice Activates and Advances the Human-Computer Relationship. *Computational Linguistics*. <http://doi.org/10.1162/coli.2006.32.3.451>
- Calvo, M. G., & Lundqvist, D. (2008). Facial expressions of emotion (KDEF): Identification under different display-duration conditions. *Behavior Research Methods*, *40*(1), 109–115. <http://doi.org/10.3758/BRM.40.1.109>
- Campanella, S., & Belin, P. (2007). Integrating face and voice in person perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(12), 535–43. <http://doi.org/10.1016/j.tics.2007.10.001>
- Camps, J., Tuteleers, C., Stouten, J., & Nelissen, J. (2013). A situational touch: How touch affects people's decision behavior. *Social Influence*, *8*(4), 237–250. <http://doi.org/10.1080/15534510.2012.719479>
- Carroll, J. M., & Russell, J. A. (1996). Do facial expressions signal specific emotions? Judging emotion from the face in context. *Journal of Personality and Social Psychology*, *70*(2), 205–218. <http://doi.org/10.1037/0022-3514.70.2.205>
- Castellano, G., Kessous, L., & Caridakis, G. (2007). Multimodal emotion recognition from expressive faces , body gestures and speech. In *Artificial intelligence and innovations 2007: From theory to applications* (pp. 375–388). Springer US.
- Cha, J., Eid, M., Rahal, L., & Saddik, A. E. (2008). HugMe: An interpersonal haptic communication system. *Haptic Audio Visual Environments and Games, 2008. HAVE 2008. IEEE International Workshop on*. <http://doi.org/10.1109/HAVE.2008.4685306>
- Christian Becker-asano, Kohei Ogawa, Shuichi Nishio, H. I. (2010). Exploring the Uncanny Valley With Geminoid Hi-1 in a Real-World Application. *Proceedings of IADIS International Conference Interfaces and Human Computer Interaction*, (July), 121–128. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.227.2116>
- Cohen, I., Sebe, N., Garg, A., Chen, L. S., & Huang, T. S. (2003). Facial expression recognition from video sequences: Temporal and static modeling. *Computer Vision and Image Understanding*, *91*(1-2), 160–187. [http://doi.org/10.1016/S1077-3142\(03\)00081-X](http://doi.org/10.1016/S1077-3142(03)00081-X)
- Cohn, J. F., Ambadar, Z., & Ekman, P. (2007). Observer-based measurement of facial expression with the Facial Action Coding System. *The Handbook of Emotion Elicitation and Assessment*, 203–221. http://doi.org/10.1007/978-3-540-72348-6_1
- Cosmides, L., & Tooby, J. (2000). Evolutionary Psychology and the Emotions. *Handbook of Emotions*, *2*, 91–115. <http://doi.org/10.1007/978-94-007-1951-4>
- Courgeon, M. (2011). *MARC: Modèles Informatiques des Emotions et de leurs Expressions Faciales pour l'Interaction Homme- Machine Affective Temps Réel*. Paris-Sud.
- Courgeon, M., & Clavel, C. (2013). MARC: a framework that features emotion models for facial animation during human-computer interaction. *Journal on Multimodal User Interfaces*, *7*(4), 311–319.

<http://doi.org/10.1007/s12193-013-0124-1>

- Courgeon, M., Clavel, C., Tan, N., & Martin, J. C. (2011). Front view vs. side view of facial and postural expressions of emotions in a virtual character. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 6758, pp. 132–143). http://doi.org/10.1007/978-3-642-22639-7_14
- D'mello, S. K., & Kory, J. (2015). A review and meta-analysis of multimodal affect detection systems. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 47(3), 43.
- Davidson, R. J., Maxwell, J. S., & Shackman, A. J. (2004). The privileged status of emotion in the brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(33), 11915–11916. <http://doi.org/10.1073/pnas.0404264101>
- de Gelder, B., & Vroomen, J. (2000). The perception of emotions by ear and by eye. *Cognition & Emotion*, 14(3), 289–311. <http://doi.org/10.1080/026999300378824>
- De Greeff, J., Delaunay, F., & Belpaeme, T. (2009). Towards retro-projected robot faces: An alternative to mechatronic and android faces. *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 306–311. <http://doi.org/10.1109/ROMAN.2009.5326314>
- Debrot, A., Schoebi, D., Perrez, M., & Horn, A. B. (2013). Touch as an interpersonal emotion regulation process in couples' daily lives: the mediating role of psychological intimacy. *Personality & Social Psychology Bulletin*, 39, 1373–85. <http://doi.org/10.1177/0146167213497592>
- Dellaert, F., Polzin, T., & Waibel, A. (1996). Recognizing emotion in speech. *Proc. of the Fourth International Conference on Spoken Language*, 3, 1970–1973. <http://doi.org/10.1109/ICSLP.1996.608022>
- de-Meijer, M. (1989). The contribution of general features of body movement to the attribution of emotions. *Journal of Nonverbal Behavior*, Win. Vol 1(4), 247–268.
- Derks, D., Fischer, A. H., & Bos, A. E. R. (2008). The role of emotion in computer-mediated communication: A review. *Computers in Human Behavior*, 24(3), 766–785. <http://doi.org/10.1016/j.chb.2007.04.004>
- Dobson, K., Boyd, D., Ju, W., Donath, J., & Ishii, H. (2001). Creating visceral personal and social interactions in mediated spaces. *CHI '01 Extended Abstracts on Human Factors in Computer Systems - CHI '01*, 151. <http://doi.org/10.1145/634158.634160>
- Dolan, R. J., Morris, J. S., & de Gelder, B. (2001). Crossmodal binding of fear in voice and face. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(17), 10006–10. <http://doi.org/10.1073/pnas.171288598>
- Edgington, M. (1997). Investigating the limitations of concatenative synthesis. In *EUROSPEECH*.
- Edwards, J., Jackson, H. J., & Pattison, P. E. (2002). Emotion recognition via facial expression and affective prosody in schizophrenia: a methodological review. *Clinical Psychology Review*, 22(6), 789–832. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12214327>
- Eid, M., & Al Osman, H. (2015). Affective Haptics: Current Research and Future Directions. *IEEE Access*, 3536(c), 1–1. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2497316>
- Ekkekakis, P. (2012). Affect, mood, and emotion. *Measurement in Sport and Exercise Psychology*, 321–332. <http://doi.org/10.1017/CBO9780511820724>
- Ekman, P. (1984). Expression and the nature of emotion. *Approaches to Emotion*, 3, 19–344.
- Ekman, P. (1989). The argument and evidence about universals in facial expressions of emotion. *Handbook of Social Psychophysiology*.
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1975). *Unmasking the face: A guide to recognizing emotions from facial*

- clues. *Journal of Personality*. Prentice-Hall. Retrieved from <http://psycnet.apa.org/psycinfo/1975-31746-000>
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1978). *Facial Action Coding System: A Technique for the Measurement of Facial Movement*. Consulting Psychologists Press.
- Ekman, P., & Keltner, D. (1970). Universal facial expressions of emotion. *California Mental Health Research Digest*, 8(4), 151–158.
- Ekman, P., & Rosenberg, E. (2005). *What the face reveals. What the Face Reveals*. Oxford University Press.
- Essick, G. K., James, A., & McGlone, F. P. (1999). Psychophysical assessment of the affective components of non-painful touch. *NeuroReport: For Rapid Communication of Neuroscience Research*. US: Lippincott Williams & Wilkins. <http://doi.org/10.1097/00001756-199907130-00017>
- Essick, G. K., McGlone, F., Dancer, C., Fabricant, D., Ragin, Y., Phillips, N., ... Guest, S. (2010). Quantitative assessment of pleasant touch. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34(2), 192–203. <http://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.02.003>
- Ethofer, T., Anders, S., Erb, M., Droll, C., Royen, L., Saur, R., ... Wildgruber, D. (2006). Impact of voice on emotional judgment of faces: an event-related fMRI study. *Human Brain Mapping*, 27(9), 707–714. <http://doi.org/10.1002/hbm.20212>
- Fasel, B., & Luetten, J. (2003). Automatic facial expression analysis: A survey. *Pattern Recognition*, 36(1), 259–275. [http://doi.org/10.1016/S0031-3203\(02\)00052-3](http://doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00052-3)
- Field, T. (2010). Touch for socioemotional and physical well-being: A review. *Developmental Review*. <http://doi.org/10.1016/j.dr.2011.01.001>
- Fisher, J. D., Rytting, M., & Heslin, R. (1976). Hands touching hands: affective and evaluative effects of an interpersonal touch. *Sociometry*, 39(4), 416–421. <http://doi.org/10.2307/3033506>
- Fontaine, J. R., Scherer, K. R., Roesch, E. B., & Ellsworth, P. (2007). The world of emotion is not two-dimensional. *Psychological Science*, 18(12), 1050–1057.
- Frati, V., & Prattichizzo, D. (2011). Using Kinect for hand tracking and rendering in wearable haptics. *2011 IEEE World Haptics Conference, WHC 2011*, 317–321. <http://doi.org/10.1109/WHC.2011.5945505>
- Frijda, N. H. (1986). The emotions: Studies in emotion and social interaction. *Edition de La*.
- Frijda, N. H. (1988). The Laws of Emotion. *American Psychologist*, 43(5), 349–358. <http://doi.org/10.5465/AMR.2007.25275690>
- Gaffary, Y., Eyharabide, V., Martin, J.-C., & Ammi, M. (2014). The Impact of Combining Kinesthetic and Facial Expression Displays on Emotion Recognition by Users. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 30.11, 904–920.
- Gallace, A., & Spence, C. (2010). The science of interpersonal touch: An overview. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(2), 246–259. <http://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.10.004>
- Gao, Y., Bianchi-Berthouze, N., & Meng, H. (2012). What Does Touch Tell Us About Emotions in Touchscreen-Based Gameplay? *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 19(4), 31:1–31:30. <http://doi.org/10.1145/2395131.2395138>
- Gauntner, J. W., Hrycak, P., & Livingood, J. N. B. (1970). Survey of literature on flow characteristics of a single turbulent jet impinging on a flat plate. *Distribution*, (February), 1–43.
- Ge, K. T. (2000). *Solving Inverse Kinematics Constraint Problems for Highly Articulated Models*.
- Gilroy, S. W., Cavazza, M., Niiranen, M., Andr??, E., Vogt, T., Urbain, J., ... Billingham, M. (2009). PAD-based multimodal affective fusion. *Proceedings - 2009 3rd International Conference on Affective*

- Computing and Intelligent Interaction and Workshops, ACHI 2009*.
<http://doi.org/10.1109/ACHI.2009.5349552>
- Goldenberg, A., Benhabib, B., & Fenton, R. (1985). A complete generalized solution to the inverse kinematics of robots. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 1(1), 14–20.
<http://doi.org/10.1109/JRA.1985.1086995>
- Gordon, I., Voos, A. C., Bennett, R. H., Bolling, D. Z., Pelphrey, K. a., & Kaiser, M. D. (2013). Brain mechanisms for processing affective touch. *Human Brain Mapping*, 34(4), 914–22.
<http://doi.org/10.1002/hbm.21480>
- Green, B. G. (2004). Temperature perception and nociception. *Journal of Neurobiology*, 61(1), 13–29.
<http://doi.org/10.1002/neu.20081>
- Gross, J. J., & Barrett, L. F. (2011). Emotion generation and emotion regulation: One or two depends on your point of view. *Emotion Review*, 3(1), 8–16.
- Guest, S., Essick, G., Dessirier, J. M., Blot, K., Lopetcharat, K., & McGlone, F. (2009). Sensory and affective judgments of skin during inter- and intrapersonal touch. *Acta Psychologica*, 130(2), 115–26. <http://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.10.007>
- Gulledge, A. K., Gulledge, M. H., & Stahmann, R. F. (2003). Romantic Physical Affection Types and Relationship Satisfaction. *The American Journal of Family Therapy*, 31(4), 233–242.
<http://doi.org/10.1080/01926180390201936>
- Gunes, H., & Pantic, M. (2010a). Automatic measurement of affect in dimensional and continuous spaces. *Proceedings of the 7th International Conference on Methods and Techniques in Behavioral Research - MB '10, 2010*, 1–5. <http://doi.org/10.1145/1931344.1931356>
- Gunes, H., & Pantic, M. (2010b). Automatic, Dimensional and Continuous Emotion Recognition. *International Journal of Synthetic Emotions*, 1(1), 68–99. <http://doi.org/10.4018/jse.2010101605>
- Gupta, S., Morris, D., Patel, S. N., & Tan, D. (2013). AirWave: Non-Contact Haptic Feedback Using Air Vortex Rings. *Proc. UbiComp 2013*, 419–428. <http://doi.org/10.1145/2493432.2493463>
- Haans, A., & IJsselstein, W. (2005). Mediated social touch: a review of current research and future directions. *Virtual Reality*, 9(2-3), 149–159. <http://doi.org/10.1007/s10055-005-0014-2>
- Harris, R. J., Young, A. W., & Andrews, T. J. (2012). Morphing between expressions dissociates continuous from categorical representations of facial expression in the human brain. <http://doi.org/10.1073/pnas.1212207110/-/DCSupplemental.www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1212207110>
- Hartmann, B., Mancini, M., & Pelachaud, C. (2006). Implementing expressive gesture synthesis for embodied conversational agents. *Lecture Notes in Computer Science (including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3881 LNAI, 188–199.
http://doi.org/10.1007/11678816_22
- Hashimoto, Y., Nakata, S., & Kajimoto, H. (2009). Novel tactile display for emotional tactile experience. *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology - ACE '09*, 124. <http://doi.org/10.1145/1690388.1690410>
- Hayward, V., & Astley, O. R. (1996). Performance Measures for Haptic Interfaces. *Robotics*, 195–207.
- Henley, N. M. (1973). Status and sex: Some touching observations. *Bulletin of the Psychonomic Society*. US: Psychonomic Society, Inc.
- Henley, N. M. (1977). *Body Politics: Power, sex, and nonverbal communication*. (E. Cliffs, Ed.). Prentice-Hall.
- Hertenstein, M. J. (2002). Touch: Its communicative functions in infancy. *Human Development*, 45(2),

- 70–94. <http://doi.org/10.1159/000048154>
- Hertenstein, M. J., & Campos, J. J. (2001). Emotion Regulation Via Maternal Touch. *Infancy*, 2(4), 549–566. http://doi.org/10.1207/S15327078IN0204_09
- Hertenstein, M. J., Holmes, R., McCullough, M., & Keltner, D. (2009). The communication of emotion via touch. *Emotion (Washington, D.C.)*, 9(4), 566–73. <http://doi.org/10.1037/a0016108>
- Hertenstein, M. J., Keltner, D., App, B., Buleit, B. a, & Jaskolka, A. R. (2006). Touch communicates distinct emotions. *Emotion (Washington, D.C.)*, 6(3), 528–33. <http://doi.org/10.1037/1528-3542.6.3.528>
- Hertenstein, M. J., Verkamp, J. M., Kerestes, A. M., & Holmes, R. M. (2006). The communicative functions of touch in humans, nonhuman primates, and rats: a review and synthesis of the empirical research. *Genetic, Social, and General Psychology Monographs*, 132(1), 5–94. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17345871>
- Hess, U., & Thibault, P. (2009). Darwin and emotion expression. *American Psychologist*, 64(2), 120.
- Hh, C., & Al, K. (2013). REVIEW INTERPERSONAL TOUCH: THE LOST ART OF MANKIND - A REVIEW, 13(1), 48–58.
- Hofmans, J., & Mullet, E. (2013). Towards unveiling individual differences in different stages of information processing: A clustering-based approach. *Quality and Quantity*, 47(1), 455–464. <http://doi.org/10.1007/s11135-011-9529-7>
- Hofmans, J., Shanteau, J., & Masin, S. C. (2012). Information Integration Theory and Functional Measurement: Applications in Psychology. *Psicológica*, 33, 419–423.
- Hoirul, A., Corresponding, B., Bade, A., Sunar, M. S., & Daman, D. (2009). A Vibration Tactile Aesthetic to Enhance the Realism of Interactive Game Avatar. *International Journal of Digital Content Technology and Its Applications*, 34–43. <http://doi.org/10.4156/jdcta.vol3.issue4.3>
- Hornik, J. (1991). Shopping Time and Purchasing Behavior As a Result Of In-Sotre Tactile Stimulation. *Perceptual and Motor Skills*, 73(3), 969–970. <http://doi.org/10.2466/pms.1991.73.3.969>
- Hornik, J. (1992). Contact on Customers ' Effects of Physical Time and Behavior Shopping. *Marketing Letters*, 3(1), 49–55. <http://doi.org/10.1007/BF00994080>
- Hornik, J., & Ellis, S. (1988). Strategies to Secure Compliance for a Mall Intercept Interview. *The Public Opinion Quarterly*, 52(1982), 539–551. <http://doi.org/10.1086/269129>
- Hoshi, T. (2012). Handwriting transmission system using noncontact tactile display. *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, 399–401. <http://doi.org/10.1109/HAPTIC.2012.6183821>
- Huang, C. & Huang, Y., & Huang, C. & Huang, Y. (1997). Facial Expression Recognition Using Model-Based Feature Extraction and Action Parameters Classification. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 8(3), 278–290.
- Huisman, G., Darriba Frederiks, A., Van Dijk, B., Hevlen, D., & Krose, B. (2013). The TaSSt: Tactile sleeve for social touch. *2013 World Haptics Conference (WHC)*, 211–216. <http://doi.org/10.1109/WHC.2013.6548410>
- Hussain, M. S., Monkaresi, H., & Calvo, R. A. (2012). Categorical vs. dimensional representations in multimodal affect detection during learning. *Lecture Notes in Computer Science*, 7315 LNCS, 78–83. http://doi.org/10.1007/978-3-642-30950-2_11
- Iida, A., Campbell, N., Iga, S., Higuchi, F., & Yasumura, M. (2000). A Speech Synthesis System with Emotion for Assisting Communication. *Proc. of ISCA Workshop on Speech and Emotion*, pp, 167–172.
- Inoue, S., Makino, Y., & Shinoda, H. (2015). Active Touch Perception Produced by Airborne Ultrasonic

- Haptic Hologram. *World Haptics Conference (WHC)*, 2015, 362–367. <http://doi.org/10.1109/WHC.2015.7177739>
- Izadi, S., Kim, Hilliges, O., Molyneaux, D., Newcombe, R., Kohli, P., ... Fitzgibbon, A. (2011). KinectFusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera. *Proceedings of UIST 2011*, 559–568. <http://doi.org/10.1145/2047196.2047270>
- Izard, C. E. (1971). *The face of emotion / Carroll E. Izard*. Appleton-Century-Crofts New York.
- Jack, R. E., Garrod, O. G. B., & Schyns, P. G. (2014). Dynamic facial expressions of emotion transmit an evolving hierarchy of signals over time. *Current Biology*, 24(2), 187–192. <http://doi.org/10.1016/j.cub.2013.11.064>
- Johnstone, T., & Scherer, K. R. (1999). The Effects of Emotions on Voice Quality. *Proceedings of the 14th International Conference of Phonetic Sciences*, 2029–2032.
- Joung, H. Y., & Do, E. Y. (2011). Tactile Hand Gesture Recognition through Haptic Feedback for Affective Online Communication, 6.
- Karg, M., Kuhnlenz, K., & Buss, M. (2010). Recognition of affect based on gait patterns. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 40(4), 1050–1061. <http://doi.org/10.1109/TSMCB.2010.2044040>
- Karg, M., Samadani, A. A., Gorbet, R., Kuhnlenz, K., Hoey, J., & Kulic, D. (2013). Body movements for affective expression: A survey of automatic recognition and generation. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 4(4), 341–359. <http://doi.org/10.1109/T-AFFC.2013.29>
- Kawahara, H., & Irino, T. (2005). Underlying Principles of a High-quality Speech Manipulation System STRAIGHT and Its Application to Speech Segregation. In P. Divenyi (Ed.), *Speech Separation by Humans and Machines SE - 11* (pp. 167–180). Springer US. http://doi.org/10.1007/0-387-22794-6_11
- Kawahara, H., & Morise, M. (2011). Technical foundations of TANDEM-STRAIGHT, a speech analysis, modification and synthesis framework. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 36(5), 713–727. <http://doi.org/10.1007/s12046-011-0043-3>
- Kessler, G. D., Hodges, L. F., & Walker, N. (1995). Evaluation of the CyberGlove As a Whole-hand Input Device. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 2(4), 263–283. <http://doi.org/10.1145/212430.212431>
- Klatzky, R. J., Lederman, S. J., & Reed, C. L. (1987). There's more to touch than meets the eye: . *Journal of Experimental Psychology: General*, 116(4), 356–369.
- Kleinsmith, A., & Bianchi-Berthouze, N. (2007). Recognizing affective dimensions from body posture. *Affective Computing and Intelligent Interaction. Lecture Notes in Computer Science*, 4738, 48–58. http://doi.org/10.1007/978-3-540-74889-2_5
- Kleinsmith, A., & Bianchi-Berthouze, N. (2013). Affective body expression perception and recognition: A survey. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 4(1), 15–33. <http://doi.org/10.1109/T-AFFC.2012.16>
- Kleinsmith, A., Bianchi-Berthouze, N., & Steed, A. (2011). Automatic recognition of non-acted affective postures. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 41(4), 1027–1038. <http://doi.org/10.1109/TSMCB.2010.2103557>
- Knapp, M. L., & Hall, J. A. (2010). *Nonverbal Communication in Human Interaction. Dress as NonVerbal Communication*. Cengage Learning.
- Kobayashi, H., & Hara, F. (1992). Recognition of Six Basic Facial Expressions and Their Strength by Neural Network Department of Mechanical Engineering, 381–386.
- Korein, J., & Badler, N. (1982). Techniques for Generating the Goal-Directed Motion of Articulated

- Structures. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 2(9), 71–81. <http://doi.org/10.1109/MCG.1982.1674498>
- Lang, P., & Bradley, M. M. (2007). The International Affective Picture System (IAPS) in the study of emotion and attention. *Handbook of Emotion Elicitation and Assessment*, 29.
- Lazarus, R. S. (1982). Thoughts on the relations between emotion and cognition. *American Psychologist*, 37(9), 1019.
- Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1984). *Stress, appraisal, and coping*. Springer publishing company.
- LeDoux, J. E. (1993). Emotional memory systems in the brain. *Behavioural Brain Research*, 58(1), 69–79.
- Lee, E. (n.d.). Towards Multimodal Affective Feedback : Interaction between Visual and Haptic Modalities.
- Leite, I., Martinho, C., & Paiva, A. (2013). Social Robots for Long-Term Interaction: A Survey. *International Journal of Social Robotics*, 5(2), 291–308. <http://doi.org/10.1007/s12369-013-0178-y>
- Leite, I., Martinho, C., Pereira, A., & Paiva, A. (2008). iCat: an Affective Game Buddy Based on Anticipatory Mechanisms (Short Paper). *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 3, Internatio*, 1229–1232.
- Levav, J., & Argo, J. J. (2010). Physical Contact and Financial Risk Taking. *Psychological Science*, 21(6), 804–810. <http://doi.org/10.1177/0956797610369493>
- Lhommet, M., Xu, Y., Marsella, S., & Avenue, H. (2013). Cerebella : Automatic Generation of Nonverbal Behavior for Virtual Humans, 4303–4304.
- Lindgren, L., Westling, G., Brulin, C., Lehtipalo, S., Andersson, M., & Nyberg, L. (2012). Pleasant human touch is represented in pregenual anterior cingulate cortex. *NeuroImage*, 59(4), 3427–32. <http://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.11.013>
- Lisetti, C., & Bastard, G. (2004). MAUI: a Multimodal Affective User Interface Sensing User's Emotions based on Appraisal Theory-Questions about Facial Expressions. *1st Workshop of the EC HUMAINE Network of Excellence on Research on Emotions and Human-Machine Interaction*, (June), 1–4. Retrieved from <http://emotion-research.net/projects/humaine/ws/wp3/ChristineLisetti/restricted/Lisetti-Bastard-Geneva3.pdf>
- Löken, L. S., Evert, M., & Wessberg, J. (2011). Pleasantness of touch in human glabrous and hairy skin: order effects on affective ratings. *Brain Research*, 1417, 9–15. <http://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.08.011>
- Massaro, D. W. (2004). A framework for evaluating multimodal integration by humans and a role for embodied conversational agents. *Proceedings of the 6th International Conference on Multimodal Interfaces - ICMI '04*, 24. <http://doi.org/10.1145/1027933.1027939>
- Massaro, D. W., & Egan, P. B. (1996). Perceiving affect from the voice and the face. *Psychonomic Bulletin & Review*, 3(2), 215–21. <http://doi.org/10.3758/BF03212421>
- McCabe, C., Rolls, E. T., Bilderbeck, A., & McGlone, F. (2008). Cognitive influences on the affective representation of touch and the sight of touch in the human brain. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 3(2), 97–108. <http://doi.org/10.1093/scan/nsn005>
- McCloskey, D. I. (1988). *Sensory Systems: II: Senses Other than Vision* (pp. 36–38). Boston, MA: Birkh{ä}user Boston. http://doi.org/10.1007/978-1-4684-6760-4_17
- McCluskey, K. W., Albas, D. C., Niemi, R. R., Cuevas, C., & Ferrer, C. A. (1975). Cross-cultural differences in the perception of the emotional content of speech: A study of the development of sensitivity in Canadian and Mexican children. *Developmental Psychology*, 11(5), 551.
- McGlone, F., & Reilly, D. (2010). The cutaneous sensory system. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34(2), 148–59. <http://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.08.004>

- McGlone, F., Wessberg, J., & Olausson, H. (2014). Discriminative and Affective Touch: Sensing and Feeling. *Neuron*, 82(4), 737–755. <http://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.05.001>
- Meeren, H. K. M., van Heijnsbergen, C. C. R. J., & de Gelder, B. (2005). Rapid perceptual integration of facial expression and emotional body language. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(45), 16518–23. <http://doi.org/10.1073/pnas.0507650102>
- Mehrabian, A. (1996). Pleasure-arousal-dominance: A general framework for describing and measuring individual differences in temperament. *Current Psychology*, 14(4), 261–292.
- Mehrabian, A., & Friar, J. T. (1969). Encoding of attitude by a seated communicator via posture and position cues. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 33(3), 330.
- Mitsunaga, N. (2006). Robovie-IV: A Communication Robot Interacting with People Daily in an Office. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 5066–5072). <http://doi.org/10.1109/IROS.2006.282594>
- Motola, R., Jaques, P., Axt, M., & Vicari, R. (2009). Architecture for animation of affective behaviors in pedagogical agents. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 15(4), 3–13. <http://doi.org/10.1007/bf03194509>
- Naab, P. J., & Russell, J. a. (2007). Judgments of emotion from spontaneous facial expressions of New Guineans. *Emotion (Washington, D.C.)*, 7(4), 736–744. <http://doi.org/10.1037/1528-3542.7.4.736>
- Nakai, a., Ohashi, T., & Hashimoto, H. (1998). 7 DOF arm type haptic interface for teleoperation and virtual\reality systems. *Proceedings. 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications (Cat. No.98CH36190)*, 2(October), 1266–1271. <http://doi.org/10.1109/IROS.1998.727473>
- Necker, R., & Reiner, B. (n.d.). Temperature-sensitive mechanoreceptors, thermoreceptors and heat nociceptors in the feathered skin of pigeons. *Journal of Comparative Physiology*, 135(3), 201–207. <http://doi.org/10.1007/BF00657247>
- Niewiadomski, R., & Pelachaud, C. (2007). Model of Facial Expressions Management for an Embodied Conversational Agent. In A. R. Paiva, R. Prada, & R. Picard (Eds.), *Affective Computing and Intelligent Interaction SE - 2* (Vol. 4738, pp. 12–23). Springer Berlin Heidelberg. http://doi.org/10.1007/978-3-540-74889-2_2
- Oatley, K., Keltner, D., & Jenkins, J. M. (2006). *Understanding emotions*. Blackwell publishing.
- Olausson, H., Wessberg, J., Morrison, I., McGlone, F., & Vallbo, A. (2010). The neurophysiology of unmyelinated tactile afferents. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34(2), 185–91. <http://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.09.011>
- Ortony, A., Clore, G. L., & Collins, A. (1990). *The cognitive structure of emotions*. Cambridge university press.
- Ortony, A., & Turner, T. J. (1990). What 's Basic About Basic Emotions? *Psychological Review*, 97(3), 315–331. <http://doi.org/10.1037/0033-295X.97.3.315>
- Paleari, M., Grizard, A., & Lisetti, C. (2007). Adapting psychologically grounded facial emotional expressions to different anthropomorphic embodiment platforms. *Proceedings of the FLAIRS Conference 2007*, 7–9. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Adapting+Psychologically+Gro unded+Facial+Emotional+Expressions+to+Different+Anthropomorphic+Embodiment+Platforms#0>
- Panksepp, J. (1982). Toward a general psychobiological theory of emotions. *Behavioral and Brain Sciences*, 5(03), 407–422.
- Panksepp, J. (1992). A Critical Role for 'Affective Neuroscience' in Resolving What Is Basic About Basic

- Emotions. *Psychological Review*, 99(3), 554–560. <http://doi.org/10.1037/0033-295X.99.3.554>
- Pantic, M., Sebe, N., Cohn, J. F., & Huang, T. (2005). Affective multimodal human-computer interaction. *Proceedings of the 13th Annual ACM International Conference on Multimedia*, 669–676. <http://doi.org/10.1145/1101149.1101299>
- Park, Y. (2010). CheekTouch: An Affective Interaction Technique while Speaking on the Mobile Phone, 3241–3246.
- Patel, A. T. (2013). *The Handbook of Touch* (Vol. 92). <http://doi.org/10.1097/PHM.0b013e31829e78ed>
- Patterson, H. M., Pollick, F. E., & Sanford, A. J. (2003). The Role of Velocity in Affect Discrimination. *Dimension Contemporary German Arts And Letters*, 756–761.
- Penrose, R., & Todd, J. a. (1955). A generalized inverse for matrices. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 51(03), 406. <http://doi.org/10.1017/S0305004100030401>
- Pfeifer, J. H., Iacoboni, M., Mazziotta, J. C., & Dapretto, M. (2008). Mirroring others' emotions relates to empathy and interpersonal competence in children. *NeuroImage*, 39(4), 2076–85. <http://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.10.032>
- Picard, R. W. (1997). Affective Computing. *Rosalind W. Picard*. Retrieved from <http://www.amazon.com/exec/obidos/ASIN/0262161702/acmorg-20>
- Pierre-Yves, O. (2003). The production and recognition of emotions in speech: Features and algorithms. *International Journal of Human Computer Studies*, 59, 157–183. [http://doi.org/10.1016/S1071-5819\(02\)00141-6](http://doi.org/10.1016/S1071-5819(02)00141-6)
- Plutchik, R. (1980). A general psychoevolutionary theory of emotion. *Theories of Emotion*, 1, 3–31.
- Plutchik, R. (2001). The Nature of Emotions Human emotions have deep evolutionary roots, a fact that may explain their complexity and provide tools for clinical practice. *American Scientist*, 89(4), 344–350.
- Posner, J., Russell, J. A., & Peterson, B. S. (2005). The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology. *Development and Psychopathology*, 17(03), 715–734.
- Prigent, E., Amorim, M.-A., Leconte, P., & Pradon, D. (2014). Perceptual weighting of pain behaviours of others, not information integration, varies with expertise. *European Journal of Pain*, 18(1), 110–119. <http://doi.org/10.1002/j.1532-2149.2013.00354.x>
- Rakha, M. A. (2004). On the Moore–Penrose generalized inverse matrix. *Applied Mathematics and Computation*, 158(1), 185–200. <http://doi.org/10.1016/j.amc.2003.09.004>
- Rantala, J., Salminen, K., Raisamo, R., & Surakka, V. (2013). Touch gestures in communicating emotional intention via vibrotactile stimulation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 71(6), 679–690. <http://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2013.02.004>
- Ring, L., Barry, B., Totzke, K., & Bickmore, T. (2013). Addressing loneliness and isolation in older adults: Proactive affective agents provide better support. *Proceedings - 2013 Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction, ACII 2013*, 61–66. <http://doi.org/10.1109/ACII.2013.17>
- Roux, S., Fénot, M., Lalizel, G., Brizzi, L.-E., & Dorignac, E. (2011). Experimental investigation of the flow and heat transfer of an impinging jet under acoustic excitation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(15-16), 3277–3290. <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.03.059>
- Russell, J. a. (1994). Is there universal recognition of emotion from facial expression? A review of the cross-cultural studies. *Psychological Bulletin*, 115(1), 102–41. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8202574>

- Russell, J. a., & Barrett, L. F. (1999). Core affect, prototypical emotional episodes, and other things called emotion: dissecting the elephant. *Journal of Personality and Social Psychology*, 76(5), 805–819. <http://doi.org/10.1037/0022-3514.76.5.805>
- Russell, J. A. (1978). Evidence of convergent validity on the dimensions of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*. US: American Psychological Association. <http://doi.org/10.1037/0022-3514.36.10.1152>
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39, 1161–1178.
- Russell, J., & Mehrabian, A. (1977). Evidence for a Three-Factor Theory of Emotions, 294, 273–294.
- Salminen, K., Surakka, V., Lylykangas, J., Raisamo, J., Saarinen, R., Raisamo, R., ... Evreinov, G. (2008). Emotional and behavioral responses to haptic stimulation. *Proceeding of the Twenty-Sixth Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '08*, 1555. <http://doi.org/10.1145/1357054.1357298>
- Sander, D., Grandjean, D., & Scherer, K. R. (2005). A systems approach to appraisal mechanisms in emotion. *Neural Networks*, 18(4), 317–352. <http://doi.org/10.1016/j.neunet.2005.03.001>
- Sariyanidi, E., Gunes, H., & Cavallaro, A. (2015). Automatic analysis of facial affect: A survey of registration, representation, and recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 37(6), 1113–1133. <http://doi.org/10.1109/TPAMI.2014.2366127>
- Sato, M., Hirata, Y., & Kawarada, H. (1992). Space interface device for artificial reality—SPIDAR. *Systems and Computers in Japan*, 23(12), 44–54. <http://doi.org/10.1002/scj.4690231204>
- Sayette, M. A., Cohn, J. F., Wertz, J. M., Perrott, M. A., & Parrott, D. J. (2001). A psychometric evaluation of the facial action coding system for assessing spontaneous expression. *Journal of Nonverbal Behavior*, 25(3), 167–185. <http://doi.org/10.1023/A:1010671109788>
- Scherer, K. (2003). Vocal communication of emotion: A review of research paradigms. *Speech Communication*, 40(1-2), 227–256. [http://doi.org/10.1016/S0167-6393\(02\)00084-5](http://doi.org/10.1016/S0167-6393(02)00084-5)
- Scherer, K. R. (1987). Toward a dynamic theory of emotion: The component process model of affective states. *Geneva Studies in Emotion and Communication*, 1(1), 1–98. <http://doi.org/10.1080/02699930902928969>
- Scherer, K. R. (1989). Vocal correlates of emotional arousal and affective disturbance. *Handbook of Social Psychophysiology*.
- Scherer, K. R. (2001). Appraisal considered as a process of multilevel sequential checking. *Appraisal Processes in Emotion: Theory, Methods, Research*, 92, 120.
- Scherer, K. R. (2005). What are emotions? And how can they be measured? *Social Science Information*, 44(4), 695–729.
- Scherer, K. R., Banse, R., Wallbott, H. G., & Goldbeck, T. (1991). Vocal cues in emotion encoding and decoding. *Motivation and Emotion*, 15(2), 123–148.
- Scherer, K. R., Bänziger, T., & Roesch, E. (2010). *A Blueprint for Affective Computing: A sourcebook and manual*. Oxford University Press.
- Scherer, K. R., & Peper, M. (2001). Psychological theories of emotion and neuropsychological research. *Handbook of Neuropsychology 2nd Edition*.
- Scherer, K. R., Scherer, K. R., & Ekman, P. (1984). On the nature and function of emotion: A component process approach. *Approaches to Emotion*, 2293, 317.
- Schröder, M. (2001). Emotional speech synthesis: A review. *Source*, 1(3), 2–5. <http://doi.org/10.1002/hyp.6973>

- Shackman, J. E., & Pollak, S. D. (2005). Experiential influences on multimodal perception of emotion. *Child Development*, 76(5), 1116–26. <http://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2005.00901.x>
- Shen, X., Fu, X., & Xuan, Y. (2010). Do different emotional valences have same effects on spatial attention? *Proceedings - 2010 6th International Conference on Natural Computation, ICNC 2010, 4(Icnc)*, 1989–1993. <http://doi.org/10.1109/ICNC.2010.5584720>
- Silvera-Tawil, D., Rye, D., & Velonaki, M. (2014). Interpretation of Social Touch on an Artificial Arm Covered with an EIT-based Sensitive Skin. *International Journal of Social Robotics*, 6(4), 489–505. <http://doi.org/10.1007/s12369-013-0223-x>
- Smith, J. D. (2005). Communicating Emotion Through a Haptic Link.
- Sodhi, R., Poupyrev, Glisson, M., & Israr, a. (2013). AIREAL: interactive tactile experiences in free air. *ACM Transactions on Graphics*, 32(4), 134. <http://doi.org/10.1145/2461912.2462007>
- Sourina, O., Wang, Q., & Nguyen, M. K. (2011). EEG-based ‘serious’ games and monitoring tools for pain management. *Studies in Health Technology and Informatics*, 163, 606–610. <http://doi.org/10.3233/978-1-60750-706-2-606>
- Tan, N., Clavel, C., Courgeon, M., & Martin, J.-C. (2010). Postural expressions of action tendencies. In *Proceedings of the 2nd international workshop on Social signal processing* (pp. 53–58).
- Tao, J., & Tan, T. (2005). Affective computing: A review. *Lecture Notes in Computer Science (including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3784 LNCS, 981–995. http://doi.org/10.1007/11573548_125
- Thayer, S. (1986). History and strategies of research on social touch. *Journal of Nonverbal Behavior*, 10(1), 12–28.
- Tsalamlal, M., Ouarti, N., & Ammi, M. (2013). Non-intrusive Haptic Interfaces: State-of-the Art Survey. In I. Oakley & S. Brewster (Eds.), *Haptic and Audio Interaction Design SE - 1* (Vol. 7989, pp. 1–9). Springer Berlin Heidelberg. http://doi.org/10.1007/978-3-642-41068-0_1
- Tsetserukou, D., & Neviarouskaya, A. (2010). World’s first wearable humanoid robot that augments our emotions. *Proceedings of the 1st Augmented Human International Conference on - AH '10*, 1–10. <http://doi.org/10.1145/1785455.1785463>
- Van Bezooijen, R. (1984). *Characteristics and recognizability of vocal expressions of emotion* (Vol. 5). Walter de Gruyter.
- Van den Stock, J., Righart, R., & de Gelder, B. (2007). Body expressions influence recognition of emotions in the face and voice. *Emotion*, 7(3), 487–494. <http://doi.org/10.1037/1528-3542.7.3.487>
- Vanderborght, B., Simut, R., Saldien, J., Pop, C., Rusu, A. S., Pintea, S., ... David, D. O. (2012). Using the social robot probot as a social story telling agent for children with ASD. *Interaction Studies*, 13(3), 348–372.
- Vidotto, G., & Padua, M. V. (2007). A general method for parameter estimation of averaging models, 2007, 1–2.
- Viegas, R. G., Oliveira, A. M., & Garriga-trillo, A. (2012). A Functional Model for the Integration of Gains and Losses under Risk: Implications for the Measurement of Subjective Value, 711–733.
- Wagner, J., Lingensfelder, F., André, E., & Kim, J. (2011). Exploring fusion methods for multimodal emotion recognition with missing data. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2(4), 206–218. <http://doi.org/10.1109/T-AFFC.2011.12>
- Wallbott, H. G. (1998). Bodily expression of emotion. *European Journal of Social Psychology*, 28(November 1997), 879–896. [http://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0992\(199811\)28:6<879::AID-EJSP901>3.0.CO;2-W](http://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0992(199811)28:6<879::AID-EJSP901>3.0.CO;2-W)

- Webb, B. W., & Ma, C.-F. (1995). Single-Phase Liquid Jet Impingement Heat Transfer. *Advances in Heat Transfer*, 26, 105–217. [http://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70296-X](http://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70296-X)
- Weiss, S. J., Wilson, P., & Hertenstein, M. J. (2000). The tactile context of a mother ' s caregiving : Implications for attachment of low birth weight infants , 23, 91–111.
- Whitcher, S. J., & Fisher, J. D. (1979). Multidimensional reaction to therapeutic touch in a hospital setting. *Journal of Personality and Social Psychology*, 37(1), 87–96. <http://doi.org/10.1037/0022-3514.37.1.87>
- Xia, L., Chen, C.-C., & Aggarwal, J. K. (2011). Human detection using depth information by Kinect. In *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2011 IEEE Computer Society Conference on* (pp. 15–22). <http://doi.org/10.1109/CVPRW.2011.5981811>
- Yohanan, S., & MacLean, K. E. (2011). The Role of Affective Touch in Human-Robot Interaction: Human Intent and Expectations in Touching the Haptic Creature. *International Journal of Social Robotics*, 4(2), 163–180. <http://doi.org/10.1007/s12369-011-0126-7>
- Zhao, W., Chellappa, R., Phillips, P. J., & Rosenfeld, a. (2003). Face recognition: A literature survey. *Acm Computing Surveys*, 35(4), 399–458. <http://doi.org/10.1145/954339.954342>
- Zhou, Z., Wan, H., Gao, S., & Peng, Q. (2005). A realistic force rendering algorithm for CyberGrasp. *Computer Aided Design and Computer Graphics, 2005. Ninth International Conference on*. <http://doi.org/10.1109/CAD-CG.2005.13>

ANNEXE A

Implémentation de l'interface haptique à jet d'air

Yassine Tsalamlal, Paul Issartel

1. LE SYSTEME ROBOTISE DU PROTOTYPE DE L'INTERFACE TACTILE JET D'AIR

L'interface haptique se compose de trois parties principales : La première partie est une structure robotique en série à trois degrés de liberté. Cette structure porte une buse d'air au niveau de l'effecteur terminal. Le bras manipulateur évolue dans un espace de travail à 2 degrés de liberté. L'effecteur terminal est asservi à la position de la main de l'utilisateur dans l'espace de travail. D'un point de vue conceptuel, la plateforme robotisée devait permettre le positionnement et l'orientation du jet d'air dans l'espace 3D. Cependant, pour simplifier la mise en œuvre du premier prototype, la version actuelle supporte seulement des mouvements horizontaux 2D (axes des X et Z).

La deuxième partie de l'interface permet le suivi de la position de la main de l'avant-bras de l'utilisateur. Il s'agit d'un système de vision par ordinateur qui est basé sur l'utilisation d'un capteur Kinect. La troisième partie du dispositif consiste à diffuser un jet d'air à travers une buse de soufflage. Le jet d'air est contrôlé en débit, grâce à un contrôleur de débit massique. En fonction des caractéristiques des données de stimulation, le jet d'air stimule l'opérateur humain en produisant une sensation de contact avec le bras d'un autre utilisateur dans le cas de la communication à distance. Bien que la structure robotisée se déplace dans l'espace 2D, il est possible de moduler l'intensité du jet d'air selon la distance de la buse.

1.1 STRUCTURE SUR BRAS ROBOTISE

Un robot manipulateur est une structure mécanique articulée (dotée de plusieurs degrés de liberté) constituée d'une succession de segments reliés en leurs extrémités par des articulations et capable de se mouvoir dans l'espace physique (également appelé espace opérationnel). Les différentes articulations sont commandées par des actionneurs, le plus souvent électriques ou pneumatiques pour de faibles charges, et hydrauliques dans le cas de charges plus élevées. Dans la plupart des cas, ces articulations effectuent des mouvements de rotation (liaison rotoïde) ou de translation (liaison prismatique). D'une manière générale, le résultat de l'algorithme de contrôle sera le positionnement et l'orientation de l'effecteur (cas du robot manipulateur) par rapport au socle du manipulateur. Contrôler des articulations en rotation présente plus de difficultés qu'en translation car la relation entre les commandes articulaires et la position dans l'espace est non linéaire (relations trigonométriques). Pour se déplacer et interagir dans un environnement, un robot est équipé de capteurs multiples. Les mesures obtenues permettent de construire des représentations de l'état du système et de l'environnement. La structure robotisée déplace la buse de soufflage selon les actions de l'utilisateur et les caractéristiques des données. La conception de la structure robotisée doit considérer des contraintes différentes. L'espace de travail disponible doit être approprié et suffisant. Pour notre application, la buse doit suivre le mouvement de la main ou le bras de l'utilisateur. Le mouvement principal de l'effecteur de fin correspond à une traduction horizontale (2 degrés de liberté) pour suivre le mouvement de la main et appliquer une stimulation sur le bras. Pour le premier

prototype, nous avons adopté une structure mécanique en série avec trois articulations rotatives. Cette configuration aborde les contraintes mentionnées ci-dessus. Elle est relativement simple à mettre en œuvre. Notre première approche consiste à concevoir un prototype pour valider la stratégie de stimulation proposée, la faisabilité, la simplicité et le coût matériel constituent des critères importants. Pour concevoir le prototype, nous avons utilisé un kit robotisé. Cette solution a été choisie pour la simplicité de l'assemblage des composants mécaniques et le contrôle des actionneurs. Le système robotique est constitué d'une structure mécanique de support, des servomoteurs et d'un système de commande. La structure mécanique est un bras manipulateur en série avec trois articulations rotatives. Le bras a été réalisé avec un kit robotique de type Bioloid [Robotis, 2012]. Cette solution a été retenue pour la simplicité de l'assemblage des composants ainsi que le contrôle simplifié des servomoteurs.

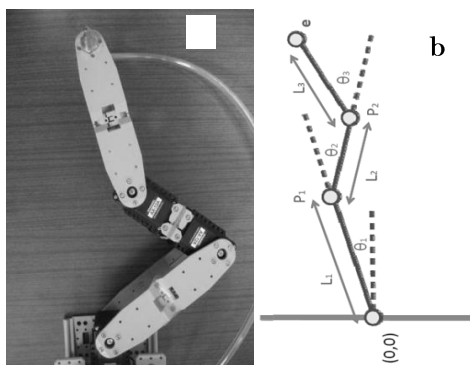


Figure 1 (a) : photographie de la structure robotique de l'interface proposée. (b) : Représentation géométrique de la structure robotique.

- CONTROLE

Comme présenté précédemment, l'effecteur terminal du robot doit être asservi à la position de la main de l'utilisateur dans l'espace de travail en exploitant les informations renvoyées par le capteur Kinect. Il s'agit donc d'un asservissement en position.

La situation de l'effecteur décrit la position et l'orientation de celui-ci par rapport à un repère choisi, et noté X_{ref} (vecteur des variables opérationnelles de référence). Le robot est positionné par l'intermédiaire du déplacement individuel des articulations qui sont décrites par le vecteur des variables articulaires (θ_{ref}). Lorsqu'on connaît la longueur des différents axes du manipulateur ainsi que les variables opérationnelles que l'on cherche à atteindre (x_{ref}), on peut établir les valeurs des variables articulaires correspondantes (θ_{ref}) à l'aide d'un modèle de géométrie du robot appelé modèle géométrique inverse ou transformateur de coordonnées inverse. Les variables articulaires constituent les signaux de commande (en position ou en vitesse) des asservissements individuels de chaque articulation. Chaque contrôleur d'articulation utilise un asservissement en position de l'actionneur concerné pour amener l'articulation dans l'état demandé. Le vecteur résultant θ de l'état des articulations est ainsi obtenu par une commande en boucle fermée de chaque axe selon le vecteur consigne (θ_{ref}).

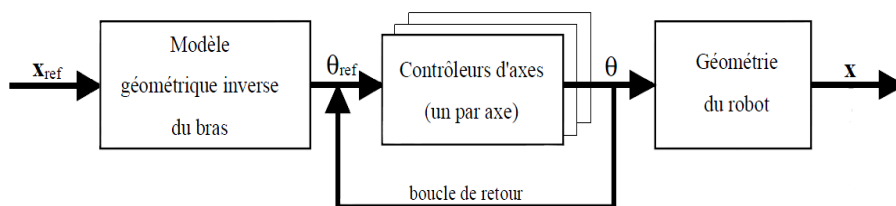


Figure 2 : Schéma bloc d'un asservissement en position d'un robot manipulateur.

La situation de l'effecteur du terminal est déterminée par la géométrie du robot (Aguilar, 2007) et (Korein & Badler, 1982). La commande en position de chaque articulation ne sera pas développée ici. En effet, les servomoteurs utilisés possèdent leur propre système de contrôle, ils sont considérés comme une boîte noire qui prend en entrée l'angle de consigne et en sortie la position actuelle pour permettre un suivi le plus réactif possible et de faibles erreurs dynamiques. Les vitesses et accélérations des servomoteurs sont mises à la limite maximum du matériel. La représentation en coordonnées cartésiennes est utilisée pour définir la position de l'effecteur terminal dans le plan (Figure 1). Le modèle géométrique direct d'un robot manipulateur est la fonction F qui permet d'exprimer la position de l'effecteur terminal du robot manipulateur en fonction de sa configuration géométrique.

$$X = F(\theta) \quad \text{Équation 5}$$

Le modèle cinématique direct permet de calculer le torseur cinématique à partir des vitesses généralisées en utilisant la matrice jacobéenne J (Aguilar, 2007) (Goldenberg, Benhabib, & Fenton, 1985):

$$\Delta X = J \Delta \theta \quad \text{Équation 6}$$

Sur la base du modèle cinématique du robot et des contraintes à appliquer sur l'effecteur terminal, il a fallu étudier et proposer un algorithme pour la commande des actionneurs articulaires. La commande de la structure robotique est principalement un problème de cinématique inverse. La cinématique inverse revient à obtenir la posture angulaire de la chaîne cinématique avec la position de l'effecteur par une fonction explicite. Ceci revient à calculer θ en fonction de X . En cinématique directe, il n'existe qu'une seule position dans l'espace pour une posture donnée. Cependant, plusieurs postures peuvent donner la même position dans l'espace de l'effecteur final. En effet, on utilise l'espace des angles qui a une dimension n pour définir une position dans l'espace cartésien qui est de dimension 3, n étant en général supérieur à 3. C'est pour cela que l'on ne peut pas définir g comme étant f^{-1} : la fonction f n'est pas bijective. En cinématique inverse, comme il peut exister plusieurs postures pour une même position X de l'effecteur final, il faut définir une solution unique sur la base de critères à définir.

$$\theta = G(X) \quad \text{Équation 7}$$

Le problème de cinématique inverse peut être résolu par deux approches différentes : la première est analytique et la deuxième itérative (Ge, 2000). Disposant d'un système relativement simple (3 degrés de liberté), la première solution semble être la plus optimale car moins coûteuse en temps de calcul. Cependant, elle ne résout pas le problème de la commande pour les positions singulières, par exemple, si la main de l'utilisateur se trouve en dehors de l'espace atteignable par le robot. C'est pourquoi l'approche itérative a été retenue. Elle a l'avantage de générer une solution unique dans l'espace des solutions et de fournir des mouvements fluides et réactifs.

La méthode de contrôle appliquée est la commande par jacobéenne. Cet algorithme permet d'obtenir une relation entre un petit déplacement ΔX de l'effecteur terminal et une petite variation de posture $\Delta \theta$ par la relation (Équation 8). Cette relation est celle qui minimise l'incrément de posture, parmi les solutions possibles, à l'inversion de la relation.

$$\Delta \theta = J^{-1} \Delta X \quad \text{Équation 8}$$

Le principal inconvénient de cette méthode est l'utilisation de l'inverse de la matrice jacobéenne qui présente un problème de calcul lorsque le nombre de lignes est inférieur au nombre de colonnes. Pour contourner ce problème, on utilise l'inversion de Moore-Penrose (Penrose & Todd, 1955; Rakha, 2004) ou pseudo-inverse, Notée :

$$J^* = J^T \cdot (J^T \cdot J)^{-1} \quad \text{Équation 9}$$

À partir de l'équation 5, on peut obtenir la loi de commande suivante :

$$\Delta\theta = J^* \Delta X \quad \text{Équation 10}$$

L'algorithme de commande a ensuite été modifié afin de tenir compte des contraintes articulaires imposées par la structure mécanique (Équation 10). Les résultats de l'implémentation de la commande sont très satisfaisants. En effet, l'asservissement en position est d'une bonne précision avec une erreur statique moyenne de 1mm. Le temps de calcul est très faible. Les mouvements générés sont relativement stables et fluides. Ces résultats ont été validés par des tests pilotes avec quelques utilisateurs. Les principaux problèmes rencontrés sont dus à la qualité du matériel (kit robotique). En effet, même si ce dernier offre une grande souplesse d'utilisation, la structure mécanique et les servomoteurs ne sont pas adaptés aux applications hautement dynamiques.

1.2 LE SYSTEME DE VISION PAR ORDINATEUR

Le rôle du système de vision par ordinateur permet de contrôler et de calculer la position de la main ou du bras de l'utilisateur. Notre système est basé sur un capteur Kinect placé au-dessus de l'espace de travail. La Kinect fournit une carte de profondeur de la scène. Avec ces informations, il est possible de déterminer la position et l'orientation de la main dans trois axes. La raison principale du choix de la Kinect est son rapport qualité/prix. Aujourd'hui, beaucoup de projets de visions informatiques sont basés sur le capteur Kinect. Cependant, la plupart de ces travaux traitent la reconstruction 3D (Izadi et al., 2011), ou la détection de membres ou de silhouettes entières (Xia, Chen, & Aggarwal, 2011). Quelques études traitent la main suivie à la trace seulement dans l'image. C'est souvent la position des doigts qui est recherchée (Frati & Prattichizzo, 2011). Il était nécessaire de concevoir un algorithme approprié pour l'application. Pour la première version de l'algorithme, un certain nombre de contraintes a été adopté. L'espace de travail est placé dans la gamme de travail du capteur Kinect. Seulement le bras et la main peuvent entrer dans un espace de travail défini. L'inclinaison de la main quant au plan de travail doit être moins de 45 °.

Le système de tracking exploite la librairie OpenCV spécialisée dans l'analyse d'images en temps réel [OpenCV]. Le diagramme suivant (Figure 9) représente les différentes étapes du fonctionnement de l'algorithme proposé :

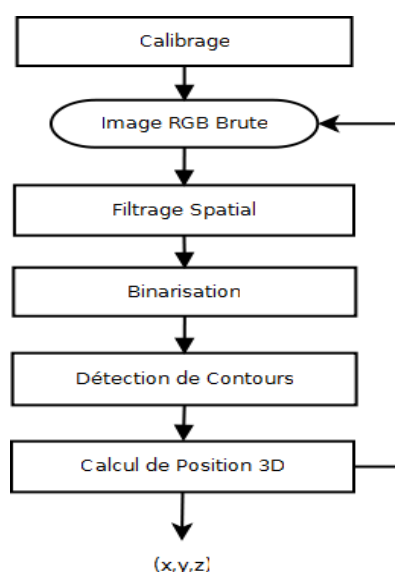


Figure 3 : Algorithme de suivi de la main.

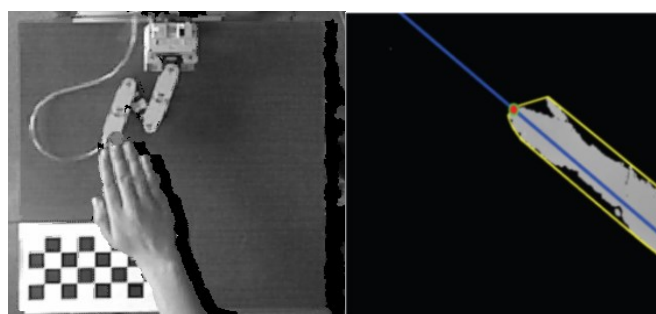
La première étape du tracking consiste à récupérer l'image de profondeur que fournit la caméra Kinect. Cette image est convertie dans le format d'OpenCV pour la suite du traitement. L'image renvoyée par la caméra de profondeur représente la distance de chaque pixel par rapport à la position de la caméra. Ces valeurs sont exprimées dans une unité arbitraire (non linéaire). Par ailleurs, elles ne tiennent pas compte de la courbure causée par l'optique de la Kinect, ce qui fausse les calculs de distances lorsqu'ils sont effectués directement sur l'image.

Le traitement commence par un calibrage de l'image afin d'assurer un suivi de la main avec une précision satisfaisante, il faut donc appliquer à l'image de profondeur RGB une transformation de calibrage. Cette transformation aura également pour rôle de convertir les valeurs de profondeur en mètres.

Sur la base de la carte de profondeur calibrée, nous appliquons un filtrage spatial pour isoler la main de l'utilisateur du reste de l'environnement. Seuls les objets se trouvant au-dessus de la structure robotique sont gardés. Cette opération permet de délimiter la zone de traitement.

Sur la base de l'image filtrée, une opération de binarisation est appliquée pour indiquer les zones de l'image auxquelles il faudra s'intéresser.

L'étape suivante consiste à vérifier si l'un des objets visibles sur le masque binaire présente les caractéristiques d'un bras humain. Cette étape est réalisée grâce à une opération de détection de contours.



(a) Image RGB Brute. (b) Image traitée.

Figure 4 : Application de l'algorithme de tracking : le point rouge représente la détection de l'extrémité de la main.

Cet algorithme peut fournir un résultat satisfaisant si l'image obtenue par la caméra présente certaines caractéristiques. En effet, la main et le bras de l'utilisateur doivent se trouver dans une zone bien définie pour être détectables, et un seul membre à la fois doit être visible dans l'image. Le système de tracking renvoi la position de la main sur l'espace de travail avec une fréquence de 30 fps. L'erreur moyenne sur le calcul de cette position est de 4mm.

6.5 INTEGRATION DU DISPOSITIF

La plateforme globale consiste en l'assemblage des trois systèmes et la conception du framework logiciel. D'abord, la buse d'air est accrochée au bras robotisé. La structure est fixée sur une table qui représente la surface de l'espace de travail. Le capteur Kinect doit être au-dessus de la main de l'utilisateur, dont il est attaché au support métallique à 1m de hauteur. Nous avons développé le logiciel en C/C++ pour contrôler le dispositif. L'interface logicielle fournit l'accès à deux niveaux de contrôle : les paramètres des entrées/sorties des fonctions de haut niveau. Ce mode permet la mise en œuvre de caractéristiques haptiques de haut niveau, comme la production de surfaces haptiques avec

une description simple de coordonnées de plan. Le deuxième niveau fournit les fonctions entrées/sorties de haut/bas niveau, comme le contrôle de la position de la buse ou le débit d'air.

ANNEXE B

Mesure de la distribution de pression d'un jet d'air impactant une surface plane

Yacine Tsalamlal, Marc Lema, Foriment Geuniat

1. EQUATIONS DU PROBLEME

1.1 NAVIER-STOKES

Notre étude s'appuie sur les équations de la mécanique des fluides, notamment l'Equation de Navier-Stokes :

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \nabla \cdot T + \rho f$$

Où :

- ρ représente la masse volumique du fluide ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$) ;
- v représente la vitesse de l'écoulement ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) ;
- T représente les contraintes visqueuses (Pa) ;
- f représente les efforts volumiques extérieurs ($\text{N} \cdot \text{Kg}^{-1}$) ;
- p désigne la pression (Pa).

Nos hypothèses :

1. Il n'y a pas de forces volumiques extérieures, on peut donc négliger la pesanteur, donc $f = 0$.
2. Il n'y a pas de forces surfaciques extérieures, donc pas de contraintes extérieur, d'où $T = 0$.
3. Fluide incompressible, donc ρ est constante.

En résumé, nous posons l'hypothèse que nous avons un **fluide « parfait » incompressible en régime permanent**.

Notre équation de Navier-Stokes peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p$$

C'est l'équation d'Euler. On a donc une relation directe entre la variation de la vitesse et le gradient de pression.

1.2 LE THEOREME BERNOULLI

Le capteur différentiel que nous utilisons fonctionne sous le principe établi par Bernoulli, en effet, le théorème de Bernoulli permet d'avoir une relation directe entre la vitesse et la pression dynamique que l'on mesure grâce à notre capteur.⁷

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p_s = p_t \quad \text{d'où} \quad v^2 = \frac{2(p_t - p_s)}{\rho}$$

v représente la vitesse de l'écoulement ($m.s^{-1}$) ;

ρ représente la masse volumique du fluide ($Kg.m^{-3}$) ;

p_s désigne la pression statique ou pression atmosphérique (Pa) ;

p_t représente la pression totale (Pa) ;

2. LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

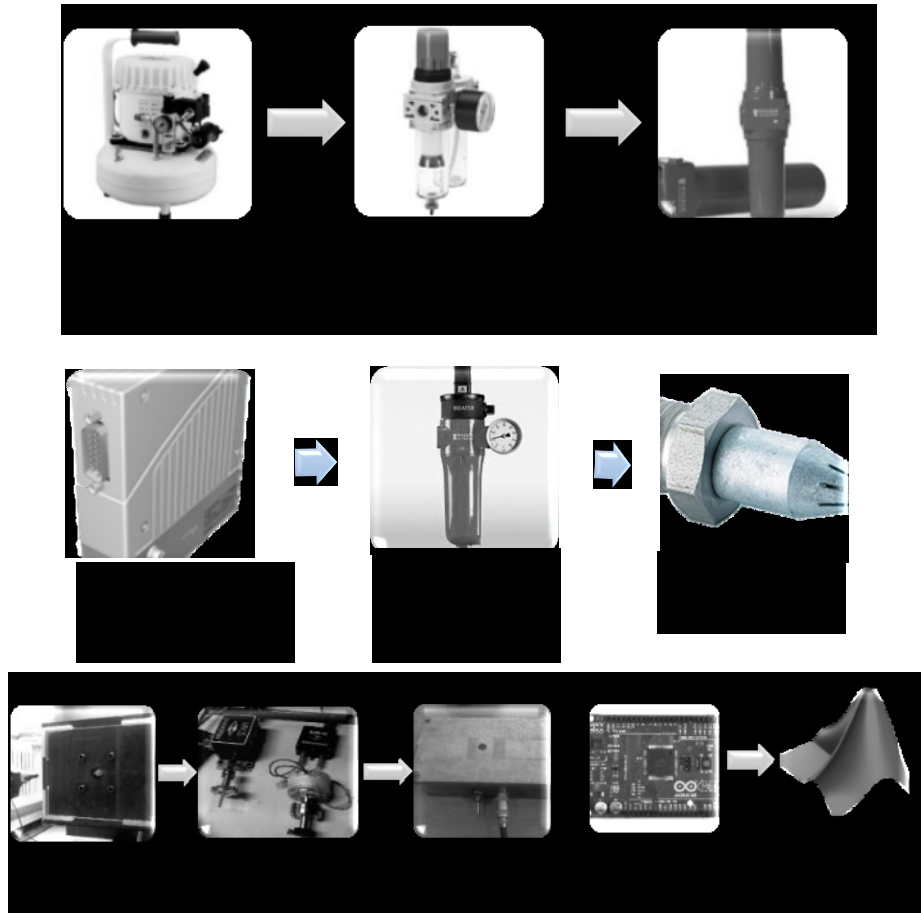


Figure 1 : Banc expérimental.

- Plaque de plexis percée en son centre d'un trou de diamètre 1 mm (dimensions 140*160*10 mm) ;
- Disque de PMMA (Poly -Methyl MethAcrylate) percé de six trous (Rayon de 40 mm) ;
- Pavé de viande de bœuf de dimension similaire au PMMA
- Buse SILVENT MJ50;
- Compresseur silencieux 9L MECAFER ;
- Filtre à air FESTO LFR-D-5M-MIDI-A ;
- Filtre à Huile WALKER FILTRATION (voir fiche technique) ;
- Filtre à air et réchauffeur d'air WALKER FILTRATION (voir fiche technique) ;
- Banc de déplacement triaxial ;
- Capteurs de pression différentielle MKS-BARATRON 698A ;
- Capteur de pression non-différentiel MKS-BARATRON 617A;
- 2 conditionneurs de signaux MKS 270C et MKS 270D ;

- Utilisation d'une imprimante 3D MakerBot – Replicator 2 et d'une imprimante laser Epilog Laser – Mini 24.

3. LISTE DES VARIABLES

Les variables que nous prendrons en compte sont les suivantes :

- La distance, d , entre la buse et la plaque de plexis; cette distance variera entre 6 et 30 cm environ ;
- Le débit du jet d'air D , en pourcentage du débit maximal.

Il faut noter que nous devons faire attention aux conditions ambiantes, notamment la pression ainsi que la température ambiante susceptible d'influencer nos mesures. (*Ce sont des facteurs à contrôler*).

Nous ferons nos mesures suivant deux axes (Figure 2) :

- L'axe perpendiculaire à la paroi (axe x) : sur laquelle nous observerons l'évolution de la pression lorsque l'on éloigne la buse de la plaque trouée (à 30 cm maximum, avec un pas de 5 cm) ;
- L'axe y , dans le plan de la plaque trouée, avec un pas de 5 mm

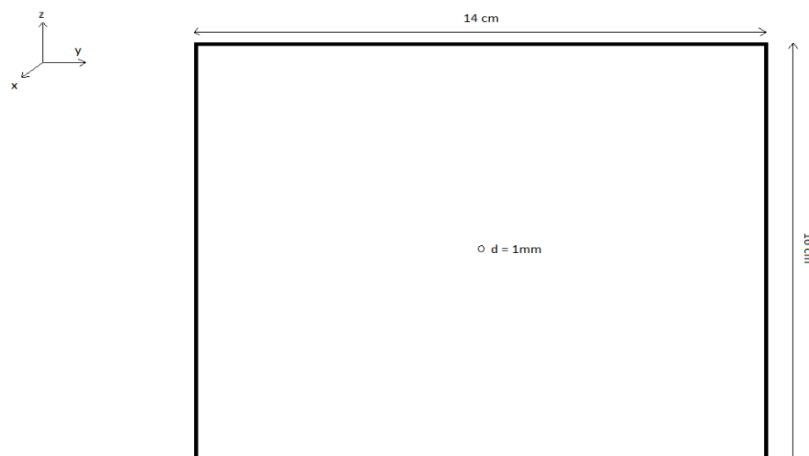


Figure 2 : Illustration de la plaque de plexis trouée.

3.1 CALCUL DE LA VITESSE A PARTIR DU DEBIT MAXIMAL

Le débit massique maximal du compresseur est tel que :

$$D_m = 50 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3} \approx 8.33 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Le diamètre de l'orifice de la buse est de 2 mm, ainsi on en déduit la vitesse maximale du jet d'air en sortie de buse :

$$V_{max} = \frac{8.33 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 10^{-6}} = 2.65 \cdot 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

3.2 LE NOMBRE DE REYNOLDS

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

Où :

- V représente la vitesse caractéristique du fluide ($m.s^{-1}$) ;
- L dimension caractéristique (m) ;
- ν est la viscosité cinématique du fluide ($m^2.s^{-1}$), valeur choisie pour une température de $25^{\circ}C$;

Dans notre cas :

$$Re = \frac{265 * 0.3}{15.6.10^{-6}} \approx 5.1.10^6$$

=> Ecoulement turbulent lorsque l'on est à 100% de Débit.

4. STRUCTURE DYNAMIQUE DU JET D'AIR IMPACTANT SUR UNE PAROI

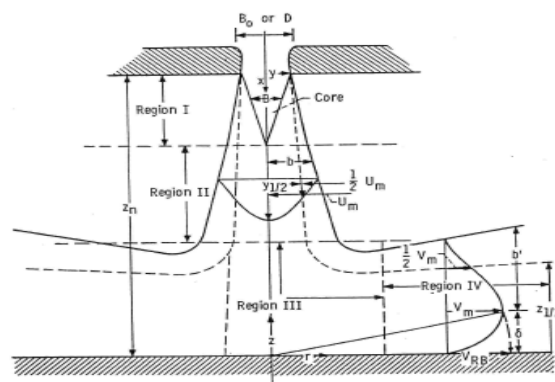


Figure 3 : Structure du jet d'air en sortie d'une buse et impactant une paroi.

Région I : de l'orifice d'injection à l'extrémité du cône potentiel ;

Région II : affaiblissement de la vitesse sur l'axe et l'épanouissement du jet ;

Région III : la région de déflexion ;

Région IV : la région du jet où la vitesse est principalement perpendiculaire à la paroi.

5. PROBLEMES RENCONTRES ET SOLUTIONS

5.1 ALIGNEMENT BUSE/PLAQUE

Le problème le plus important que nous avons rencontré lors de cette expérience était d'aligner la buse (dont l'orifice est de 2 mm de diamètre) à la plaque de plexis troué avec un trou de 1 mm de diamètre.

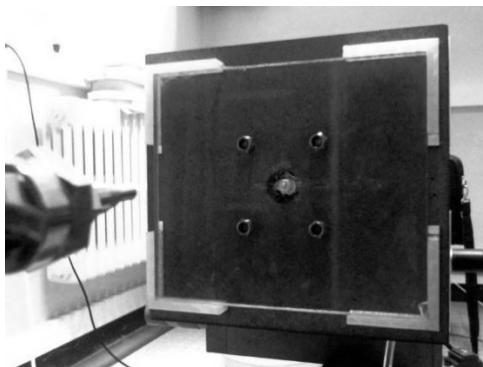


Figure 4 : Buse émettant un jet d'air en direction d'une plaque de plexis trouée en son centre.

Il fallait donc une structure permettant de maintenir la plaque perpendiculaire à la buse, réciproquement pour la buse afin de s'assurer de leur alignement.

Pour maintenir la plaque, nous avons modélisé une structure en découpant à l'imprimante laser des plaques de MDF et conçu des encoches, à l'aide d'une imprimante laser, dans lesquelles nous avons encastré la plaque de plexis (voir Figure 4). De même, pour maintenir la buse, nous avons modélisé un support à l'aide de l'imprimante laser (voir Figure 5).

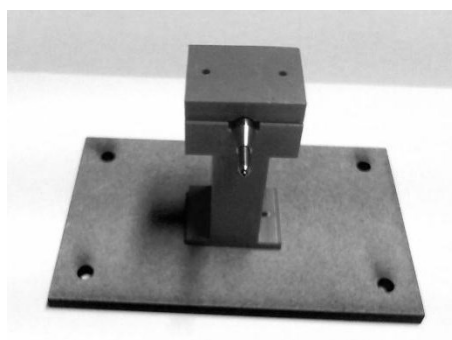


Figure 5 : Support de la buse.

6. FLUCTUATIONS DES VALEURS DE PRESSION

Un autre problème que nous avons rencontré concernait la variation des valeurs de pression affichées par notre amplificateur de signal, ainsi nous l'avons connecté à un filtre passe-bas qui nous a permis d'avoir des valeurs moyennées. Nous avons connecté ensuite notre filtre passe-bas à une carte Arduino qui à son tour était connectée à un ordinateur sur lequel un programme Matlab nous permet de recueillir les données de pression.

7. RESULTATS

Par symétrie par rapport à l'axe x perpendiculaire à la paroi x , il a suffi de prendre des mesures sur une partie des axes x et y . D'après la littérature, la distribution de pression au niveau d'une plaque a la forme d'une gaussienne.

Les résultats obtenus montrent en effet une évolution sous forme de Gaussienne, comme on pouvait le prévoir. Nous avons fait ces mesures pour $6\text{cm} \leq \Delta x \leq 30\text{cm}$ et $0 \leq Y \leq 7\text{cm}$. En prenant un maillage plus fin au voisinage de l'orifice (avec un pas de 0.25 cm) puis en ayant un maillage plus grossier au-delà de $Y = 5\text{cm}$ (pas de 0.5cm).

D'un point de vue théorique, la pression moyenne doit suivre une répartition de type gaussienne (équation 4).

$$P_{rom}(y) = P_{off} + P_{max} * \sigma \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp - \frac{(y-y_0)^2}{2y_*} \quad \text{Équation 1}$$

En utilisant un capteur mobile de pression implanté sur une surface plane, nous avons fait varier 3 paramètres :

X : la distance entre la buse de soufflage et la plaque.

Y : la distance entre le capteur et l'axe de la buse de soufflage.

D : le débit en sortie de buse.

P_{off} : Offset de pression.

y_0 : L'écart au centre.

Une valeur moyenne de l'offset de pression est décrite par P_{off} . Avec $P_{off}(x) = 0.37 \pm 0.02$. L'écart au centre est visiblement indépendant du débit, et dépend linéairement de la distance buse/plaque x : $y_0(x) = a_0x + b_0$. Il y a clairement un défaut d'alignement (Figure 7).

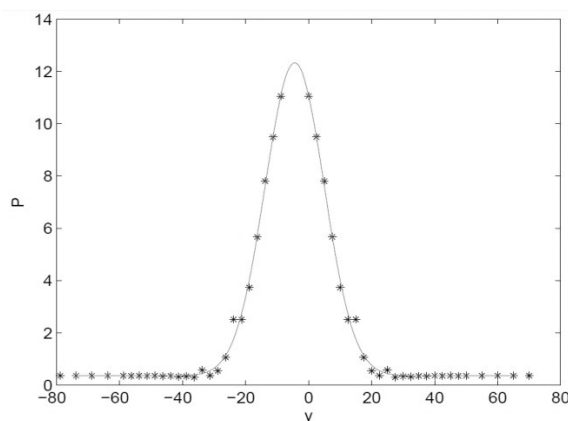


Figure 7 : Exemple du modèle (courbe rouge) sur un jeu de données (étoiles noires), pour une distance x et un débit D fixés. Les données sont symétrisées.

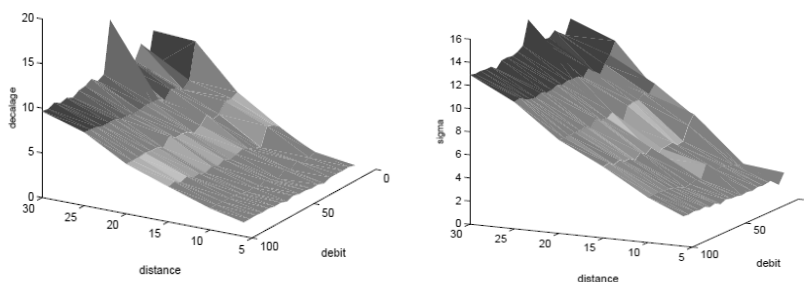


Figure 8 : Écart au centre Largeur de la gaussienne

L'identification s'est faite par régression linéaire. Les coefficients identifiés sont: $a_0 = -1.53 \pm 0.82$, $b_0 = 0.37 \pm 0.05$. Le défaut d'alignement est de l'ordre de $\approx 20^\circ$. Concernant la largeur de la gaussienne $y_*(x) = a_*x + b_*$: Les données semblent très peu dépendantes du débit, comme on peut le remarquer sur la figure 4. La buse est en effet spéciale. Le modèle de buse est effectivement conçu pour que le cône du jet d'air (i.e. la largeur de la gaussienne) soit relativement indépendant du débit. Le cône ne varie pas en théorie lorsque l'on s'éloigne du jet d'air. Un modèle linéaire en x est donc

recherché, du type : $y_*(x) = a_*x + b_*$. L'identification s'est faite par régression linéaire. Les coefficients identifiés sont $a_0 = 0.46 \pm 0.02$, $b_0 = 0.79 \pm 0.36$.

Maxima de Pression P_{max} : L'énergie est conservée, i.e. la pression intégrée sur la surface doit diminuer en puissance cubique de x . La largeur linéairement dépendante de la distance en x , le maxima doit a priori varier quadratiquement en x . L'énergie varie linéairement avec le débit. Il paraît naturel de supposer que la pression maximale varie donc également linéairement selon le débit D . Le modèle proposé est alors de la forme :

$$P_{max}(x, D) = P_{0max} + C_{max}(x - x_{0max})^2(D - D_{0max})$$

L'identification se fait par régression non-linéaire. Les coefficients identifiés sont :

$$P_{0max} = 4.42 \cdot 10^{-3} \text{ quasi nulle comme attendu;}$$

$$C_{max} = 5.25$$

$$x_{0max} = 1.65$$

$$D_{0max} = 12.2$$

Le modèle s'accorde bien avec les données, voir Figure 6.

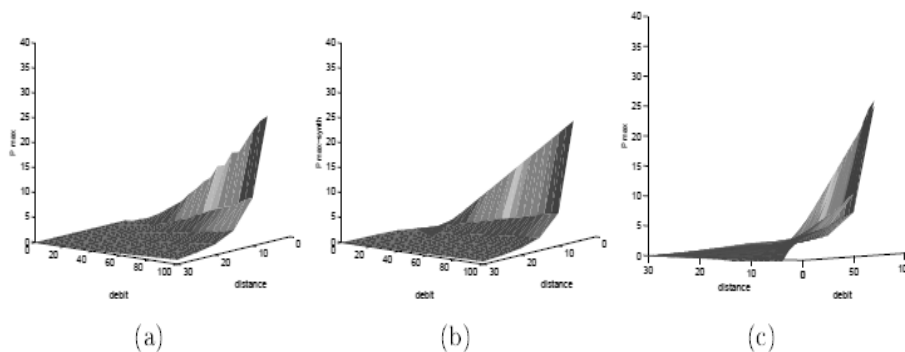


Figure 5: (a): données, (b) modèle, (c) comparaison.

Affective Communication through Air Jet Stimulation: Evidence from Events-Related Potentials

M.Y. Tsalamlal, W. Rizer, J-C. Martin, M. Ammi, M. Ziat

Abstract— Recently, research has shown the relevance of communicating affective messages through touch. This paper investigates temporal processing parameters of air jet stimulation strategy using events-related potentials. More specifically, we asked the participants to rate the valence of air jet tactile stimulation of the forearm while being exposed to facial expressions (Happy, Angry, Neutral). Our results are promising and show that this stimulation technique could be efficient in activating skin receptors that play an important role in social and affective behaviours. Particularly, we found significant differences between the different facial expressions for the same tactile air jet intensity levels in the somatosensory area. Moreover, participants' pleasantness ratings exhibit a cross-modal effect of visual stimuli on the difference tactile conditions that correspond to the intensity of the air jet stimulation (low, medium, high).

Index Terms— tactile, air jet, facial expression, emotion, EEG, ERPs

1 INTRODUCTION

The role of affective communication in human development and in everyday interactions had been demonstrated by previous research [1]–[3]. People communicate emotions through both non-verbal cues, such as facial expressions and gestures, and verbal cues such as language [4]. In recent years, there has been a growing interest in the development of technology that could communicate affective messages. Such technology might allow remote interpersonal affective communication or enhance human-robot social interactions [5]–[7]. Many efforts have been made to design systems capable of recognizing and displaying visual[8]–[14] and audio [15]–[24] streams. Some researchers took a step further by proposing multimodal mediated communication systems that are capable of recognizing or displaying affective cues through multiple channels of communication[25]–[36]. Contrary to visual and audio channels, the haptic channel has received less attention in this research area because affective haptic communication systems and interaction models are more challenging to design. Touch is a complex channel of communication and very context dependent, making its experimental measurement and analyses tedious to be achieved [37]–[39]. However, recent studies demonstrated the high potential of touch for affective communication. Herten-

stein et al. [40], [41] showed that people are able to discriminate different categories of emotions on the basis of how they are touched by someone (contact area, force intensity, etc.). The recognition rates for some specific tactile emotional stimuli were as high as those obtained for the visual modality. Furthermore, a series of neurophysiologic studies demonstrated that human skin contains receptors that directly generate hedonic values [42].

Both tactile [43]–[44] and kinaesthetic [45] feedback were used as potential medium for social and affective interactions between humans and autonomous agents such as social robots [46]–[49]. However, since touch is a complex communication modality, the critical issue is related to the design of systems and stimulation strategies that can lead to perceptual experiences similar to those from human-human interaction. To address this matter, some studies used psychological evaluation techniques, such as the subjective ratings of emotional dimensions regarding haptic cues [50]–[52], which provides general information on the user's perception.

Recently, we designed of novel haptic interface based on air jet stimulation [53]– [54] that could be integrated in multimodal mediated affective communications system. Air jet technology has the capability to elicit positive hedonic perceptions and can generate low amplitude forces, which more efficient for stimulating mechanoreceptors involved in tactile affective communication [55], [56]. Furthermore, the device does not require any physical contact with the participant and can stimulate different locations and areas of the body. In this paper, we investigate

- M. Y. Tsalamlal, J-C. Martin and M. Ammi are with LIMSI-CNRS, Université Paris-Sud, and Université Paris-Saclay, 91405 Orsay Cedex, France. E-mail: <name>@limsi.fr.
- M. Ziat and W. Rizer are with the psychology department of Northern Michigan University. E-mail: <name>@nmu.edu.

whether air jet stimulation can trigger emotional event-related potential (ERP) responses in the context of distal social interaction. Specifically, when combined the tactile stimulation with facial expressions. The objective is to determine the features of air jet stimulation that is suitable for visio-haptic affect perception. The present study employed the mentioned tactile device and ERPs to examine the influence of emotional facial expressions on the processing of tactile stimuli. We expected ERPs to be larger when touch is associated with emotional context emotional as opposed to neutral pictures such as houses. We also reported subjective evaluation of pleasantness of air jet tactile stimuli during the bimodal stimulation.

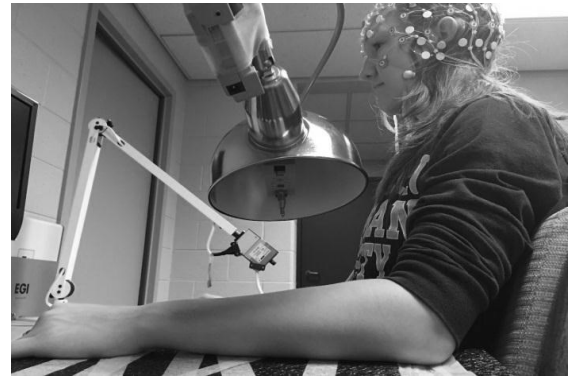
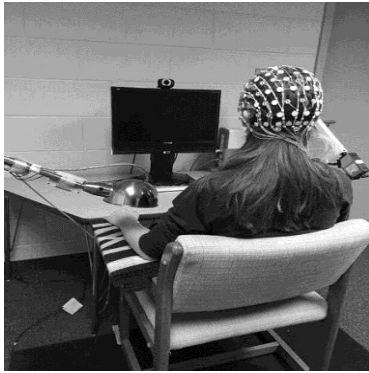


Fig. 1. The participant with an EEG net in front of the screen with the arm laid on a support. The picture on the right shows the air nozzle placed above the forearm of the participant. The figure on the left gave an overview of the experimental setup.

2 RELATED WORK

2.1 Facial expressions

The communication of emotions through facial expression has been widely studied and was demonstrated through numerous perceptive studies [57]-[69]. Research showed that humans are capable of discriminating at least six distinct emotions. The pioneer studies led by Ekman and colleagues [57]-[58] highlighted the existence of prototypical facial expressions supporting the communication of basic emotions (surprise, anger, disgust, enjoyment, fear, sadness) that seems to be constant through different cultures [59]-[60]. Regarding the significance role of facial expressions in the communication of emotions, neuroscience researchers, investigating the perception of emotional facial expressions and their neural correlates, showed that the initial perceptual processing of pictures of prototypical emotional faces takes place in inferior occipital cortex [61] [62]. The middle fusiform gyrus seems to be involved in structural properties of faces which determine face identity [63]-[64]; while the processing of dynamic facial expressions activates the superior temporal sulcus area [65]. A rapid evaluation of the emotional and motivational significance of facial expressions appears to be mediated by the amygdala and orbitofrontal cortex, while structures such as the anterior cingulate, prefrontal cortex and somatosensory areas are linked to the conscious representation of emotional facial expressions for the strategic control of

thought and action, as well as to the production of concomitant feeling states [66]. By combining high-density EEG recordings and source localization analyses, several recent studies have reported systematically different ERP modulations in response to different emotional expressions [67]-[68]. However, the question on whether different emotional facial expressions give rise to specific ERP components such as the magnitude, duration and onset latencies remains open [69].

2.2 Emotional Touch

During day-to-day interpersonal communication, touch is used along with other modalities to convey affective messages [4]. Unlike facial expressions, the communicative aspect of touch using haptic technologies has received much less attention. However, recent research showed that touch can be very effective to communicate some distinct emotions [38] and appears to require a specific set of patterns to communicate specific emotions [40]-[41]. Recent studies support the involvement of C-tactile (CT) afferents in tactile affective communication. These nerves are present in hairy skin and project to the insular cortex [70]-[42]. CT are stimulated by light and gentle touch triggering pleasant sensations that are important components of social interaction and could play a central role in forming and maintaining social bonds. While CT-afferents respond to gentle and slow touch, they are not good indicators in discriminating touch locations [71]. fMRI studies also revealed that areas involved in social perception and social cognition, including the right posterior superior temporal sulcus and the medial prefrontal cortex (mPFC)/dorso anterior cingulate cortex (dACC) are also related to CT activation [42]. To obtain more evidence of the existence of CT-afferents, Ackerley et al. examined the temporal parameters of emotional processing during gentle arm stimulation using EEG technique [72]. The study showed a late cortical potential over frontal electrodes, around 700 ms after the stimulus onset that was associated to a slow and gentle brush stroke and could be associated to CT-afferents activation.

In the context of mediated affective communication, some studies [52], [74], [86] evaluated the subjective ratings of emotional dimensions regarding multimodal stimuli. The general conclusion is that congruent facial expression-tactile information facilitates behavioural reactions to emotional stimuli. These studies and others [75] have provided important information about the expression and perception of tactile affective cues. Yet, none of these studies assessed the process underlying the combination of face and touch information in the course of emotional processing.

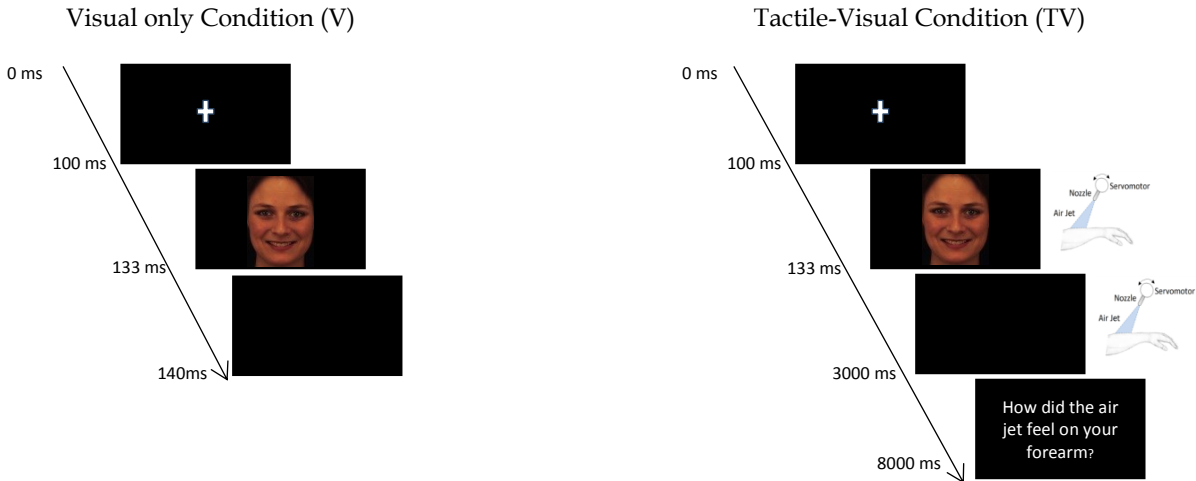


Fig. 2. Timeline of Visual (V) only and Tactile-Visual (T-V) conditions. In V, faces were presented alone. In T-V condition stimuli presentation started with the presentation of a crosshair on a black background for 100ms. V lasted 33ms followed by a black screen. The air jet tactile stimulus was delivered simultaneously and lasted 3 seconds.

In the current study, we examined ERP responses during an air jet tactile stimulation presented simultaneously with facial expressions. Beyond providing fundamental information, the study should help the design of a haptic interface for multimodal mediated affective communication.

3 METHODS

3.1 Participants

Nineteen Northern Michigan University students aged between 18 to 28 years ($M=21.5$, $SD=3.6$) participated in the experiment. Fourteen participants stated that they were right handed. Participants were informed of experimental procedures and gave informed consent before participation. They all received extra credit course for their participation and the Institutional Review Board approved the experimental protocol.

3.2 Apparatus

The apparatus was composed of three main elements: 1) the air jet system that provided tactile stimulation, 2) a computer screen that displayed facial expressions, and 3) EEG system that measured ERPs to the stimuli.

The tactile stimulus was delivered using an air jet system composed of an air nozzle SILVENT MJ4 that diffuses the air; a servomotor that controls the movement of the air nozzle; and an air compressor with mass flow regulator.

Figure 1b shows the nozzle attached the motor that can move along the forearm. The mass flow controller accurately regulated the flow rate of the outlet air jet (MFC Bukert 8711, up to $50\text{l}/\text{min} \pm 0.02$) with the air compressor providing sufficient air pressure to the system (4 bars). Static facial expressions (see section 3.4) were displayed on a 23in HP Compaq LA2306x screen with a resolution of 1920×1080 at a distance of 60 cm from the participants.

EEG data was collected using EGI Net Amps 300 with HydroCel GSN 64 channels nets and Net Station 4.5.4 soft-

ware.

3.3 Stimuli and Experimental Design

The tactile stimulus (T) consisted of air jet tactile stimulation applied on the forearm. The controlled parameters were i) the intensity of the stimulus, which consists of the air jet flow rate, and ii) the movement velocity of the stimulus, which is the speed of the moving nozzle. Three types of tactile stimulus were presented to participants: 1) tactile stimulus of a high intensity level (T-HI), corresponding to a high flow rate ($50\text{nl}/\text{min}$ corresponding to blowing force of 0.682N) and a high movement velocity ($12\text{ rad}/\text{s}$), 2) tactile stimulus of a medium intensity level (T-ME), corresponding to a medium flow rate ($25\text{nl}/\text{min}$ corresponding to blowing force of 0.341) and a medium movement velocity $6\text{ rad}/\text{s}$, and 3) tactile stimulus of a low intensity level (T-LO), corresponding to a low flow rate ($7.5\text{nl}/\text{min}$ corresponding to blowing force of 0.172N) and a slow movement velocity ($0.6\text{ rad}/\text{s}$). These parameters were chosen from a previous study that identified air jet tactile features in relation to the perceived valence [73].

Visual stimuli (V) consisted four conditions of facial expression faces and house pictures. Three conditions were related to facial expressions: happy, angry and neutral. All faces were Caucasian female obtained from The Karolinska Directed Emotional Faces (KDEF) database [74]. The fourth condition, which was the control condition, con-

sisted of house images that were obtained from the Computational Vision at the California Institute of Technology archive of Pasadena houses [75] and resized to match face image sizes. The experimental design comprised twelve (16) T-V conditions (4 visual stimuli: Happy, Angry, Neutral, House * 4 tactile conditions: HI, ME, LO, None). A total of 30 trials were presented for each of the twelve conditions.

the 5-point Likert scale by pressing one of the five keys detailed earlier.

After the experiment, participants were asked to fill out the TACTYPE Instrument [76], and Big Five Inventory [77]. In TACTYPE questionnaire, 15 questions focus on the affective aspect of interpersonal touch behaviour in social situations, particularly in opposite-sex relationships. The Big Five Inventory was administered to examine if some per-

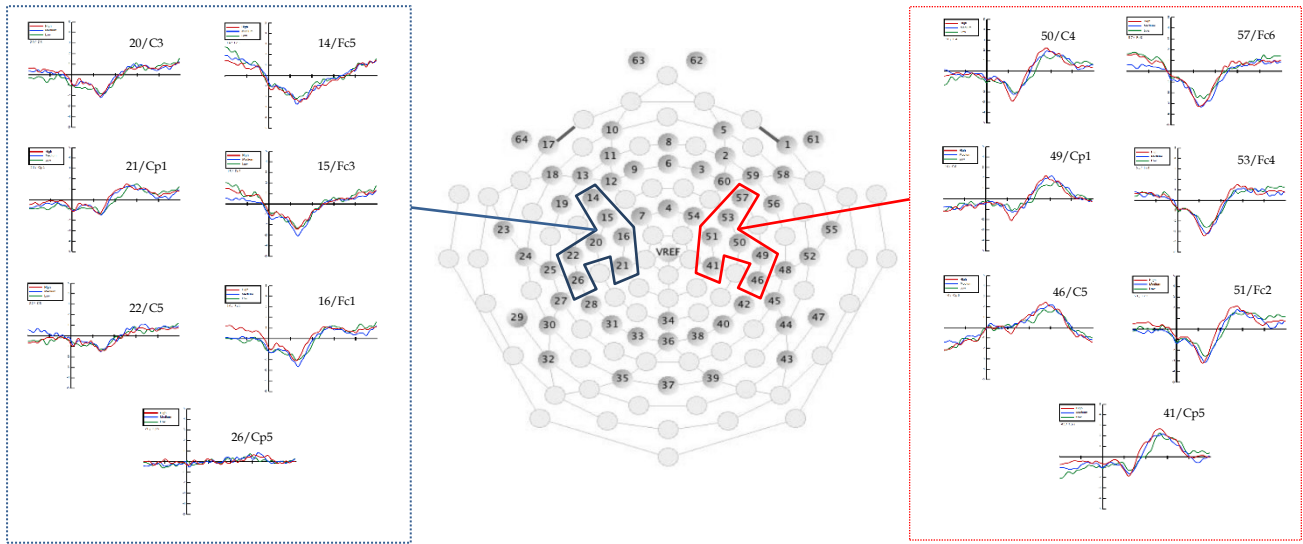


Fig. 3. EGI Net Amps 300 with HydroCel GSN 64 v1. The recorded electrodes are highlighted in red for lateral (right) hemisphere (41, 46, 49, 50, 51, 53, and 57) and in blue for contralateral (left) hemisphere (14, 15, 16, 20, 21, 22, and 26). The ERPs represent the three tactile conditions described below (low: green, medium: red, high: blue) for these electrodes.

3.4 Procedure

Participants were wearing the appropriate EEG cap size and were seated 60 cm from the computer screen in a comfortable chair with custom foam arm rests. The participant wore earplugs with a NRR of 32dB to prevent them from hearing the sound produced by the nozzle motion. The air nozzle was positioned above the left forearm at an approximate distance of 20 cm. The participants were instructed to use the keyboard placed near their right hand and were instructed to avoid blinking during stimulus presentation; they were also asked to avoid unnecessary movement and try relax during the task.

The task was to rate the valence of the air jet stimulation using a 5-point Likert scale ranging from very unpleasant to very pleasant. Five keys covered with stickers with the symbols '- -' (very unpleasant), '-' (unpleasant), 'o' (neutral), '+' (pleasant), and '++' (very pleasant) respectively served this purpose. After a quick training session participants started the experiment (see figure 2). Stimulus presentation started with the presentation of a crosshair on a black background for 100ms. Immediately, a T-V stimulus was presented. V lasted 33ms followed by a black screen. The tactile stimulus was delivered simultaneously with a duration of 3s (See figure 2). Following each stimulus presentation, the subject was asked "How did the air jet feel on your forearm?" The participants answered using

sonality traits correlate with tactile receptivity/expressiveness and the evaluation of air jet stimulation.

3.5 EEG data collection and analysis

EEG data was collected using an EGI Net Amps 300 with HydroCel GSN 64 v1 nets and Net Station 4.5.4 software; data was stored on a Mac Pro 5.1. The HydroCel net collects data from the following electrodes Fp1, Fp2, Fz, F3, F4, F7, F8, Cz, C3, C4, Pz, P3, P4, T3, T4, T5, T6, Oz, O1, and O2, as well as, eye-blink and mastoid electrodes using the 10-20 system (see Figure 3). Table 1 shows the equivalent electrodes in the EGI system. EEG nets were prepared by soaking them for five minutes in an electrolyse solution before being placed on the participants' head. Electrode impedances were verified and were maintained below 75k Ω . EEG data was recorded at 250 Hz with Cz as a reference.

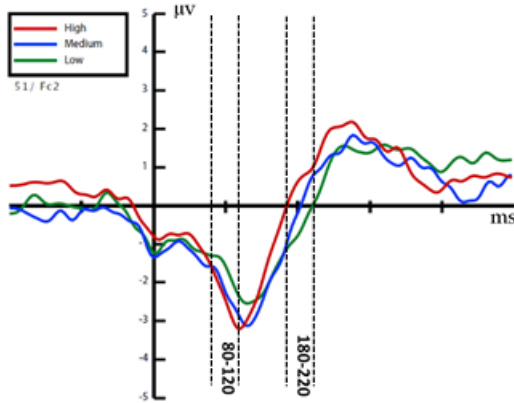


Fig. 4. The Grand average ERP for the FC2 electrode for the three tactile conditions (Low, Medium, and High). N100 and P200 components exhibit larger value for high intensity stimuli. N100 component appears at a peak latency of 126ms for LO, 124 ms for ME, and 110 ms for HI. P200 component appears at a peak latency of 258 ms for LO, 262 ms for ME, and 264 ms for HI.

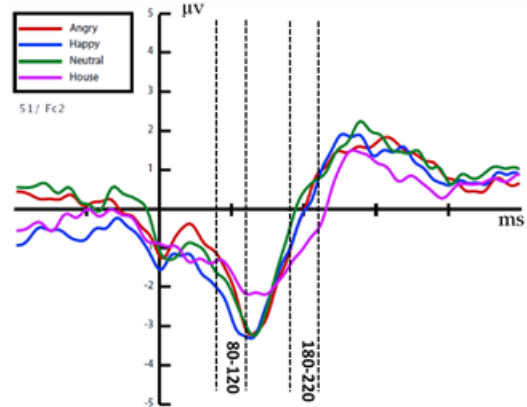


Fig. 5. Grand average ERP for the FC2 electrode for each one of the four visual conditions (Angry, Happy, Neutral, and House). N100 and P200 components are larger for the three facial expressions compared to the house condition. N100 component appears at a peak latency of 112 ms for happy, 120 ms for angry, 120ms for neutral, and 128 ms for house. P200 component appears at a peak latency 262 ms for happy, 305 ms for angry, 266 ms for neutral, and 262 ms for house.

We were able to use only sixteen participants' (nine females and seven males) data for the EEG analysis; the data from the remaining three participants were excluded: two of them had noisy EEG data, while one participant was responding "very pleasant" to each stimulus presentation. EEG data were preprocessed in the Net Station 4.5.4 software. Single subject files were high-pass filtered at 0.1 Hz and low-pass filtered at 40 Hz. The data was segmented into epochs of 100ms before and 500ms after the stimulus onset. Twenty segments were created per condition for each subject for a total of 320 segments per subject. Artefact detection was performed using bad channels, eye blink, and eye movement tools. Eye movement, eye blink and bad channels tools allowed the rejection of any artefact with amplitude greater than $30\mu\text{V}$, $70\mu\text{V}$, and $100\mu\text{V}$ respectively. An average of 70 (out of 320) segments per condition were marked as containing an artefact. The remaining segments were then averaged for each participant to form an ERP for each stimulus condition (4 visual stimuli with no tactile stimulation, 4 visual stimuli * 3 tactile levels) and for all the repetitions (10 repetitions for each stimulus). Figure 4 shows the grand-averaged for all participants in the recorded electrodes after a baseline correction of 100ms.

Data was extracted for the twelve combined T-V conditions from electrodes around the somatosensory cortex (FC1/2, FC3/4, FC5/6, C3/4, CP1/2, and CP5/6); V only-condition were extracted from electrodes around the occipital cortex (O1/2). The time windows for the three ERP components of interest were identified based on previously published work and visual inspection of the ERP traces. The mean activity for T-V condition data were extracted for mid-latency ERPs for 2 windows of extraction: 100-120ms around (N100) and 180-220ms (P200). These

time windows were selected based on visual inspection as to centre on the component peak [78][79][80]. Mean amplitudes during these time windows were analysed using ANOVAs with The electrodes number (FC1/2, FC3/4, FC5/6, C3/4, CP1/2, and CP5/6), the visual stimulus (happy/neutral/angry/houses), the tactile stimulus (low/medium/high) as repeated-measures factors. The threshold of the statistical significance was set to $p < 0.05$.

4 RESULTS

EEG data

Analysis around N100 amplitudes revealed a significant main effect of the tactile condition [$F(2, 30) = 5.62, p = .028$] and significant effect of the visual condition [$F(3, 45) = 6.69, p = .001$]. A significant interaction of electrode, visual tactile [$F(39,585) = 1.76, p < .003$] and electrode, tactile [$F(26,390) = 1.85, p < .007$] were found suggested that the effects was differently distributed across somatosensory electrodes. To break-down this interaction, simple pairwise comparisons were performed for each electrode

TABLE 1
EGI ELECTRODES ID CONVERTED TO 20-10 SYSTEM

| EGI Electrode | 10-20 system* |
|---------------|---------------|
| 14/57 | FC5/6 |
| 15/53 | FC3/4 |
| 16/51 | FC1/2 |
| 20/50 | C3/4 |
| 21/41 | CP1/2 |
| 22/49 | C5/6 |
| 26/46 | Cp5/6 |
| 35/39 | O1/2 |

*= Approximate estimate of the EGI electrodes to the 10-20 system

of the somatosensory region. We found significant effect of the tactile condition on all the anterior-right and posterior-right electrodes FC6, FC4, FC2, C4, C6, and CP6. Post-hoc pairwise tests revealed a significant difference in ERP amplitudes between LO and HI of the touch conditions, indicating that the N100 was larger during high levels of tactile stimulation as compared to low levels stimulation trials. We also found significant effect of the visual condition for FC4, FC2, C4, CP2 and C5. Post-hoc pairwise tests revealed a significant difference in ERP amplitudes between emotion facial expressions and house pictures, indicating that the N100 was larger during Happy/Angry/Neutral as opposed to House.

Peak analysis for P200 amplitudes revealed a non-significant effect for the tactile condition [$F(2, 30) = 1.78, p = .185$] and a significant effect of the visual condition [$F(3, 45) = 7.72, p = .0001$]. A significant interaction of electrode and visual [$F(39,585) = 1.52, p < .023$] was also found, suggesting that these effects was differently distributed across those electrodes. We broke-down the interaction by running simple pairwise comparisons. We found significant effect of the visual condition for the right hemisphere (FC4, FC2, C4) and left hemisphere (FC1, FC3, FC5, and C3) electrodes. Post-hoc pairwise tests revealed a significant difference in ERP amplitudes between emotion facial expression and house images, indicating that the P200 was larger during Happy/Angry, Neutral facial images compared to house images. To illustrate these results, we show FC2 electrode waveforms as an example. ERPs elicited by the three levels of touch for this electrode are presented in figure 4, while ERPs elicited by the four visual conditions are presented in figures 5.

Valence ratings

We performed a two-way repeated measures ANOVA on participants' mean ratings of pleasantness of tactile air jet stimulation conditions (low/medium/high) associated with one of the four visual stimuli (happy/neutral/angry/house). Results revealed significant main effects of tactile [$F(2,30)=57.89, p<0.0001$] and visual [$F(3,45)=8.67, p<0.0001$]. Figure 6 represents mean ratings of air jet pleasantness for the different conditions. Post-hoc pairwise comparisons showed significant differences between the three levels of air jet stimulation with low intensity air jet stimulation rated more positively than medium and high air jet conditions.

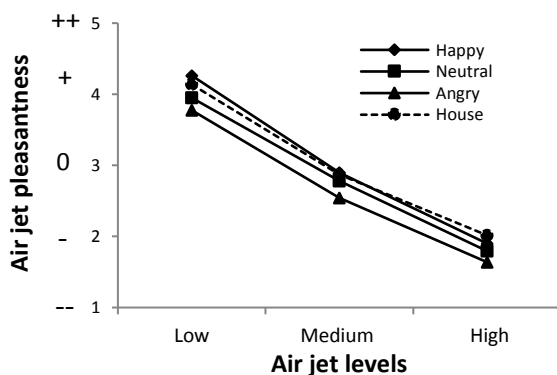


Fig 6. Mean ratings of air jet stimulation according to the different T-V conditions (Happy, Angry, Neutral, House).

Tactype Scores and Big Five Test

Based on their TACTYPE scores with a mean of 58.06 and $SD = 5.32$, participants were divided into four groups. Group I consists of two participants scoring in the first quartile (TAC-1) beyond one standard deviation above the mean. Group II comprises of seven participants in the second quartile (TAC-2), scoring within one standard deviation above the mean. Four participants were classified in Group III scoring within one standard deviation below the mean (TAC-3), and finally the remaining three participants composed the Group IV that scored beyond one standard deviation below the mean (TAC-4). TAC-1 and TAC-2 are participants who scored highly in touch receptiveness and expressiveness; while TAC-3 and TAC-4 are the ones who had lower scores lower toward touch responsiveness. Based on previous research who showed that females are more expressive and receptive in tactile communication [81], we compare gender differences (in our sample 7 males and 9 females) using a t-test that shows significant difference [$t(14)=0.78, p=0.035$] between the mean score for males ($M = 56.85, SD=6.81$) as opposed to females ($M = 59, SD=4$). This Result corroborates the claim that females present greater touch expressiveness and receptiveness, and scores than their male counterparts. As for the big five personality test, there were, no correlations between the expressiveness of touch and big five factors.

5 DISCUSSION

In this study, we investigated the ERPs time-course during simultaneous air jet tactile stimulation and emotional facial expressions. The results show that visuo-tactile processing elicited different levels of somatosensory activity for mid-latency stages of processing (N100 and P200). More specifically, the results further demonstrate that somatosensory ERP components have larger latencies for stimuli that involved facial expression as opposed to a neutral image (house). The N100 ERP component responses have also larger latencies for stimuli with high intensity air jet stimulation as compared to low intensity.

ERP modulations in response to different emotional expressions compared to house pictures support the hypothesis that somatosensory cortex activation is independently shaped by face emotion processing [78][82]. In fact, many TMS and fMRI studies have suggested that somatosensory cortex is involved during emotional face processing [83][84][85]. In the future, we would like to explore late cognitive stages (700-800 ms) that seem to be related to CT-fibers activation. Future works should address specifically this aspect for late cortical potentials over frontal electrodes (Fz and FCz).

Although there was no statistical interaction between the two main factors, we find a significant main effect of both tactile and visual conditions, valence ratings revealed that the pleasantness of the tactile stimulation were influenced by the emotional facial expressions. We assume that this cross-modal effect reflects the mandatory integration

of inputs and not just an attentional post-perceptual evaluation. This is not surprising as bimodal emotion perception is often related to a single event that is presented for two different modalities [86].

6 CONCLUSION

Our objective was to investigate how facial expressions could influence the perception of tactile stimulation in the context of mediated affective communication through a haptic interface.

Results support the idea that tactile stimulation can modulate the valence of emotional faces. Our study is limited by the moderate number of participants but despite this limitation, it offers important insights into the processing of air jet tactile stimulation such as the effect of the levels of the air parameters (i.e. flow rate, velocity of the movement across the skin) on ERPs activation within the somatosensory cortex. Future works will particularly address the combination of facial expression and tactile stimulation on the frontal cortex electrodes for their importance in the perception of stimulation pleasantness by investigating whether air jet levels could elicit positive perceptual responses. Finally the effect of individual differences (like personality traits and touch expressiveness) should be addressed with larger number of participants.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to thank the Technical Committee on Haptics (TCH) for the support provided as part of the TCH cross fertilization program.

REFERENCES

- [1] D. Keltner and A. M. Kring, "Emotion, social function, and psychopathology," *Rev. Gen. Psychol.*, vol. 2, no. 3, p. 320, 1998.
- [2] S. Planalp, "Communication, cognition, and emotion," *Communication Monographs*, vol. 60, pp. 3–9, 1993.
- [3] M. Lewis, J. M. Haviland-Jones, and L. F. Barrett, *Handbook of emotions*. Guilford Press, 2010.
- [4] B. App, D. N. McIntosh, C. L. Reed, and M. J. Hertenstein, "Nonverbal channel use in communication of emotion: how may depend on why.," *Emotion*, vol. 11, no. 3, pp. 603–17, Jun. 2011.
- [5] R. W. Picard, *Affective computing*. MIT press, 2000.
- [6] T. Partala and V. Surakka, "The effects of affective interventions in human-computer interaction," *Interact. with Comput.*, vol. 16, no. 2, pp. 295–309, Apr. 2004.
- [7] E. A. Konijn, S. Utz, M. Tanis, and S. B. Barnes, *Mediated interpersonal communication*. Routledge, 2008.
- [8] B. M. Ghandi, R. Nagarajan, and H. Desa, "Real-time system for facial emotion detection using GPSO algorithm," in *ISIEA 2010 - 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, 2010, pp. 40–45.
- [9] N. Esau, E. Wetzel, L. Kleinjohann, and B. Kleinjohann, "Real-Time Facial Expression Recognition Using a Fuzzy Emotion Model," in *2007 IEEE International Fuzzy Systems Conference*, 2007, pp. 1–6.
- [10] S. Ozawa, S. Mieda, M. Date, H. Takada, and A. Kojima, "MulDiRoH: An Evaluation of Facial Direction Expression in Teleconferencing on a Multi-view Display System," in *Human Interface and the Management of Information. Information and Knowledge Design and Evaluation SE - 52*, vol. 8521, S. Yamamoto, Ed. Springer International Publishing, 2014, pp. 525–535.
- [11] R. Niewiadomski and C. Pelachaud, "Model of Facial Expressions Management for an Embodied Conversational Agent," in *Affective Computing and Intelligent Interaction SE - 2*, vol. 4738, A. R. Paiva, R. Prada, and R. Picard, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 12–23.
- [12] Y.-L. Xue, X. Mao, Z. Li, and W.-H. Diao, "Modeling of Layered Fuzzy Facial Expression Generation," in *Digital Human Modeling SE - 29*, vol. 4561, V. Duffy, Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 243–252.
- [13] M. Courgeon and C. Clavel, "MARC: a framework that features emotion models for facial animation during human-computer interaction," *J. Multimodal User Interfaces*, vol. 7, no. 4, pp. 311–319, 2013.
- [14] S. Pasquariello and C. Pelachaud, "Greta: A simple facial animation engine," *Soft Comput. Ind. - Recent Appl.*, pp. 511–525, 2002.
- [15] F. Al Machot, A. H. Mosa, K. Dabbour, A. Fasih, C. Schwarzlmüller, M. Ali, and K. Kyamakya, "A novel real-time emotion detection system from audio streams based on Bayesian Quadratic Discriminate Classifier for ADAS," in *Proceedings of the Joint 3rd International Workshop on Nonlinear Dynamics and Synchronization, INDS'11 and 16th International Symposium on Theoretical Electrical Engineering, ISTET'11*, 2011, pp. 47–51.
- [16] M. El Ayadi, M. S. Kamel, and F. Karray, "Survey on speech emotion recognition: Features, classification schemes, and databases," *Pattern Recognit.*, vol. 44, pp. 572–587, 2011.
- [17] O. Pierre-Yves, "The production and recognition of emotions in speech: Features and algorithms," *Int. J. Hum. Comput. Stud.*, vol. 59, pp. 157–183, 2003.
- [18] S. Kim, P. G. Georgiou, S. Lee, and S. Narayanan, "Real-time emotion detection system using speech: Multi-modal fusion of different timescale features," in *2007 IEEE 9th International Workshop on Multimedia Signal Processing, MMSP 2007 - Proceedings*, 2007, pp. 48–51.
- [19] T. L. Nwe, S. W. Foo, and L. C. De Silva, "Speech emotion recognition using hidden Markov models," *Speech Commun.*, vol. 41, pp. 603–623, 2003.
- [20] M. Borchert and A. Düsterhöft, "Emotions in speech - Experiments with prosody and quality features in speech for use in categorical and dimensional emotion recognition environments," in *Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Natural Language Processing and Knowledge Engineering, IEEE NLP-KE'05*, 2005, vol. 2005, pp. 147–151.
- [21] M. Theune, K. Meijs, D. Heylen, and R. Ordeman, "Generating expressive speech for storytelling applications," *IEEE Trans. Audio, Speech Lang. Process.*, vol. 14, pp. 1137–1144, 2006.
- [22] J. Tao, Y. Kang, and A. Li, "Prosody conversion from neutral speech to emotional speech," *IEEE Trans. Audio, Speech Lang. Process.*, vol. 14, pp. 1145–1153, 2006.
- [23] C. Creed and R. Beale, "Multiple and Extended Interactions with Affective Embodied Agents," in *Proceedings of the 2006 Workshop on the role of emotion in HCI*, 2006.

- [24] T. Vogt, E. André, and J. Wagner, "Automatic recognition of emotions from speech: a review of the literature and recommendations for practical realisation," in *Affect and emotion in human-computer interaction*, Springer, 2008, pp. 75–91.
- [25] N. Fragopanagos and J. G. Taylor, "Emotion recognition in human-computer interaction," *Neural Netw.*, vol. 18, no. 4, pp. 389–405, May 2005.
- [26] W. Martin, A. Metallinou, F. Eyben, and S. Narayanan, "Context-Sensitive Multimodal Emotion Recognition from Speech and Facial Expression using Bidirectional LSTM Modeling," no. September, pp. 2362–2365, 2010.
- [27] T. Balomenos, A. Raouzaïou, S. Ioannou, A. Drosopoulos, K. Karpouzis, and S. Kollias, "Emotion Analysis in Man-Machine Interaction Systems," pp. 318–328, 2005.
- [28] K. Karpouzis, G. Caridakis, L. Kessous, N. Amir, A. Raouzaïou, L. Malatesta, and S. Kollias, "Modeling Naturalistic Affective States Via Facial, Vocal, and Bodily Expressions Recognition," pp. 91–112, 2007.
- [29] G. Castellano, L. Kessous, and G. Caridakis, "Multimodal emotion recognition from expressive faces, body gestures and speech."
- [30] L. Xie, Z. Deng, and S. Cox, "Multimodal joint information processing in human machine interaction: recent advances," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 73, no. 1, pp. 267–271, Nov. 2013.
- [31] C. Busso, Z. Deng, S. Yildirim, M. Bulut, C. M. Lee, A. Kazemzadeh, S. Lee, U. Neumann, and S. Narayanan, "Analysis of emotion recognition using facial expressions, speech and multimodal information," *Proc. 6th Int. Conf. Multimodal interfaces - ICMI '04*, p. 205, 2004.
- [32] A. Esposito, "Affect in Multimodal Information," pp. 203–226.
- [33] C. Grubb, "Multimodal Emotion Recognition," 2013.
- [34] H. Gunes, M. Piccardi, and T. Jan, "Face and Body Gesture Recognition for a Vision-Based Multimodal Analyzer," vol. 36, 2007.
- [35] M. Pantic and L. J. M. Rothkrantz, "Toward an affect-sensitive multimodal human-computer interaction," *Proc. IEEE*, vol. 91, no. 9, pp. 1370–1390, Sep. 2003.
- [36] Z. Zeng, Y. Hu, G. I. Roisman, Z. Wen, Y. Fu, and T. S. Huang, "Audio-Visual Spontaneous Emotion Recognition," pp. 72–90, 2007.
- [37] A. T. Patel, *The Handbook of Touch*, vol. 92, no. 10, 2013.
- [38] M. J. Hertenstein, J. M. Verkamp, A. M. Kerestes, and R. M. Holmes, "The communicative functions of touch in humans, nonhuman primates, and rats: a review and synthesis of the empirical research," *Genet. Soc. Gen. Psychol. Monogr.*, vol. 132, no. 1, pp. 5–94, Feb. 2006.
- [39] M. L. Knapp and J. A. Hall, *Nonverbal Communication in Human Interaction*. Cengage Learning, 2010.
- [40] M. J. Hertenstein, D. Keltner, B. App, B. a Bulleit, and A. R. Jaskolka, "Touch communicates distinct emotions," *Emotion*, vol. 6, no. 3, pp. 528–33, Aug. 2006.
- [41] M. J. Hertenstein, R. Holmes, M. McCullough, and D. Keltner, "The communication of emotion via touch," *Emotion*, vol. 9, no. 4, pp. 566–73, Aug. 2009.
- [42] I. Gordon, A. C. Voos, R. H. Bennett, D. Z. Bolling, K. a Pelphrey, and M. D. Kaiser, "Brain mechanisms for processing affective touch," *Hum. Brain Mapp.*, vol. 34, no. 4, pp. 914–22, Apr. 2013.
- [43] Y.-W. Park, K.-M. Baek, and T.-J. Nam, "The Roles of Touch During Phone Conversations: Long-distance Couples' Use of POKE in Their Homes," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2013, pp. 1679–1688.
- [44] G. Huisman and A. Darrriba Frederiks, "Towards tactile expressions of emotion through mediated touch," *CHI'13 Ext. Abstr. Hum. Factors Comput. Syst.*, pp. 1575–1580, 2013.
- [45] D. Tsetserukou and A. Neviarouskaya, "World's first wearable humanoid robot that augments our emotions," *Proc. 1st Augment. Hum. Int. Conf. - AH '10*, pp. 1–10, 2010.
- [46] S. Yohanan and K. E. Maclean, "The Haptic Creature Project : Social Human-Robot Interaction through Affective Touch," pp. 1–5.
- [47] A. Ammi, M., Demulier, V., Caillou, S., Gaffary, Y., Tsalamlal, Y., Martin, J.-C., and Tapus, "Haptic Human-Robot Affective Interaction in a Handshaking Social Protocol," in *IEEE Human-Robot Interaction Conference*, 2015.
- [48] J. Saldien, K. Goris, S. Yilmazyildiz, W. Verhelst, and D. Lefeber, "On the Design of the Huggable Robot Probo," *J. Phys. Agents*, vol. 2, no. 2, pp. 3–11, 2008.
- [49] W. D. Stiehl and C. Breazeal, "Affective Touch for Robotic Companions."
- [50] J. N. Bailenson, N. Yee, S. Brave, D. Merget, and D. Koslow, "Virtual interpersonal touch: expressing and recognizing emotions through haptic devices," *Human-Computer Interact.*, vol. 22, pp. 325–353, 2007.
- [51] Y. Gao, N. Bianchi-Berthouze, and H. Meng, "What Does Touch Tell Us About Emotions in Touchscreen-Based Gameplay?," *ACM Trans. Comput. Interact.*, vol. 19, no. 4, pp. 31:1–31:30, 2012.
- [52] Y. Gaffary, V. Eyharabide, J.-C. Martin, and M. Ammi, "The Impact of Combining Kinesthetic and Facial Expression Displays on Emotion Recognition by Users," *Int. J. Hum. Comput. Interact.*, no. just-accepted, 2014.
- [53] M. Y. Tsalamlal, P. Issartel, N. Ouarti, and M. Ammi, "HAIR: HAaptic feedback with a mobile AIRjet," *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*. pp. 2699–2706, 2014.
- [54] M. Tsalamlal, N. Ouarti, J.-C. Martin, and M. Ammi, "Haptic communication of dimensions of emotions using air jet based tactile stimulation," *J. Multimodal User Interfaces*, pp. 1–9, 2014.
- [55] G. K. Essick, F. McGlone, C. Dancer, D. Fabricant, Y. Ragin, N. Phillips, T. Jones, and S. Guest, "Quantitative assessment of pleasant touch," *Neurosci. Biobehav. Rev.*, vol. 34, no. 2, pp. 192–203, Feb. 2010.
- [56] G. K. Essick, A. James, and F. P. McGlone, "Psychophysical assessment of the affective components of non-painful touch," *NeuroReport: For Rapid Communication of Neuroscience Research*, vol. 10, no. 10. Lippincott Williams & Wilkins, US, pp. 2083–2087, 1999.
- [57] P. Ekman and W. V. Friesen, *Unmasking the face: A guide to recognizing emotions from facial clues*. Oxford: Prentice-Hall, 1975.
- [58] C. E. Izard, *The face of emotion / Carroll E. Izard*. Appleton-Century-Crofts New York, 1971.
- [59] P. Ekman and W. V. Friesen, "Constants across cultures in the face and emotion," *J. Pers. Soc. Psychol.*, vol. 17, no. 2, p. 124, 1971.
- [60] D. Matsumoto, "More evidence for the universality of a contempt expression," *Motiv. Emot.*, vol. 16, no. 4, pp. 363–368,

- 1992.
- [61] R. J. Dolan, "Emotion, Cognition, and Behavior," *Science (80-.)*, vol. 298, no. 5596, pp. 1191-1194, 2002.
- [62] B. Rossion, R. Caldara, M. Seghier, A. M. Schuller, F. Lazeyras, and E. Mayer, "A network of occipito-temporal face-sensitive areas besides the right middle fusiform gyrus is necessary for normal face processing," *Brain*, vol. 126, no. 11, pp. 2381-2395, 2003.
- [63] J. V. J. Haxby, E. E. a. Hoffman, and M. I. M. M. I. Gobbini, "The distributed human neural system for face perception," *Trends Cogn. Sci.*, vol. 4, no. 6, pp. 223-233, 2000.
- [64] E. A. Hoffman and J. V Haxby, "Distinct representations of eye gaze and identity in the distributed human neural system for face perception," *Nat Neurosci*, vol. 3, no. 1, pp. 80-84, Jan. 2000.
- [65] T. Allison, A. Puce, and G. McCarthy, "Social perception from visual cues: role of the STS region," *Trends Cogn. Sci.*, vol. 4, no. 7, pp. 267-278, 2000.
- [66] R. Adolphs, D. Tranel, and A. R. Damasio, "Dissociable neural systems for recognizing emotions," *Brain Cogn.*, vol. 52, no. 1, pp. 61-69, 2003.
- [67] M. Batty and M. J. Taylor, "Early processing of the six basic facial emotional expressions," *Cogn. Brain Res.*, vol. 17, no. 3, pp. 613-620, 2003.
- [68] G. Pourtois, "Electrophysiological Correlates of Rapid Spatial Orienting Towards Fearful Faces," *Cereb. Cortex*, vol. 14, no. 6, pp. 619-633, 2004.
- [69] M. Eimer and A. Holmes, "Event-related brain potential correlates of emotional face processing," *Neuropsychologia*, vol. 45, no. 1, pp. 15-31, 2007.
- [70] H. Olausson, J. Wessberg, I. Morrison, F. McGlone, and A. Vallbo, "The neurophysiology of unmyelinated tactile afferents," *Neurosci. Biobehav. Rev.*, vol. 34, no. 2, pp. 185-91, Feb. 2010.
- [71] F. McGlone, A. B. Vallbo, H. Olausson, L. Loken, and J. Wessberg, "Discriminative touch and emotional touch," *Can. J. Exp. Psychol. Can. Psychol. expérimentale*, vol. 61, no. 3, pp. 173-183, 2007.
- [72] R. Ackerley, E. Eriksson, and J. Wessberg, "Ultra-late EEG potential evoked by preferential activation of unmyelinated tactile afferents in human hairy skin," *Neurosci. Lett.*, vol. 535, pp. 62-6, Feb. 2013.
- [73] M. Y. Tsalamlal, N. Ouarti, J.-C. Martin, and M. Ammi, "EmotionAir: Perception of Emotions from Air Jet Based Tactile Stimulation," *Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII), 2013 Humaine Association Conference on*. pp. 215-220, 2013.
- [74] M. G. Calvo and D. Lundqvist, "Facial expressions of emotion (KDEF): Identification under different display-duration conditions," *Behav. Res. Methods*, vol. 40, no. 1, pp. 109-115, Feb. 2008.
- [75] P. Helle, C. & Perona, "Pasadena houses 2000 [Photographs]," 2015.
- [76] J. F. Deethardt and D. G. Hines, "Tactile communication differences and personality," vol. 8, no. 2.
- [77] O. John and S. Srivastava, "The Big Five trait taxonomy: History, measurement, and theoretical perspectives," *Handbook of personality: Theory and* 1999.
- [78] a. Sel, B. Forster, and B. Calvo-Merino, "The Emotional Homunculus: ERP Evidence for Independent Somatosensory Responses during Facial Emotional Processing," *J. Neurosci.*, vol. 34, no. 9, pp. 3263-3267, 2014.
- [79] A. Schirmer, K. S. Teh, S. Wang, R. Vijayakumar, A. Ching, D. Nithianantham, N. Escoffier, and A. D. Cheok, "Squeeze me, but don't tease me: human and mechanical touch enhance visual attention and emotion discrimination," *Soc. Neurosci.*, vol. 6, no. 3, pp. 219-30, Jan. 2011.
- [80] A. Streltsova and J. P. McCleery, "Neural time-course of the observation of human and non-human object touch," *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.*, vol. 9, no. 3, pp. 333-341, 2014.
- [81] N. M. Henley, "Status and sex: Some touching observations," *Bulletin of the Psychonomic Society*, vol. 2, no. 2. Psychonomic Society, Inc., US, pp. 91-93, 1973.
- [82] C. Keysers, J. H. Kaas, and V. Gazzola, "Somatosensation in social perception," *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 11, no. 6, pp. 417-428, 2010.
- [83] R. Adolphs, H. Damasio, D. Tranel, G. Cooper, and a R. Damasio, "A role for somatosensory cortices in the visual recognition of emotion as revealed by three-dimensional lesion mapping," *J. Neurosci.*, vol. 20, no. 7, pp. 2683-90, Apr. 2000.
- [84] E. Hussey and A. Safford, "Perception of facial expression in somatosensory cortex supports simulationist models," *J. Neurosci.*, vol. 29, no. 2, pp. 301-2, Jan. 2009.
- [85] G. Pourtois, D. Sander, M. Andres, D. Grandjean, L. Reveret, E. Olivier, and P. Vuilleumier, "Dissociable roles of the human somatosensory and superior temporal cortices for processing social face signals," *Eur. J. Neurosci.*, vol. 20, no. 12, pp. 3507-3515, 2004.
- [86] B. de Gelder and J. Vroomen, "The perception of emotions by ear and by eye," *Cogn. Emot.*, vol. 14, no. 3, pp. 289-311, May 2000.

Psychophysical study of air jet based tactile stimulation

M.Y. Tsalamlal
LIMSI/CNRS
University of Paris-Sud

N. Ouarti
ISIR/CNRS

M.Ammi
LIMSI/CNRS

ABSTRACT

Haptic rendering technologies are becoming a strategic component of the new Human-Machines Interfaces. Many existing devices generally operate with intrusive mechanical structures that limit rendering and transparency of the haptic interaction. In the context of the design of a novel non-contact haptic device that exploit the air jet tactile stimulation with long distance, we carried out psychophysical experiments in order to characterize the human perception of the air jet tactile stimulation. This study focuses on the stimulation of the user's hand palm. Fluid mechanics suggests that perceived parameters of the air jet stimulation can be controlled by the air jet flow rate, the nozzle geometry, and the distance between the nozzle and the hand palm. In this paper we investigate how these control variables affect the perceived force on the hand palm.

Two psychophysical studies were carried out. The first experiment investigated three distances from the air nozzle to determine the absolute threshold of the air flow rate on the hand palm. Results reveal that there is a linear relationship between the perceived absolute threshold and the distance from the hand palm to the nozzle. The second psychophysical experiment was made to determinate the just noticeable difference of the air flow rate according to three referential stimuli. Then we estimated the Weber fraction. These two results are important for the display control and will be used further for the design of the future non-contact haptic device.

Keywords: tactile air jet stimulation, perception, absolute threshold, JND.

1 INTRODUCTION

Haptic interfaces are relatively recent devices. They stimulate users physically through tactile, thermal and kinesthetic perceptions to improve the interaction and immersion in virtual environments. Among the different issues of existing haptic devices, comfort and interaction fidelity are important factors to be considered. In fact, current haptic devices mainly exploit technologies based on articulated robotic structures, systems with cables, or vibrotactile actuators [1]. However, these rendering technologies present several constraints. First, they require a physical contact between the user and the mechanical systems to interact with the virtual object. Second, they provide a punctual interaction and do not exploit the entire surface of the hand. Finally, most systems are intrusive and are not practical in many fields (e.g., games, desktop applications). A number of systems, like data gloves with vibrotactile actuators, allow more freedom of

movement but provide low spatial and force resolutions. Currently, several works address these constraints with non-contact stimulation technologies. Two main strategies were investigated. The first strategy is based on acoustic radiations [2].

It consists in the control of the phase delays of acoustic waves to generate a focal point. This strategy provides a tactile feedback in 3D environments without physical contact with transductions. The main drawback of this strategy is the low intensity of generated force (Maximum force of 160mN). Moreover, the authors highlighted some potential medical risks for interactions with sensitive regions (e.g., head and face).

The second strategy consists in the use of air jets for tactile or kinesthetic stimulations. The first work proposed to use multiple air jets arranged in a matrix. These jets hit an air receiver, kept by the user, in order to apply a force on the user's hand [3]. This strategy generates a kinesthetic feedback with important force intensity. However, it provides poor force and position resolutions. Moreover, the user needs to handle an end-effector in order to interact with the air jets. Thereafter, Inoue et al. [4] proposed to use a flexible sheet driven by an air jet. This approach provides a virtual haptic sensation of bumps under the user's fingers. The main handicap of this method is that the flexible sheet is fixed and cannot move to enable a free exploration. For a free exploration and interaction, Romano and Kuchenbecker [5] proposed the AirWand device. The device is based on two air jets aligned along the longitudinal axis of the tool, comprising two air outlets. These two jets are used to create driving forces along the longitudinal axis in the positive and negative directions. The combination of three actuating axes enables the free interaction in a large working area but the resolution of the force is still limited. Finally, Bianchi et al. [6] proposed to use the air jet for the direct tactile stimulation. It consists to direct a thin stream of air on the finger pad. This strategy provides greater force. This work was limited to short distances not exceeding 2 cm. In fact, this system, designed for the palpation using robot-assisted minimally invasive surgery (RMIS), requires an accurate punctual force for the perception of bumps. Thus, they used the region corresponding to the potential core of the air jet, which provides the best physical features (i.e., same velocity than the source, no turbulence) for the tactile stimulation. This stimulation configuration (i.e., stimulation at 2 cm) greatly restricts the movement of the user and does not allow a free exploration of 3D environments.

In summary, the use of acoustic radiations does not allow high intensity stimulations and could present a significant risk for the user. The air jet approaches seem more promising. However, existing works exploit either intermediate object for interaction with air jet (i.e., air receiver), or exploit very short stimulation distances restricting the user's workspace.

In the context of the design of a novel non-contact haptic device providing an important work space, we propose to use the air jet for direct tactile stimulation with greater distances (>10 cm). This configuration provides an important workspace for a better freedom of movement (figure 1). It can also provide a greater stimulation area. Indeed, the air jet theory suggests that for air jet penetrating a fluid of the same density (in this case the room air), the jet envelope takes a conical shape (See Figure 2), and the opening angle of the jet envelope remains constant.

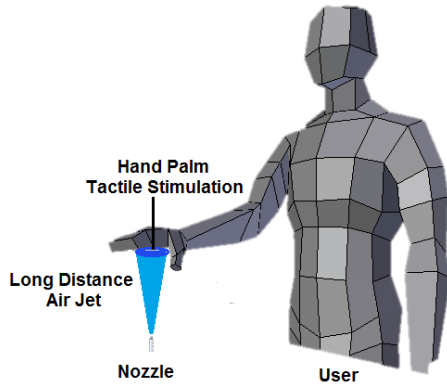


Figure 1: Long distance (>10 cm) air jet tactile stimulation.

For this new stimulation configuration, we propose to carry out an experimental study in order to characterize the relation between the air jet physical stimulation and its perception using psychophysics framework.

1.1 Air jet diffusion model

According to Gescheider [7], the asymmetric free jet flow can be divided into two regions with different physical features (Figure 2):

- *Region I*: Corresponds to a short zone (potential core) where the velocity remains constant and equal at the nozzle exit.
- *Region II*: Corresponds to a great region where the flow is established. It is characterized by a linear dissipation of the centerline velocity according to the distance to the outlet, and a spreading of the jet in the transverse direction.

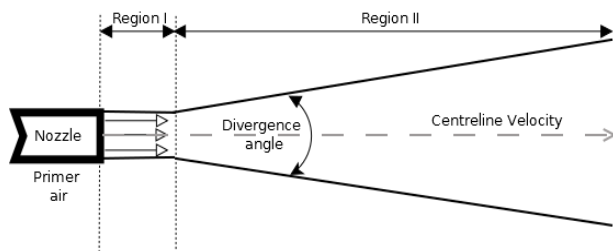


Figure 2: Air flow characteristics.

The region I seems to present the best air jet features, but it provides a very short stimulation distance which could constraint the user movements. Moreover, it covers a small area limiting the surface of stimulation. This may not be suitable for some applications requiring greater stimulation area (e.g., hand palm). Region II presents intermediate features. In fact, it corresponds to a longer distance than Region I, which provides greater workspace allowing free movements. Besides, with an average flow rate, the velocity intensity is sufficient to provide a high range of force stimulation

intensity. Additionally, the contact zone is greater than Region I, because of the spreading effect, providing greater stimulation area. Yet, the end of Region II corresponds to a highly turbulent flow, difficult to distinguish from the ambient air, which is not suitable for a relevant haptic rendering.

Ideally, the impinging force and the diameter of the jet envelope would be determined using models of fluid mechanics. Although, an accurate model is difficult to obtain since the system is affected by many factors, including the outlet geometry (e.g., shape, size), the type of air flow (e.g., laminar, turbulent), pressure losses due to friction along the length of the tubing, air temperature etc. [8]. In this study we propose to use empirical models determined with the data provided by the nozzle manufacturer. This approach enabled us to obtain an accurate model without tedious physical measurements.

Based on these relevant features of Region II, we propose to carry out a psychophysical study in order to characterize the tactile perception with this type of air jet stimulation. These features could lead to identify the optimal stimulation configuration (distance, applied tactile stimulus, etc.) which are the compromise between the working distance, the accuracy of the stimulation, and the intensity of the perceived applied force.

1.2 Objective of the experimental study

For this configuration of stimulation (distance >10 cm), we propose to achieve a quantitative study of human tactile perception, examining the relationship between the observed quantifiable physical stimuli and users responses.

The study of tactile perception involves mainly two types of measurements: determining the absolute threshold and the differential threshold. Absolute threshold measurement is performed by detecting the presence of a stimulus. This value corresponds to the minimum intensity at which the stimulus is just detectable. Moreover, it is important to determine the differential threshold. This threshold refers to the smallest change incremented or decremented in stimulus intensity that is detectable by the subjects. It is also known as the just noticeable difference (JND). The differential threshold is measured with respect to a reference stimulus; it must be presented in relation to this reference value. Both of the absolute and differential thresholds can be measured by similar experimental procedures. The next section details the adaptive staircase methods used for this study. The full list and details of experimental methods, commonly used to estimate the sensory thresholds, can be found in [9].

2 PSYCHOPHYSICAL MEASUREMENT METHODS

In this study we used the adaptive staircase methods to evaluate both of the absolute threshold and the JND. Staircase procedures are designed to concentrate data sampling around some interesting regions of the psychometric function and to avoid data sampling at too high or too low signal levels. These methods generally use one or more previous responses within an adaptation track. The responses are used to select the intensity level of the stimulus in the next trial. The threshold is estimated by averaging the levels at the direction reversals in the adaptive track. The single staircase "up-down" procedure consists in reducing the intensity of the stimulus when the subject's response is positive (e.g., "I feel pressure", and "I feel a difference" for JND measurement) and an increasing in the intensity of stimulation when the response is negative. Figure 6 shows an example of a simple "1up-1down" procedure. The track starts from a level well above the estimated threshold, the positive responses lead to decrease the intensity of the generated stimulus until a negative response occurs [10]. This triggers a reversal

change in the direction of the track, and stimulus levels increase further until the next change in response occurs.

The procedure of a simple staircase "1up-1down" means the level of performance of 50% on a psychometric function, which ranges from 0% to 100%. In other words, the track targets the level of stimulation for which the probability of a positive response is equal to the probability of a negative response. To target a higher performance level, the sequence to reduce the intensity of the stimulus may correspond to two or more positive responses and the sequence of upward movement may be limited to a single negative response [11]. This example is the most commonly used procedure. The "1up-2down" staircase procedure targets a performance level of 70.7% on the psychometric function. Indeed, if p is the probability of a positive response on a given trial, then p^*p must be equal to 0.50, and therefore the probability target is $\sqrt{0.5} = 0.707$. However, using two positive responses to decrement the stimulus intensity requires performing more trials, which is time consuming. Additionally, Kaernbach [12] describes a simple procedure that can be used to estimate the threshold levels with more precision by reducing the step-size after each change in the direction of the staircase. To determine the JND, we need to compare the threshold value with a reference stimulus. The JND is then obtained by calculating the difference between the threshold and the value of the reference stimulus.

We proposed to use adaptive staircase procedures since it can provide a precise tuning with less time consuming. In fact, these procedures avoid data sampling at too high or too low signal levels and require fewer trials compared with other methods (e.g., constant stimuli and signal detection).

3 MATERIALS

The experimentation is based on a desktop platform including a computer and the air jet system. The software architecture of the platform presents two main modules (See figure 3). The Experiment Manager shows the graphical user interface that allows the participant to give responses and to trigger the next stimuli by sending calls to the second module that controls the air flow rate.

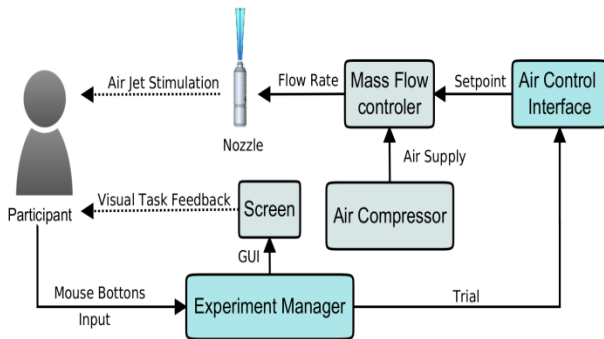


Figure 3: Experiment Platform.

To provide an accurate air jet tactile stimulation, we need to generate a concentrated air jet. The choice of the nozzle shape is a key parameter. There is a direct relationship between this parameter and the diffusion angle of the jet. Several types of nozzles were examined and tested. The adopted nozzle (SILVENT MJ4) is made of stainless steel with a central hole surrounded by slots to generate a concentrated air stream while limiting the sound level. Its small dimensions make this nozzle suitable for incorporation into machine designs. The manufacturer provides some specifications on the jet flow including the blowing force (F) in Newton according to the flow rate (Q) in l/min, and the jet diameter (ϕ) in millimeter as a function of distance (x) in millimeter (figure 4). For

these two relationships the data present a linear profile. We performed linear regression to obtain the following models:

$$F = 0.012Q + 0.082 \quad (1)$$

$$\phi = 0.215x + 1.561 \quad (2)$$

The nozzle is supplied by air through a flexible tube with a 6 mm diameter. An air compressor provides sufficient air pressure to the system (4 bars). The flow rate is accurately controlled (up to 50l/min ± 0.02) using an industrial mass flow controller (MFC Bukert 8711). In this device the flow rate value measured by a sensor is compared by the integrated electronic controller with the digital set value. If a difference is detected, the control applied to the proportional valve is changed by using a PI control algorithm. The flow rate can be maintained at a fixed value or be assigned to a profile, regardless of variations in pressure or changes in the system. The manufacturer provides software to control the device. However, for more use flexibility, we developed a C++ user interface.

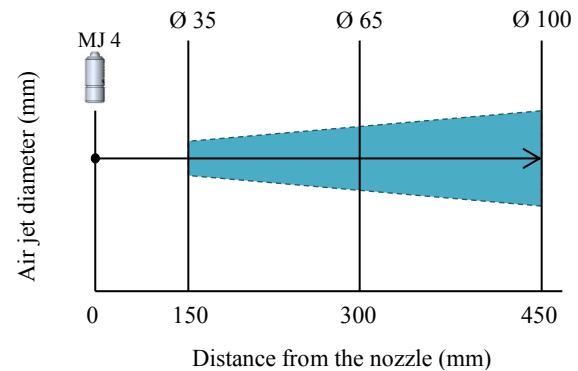


Figure 4: Diameter of the air jet conical envelope.

4 EVALUATION OF THE ABSOLUTE THRESHOLD

4.1 Objective

This experiment aims to identify the minimum threshold of the air flow rate released from the air nozzle. This threshold is measured according to several distances from the nozzle to the hand palm. The objective is to determine the minimum flow rate to be applied to the user's hand palm so that the generated haptic rendering is perceptible.

4.2 Hypothesis

According to fluid mechanics [8], in Region II there is a linear relationship between the distance and the decline of the jet velocity and thus the impact force. The adopted hypothesis suggests an inverse proportional relationship between the distance from the outlet of the injector and the minimum detectable flow rate.

4.3 Method

4.3.1 Participants

12 participants (9 males and 3 females aged between 22 and 31 years old), from the University of Paris-Sud and CNRS/LIMSI laboratory (Orsay, France) took part in this study. All subjects were right-handed. None of the subjects have any neurological or physical injury that affected sensitivity of the hand palm.

4.3.2 Procedure

Subjects were asked to place themselves in front of the desk and to place their right arm on the supporting structure. The palm was placed down and centred on the air nozzle through a square opening of 6 X 6 cm. The nozzle was placed perpendicularly to the user's hand palm and a given distance (see figure 5). The distance could be modified according to the experimental conditions. We used the "1up - 2down" adaptive staircase procedure with a variable step-size. During the first trial, an air jet stimulus was presented to the user with intensity well above the threshold. The duration of the stimulus was two seconds, and then the subject was asked to respond 'yes' if he/she perceived a pressure on their palm and 'no' otherwise. The participant indicated the response using one of the two mouse buttons, the left button for a negative response, and the right one for a positive response. For a negative response, the stimulus level was incremented by one step on the next trial and for two successive positive responses the stimulus was decremented by one step. Giving two successive positive responses to move downward on the track should limit the bias caused by the lack of concentration of the subject.

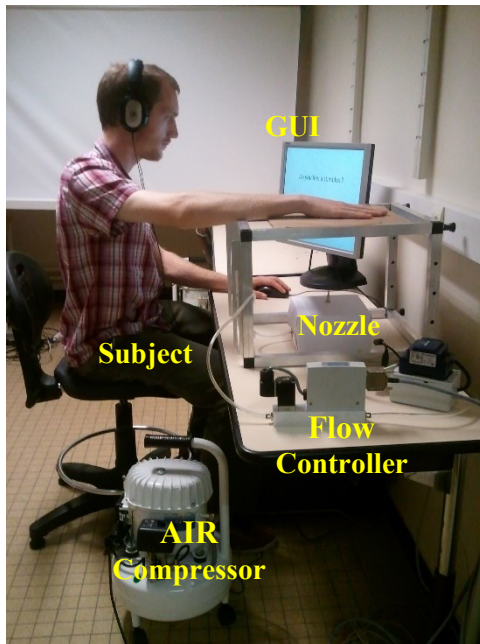


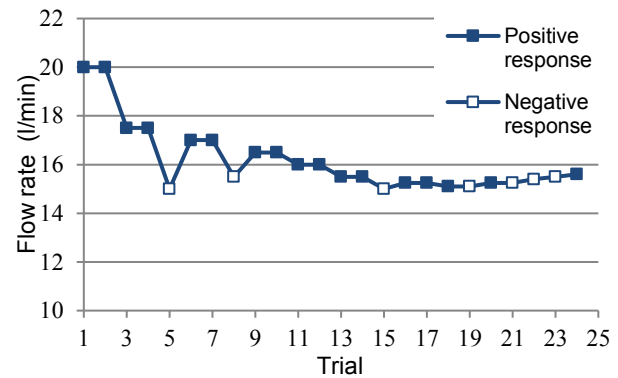
Figure 5: Experimental setup.

After each inversion on the track, the stimulus step size was reduced for more accurate tuning. The procedure consisted of eight reversals on the adaptive track and then the threshold was estimated by averaging the last four reversal point values (step-sizes: 5, 4, 3, 2, 1, 0.5, 0.3, and 0.2 l/min).

The experiment was conducted in three phases, separated by exposures of 2 minutes. During each phase, the nozzle was set at a different distance from the user's hand palm. Three distances were studied (150, 250, 350 mm) and presented to participants in a random order. The experiment lasted an average time of 12 minutes. During the experiment, subjects were wearing headphones playing white noise to prevent the sound of the jet flow to bias the user tactile perception. Before each session, subjects were informed about the objective of the experiment and the experimental tasks. A quick learning session was conducted to make sure that the participant mastered all aspects of the experiment.

4.4 Results and discussion

Figure 6 shows an example of a participant's response at 350 mm distance from the nozzle. The line represents the psychophysical adaptive track. Squares in red correspond to trials where the subject gave a positive response. The white squares correspond to trials where the participant gave a negative response. The subject



performed 8 transitions after 24 trials. The minimum detectable threshold value is calculated by averaging the 4 last transition point values. A mean threshold value was computed for each distance from the nozzle by averaging threshold values across subjects.

Figure 6: Psychophysical adaptive staircase for subject 4 with a distance to the nozzle of 350 mm.

Figure 7: Mean Absolute Threshold flow rate for the three distances to the nozzle.

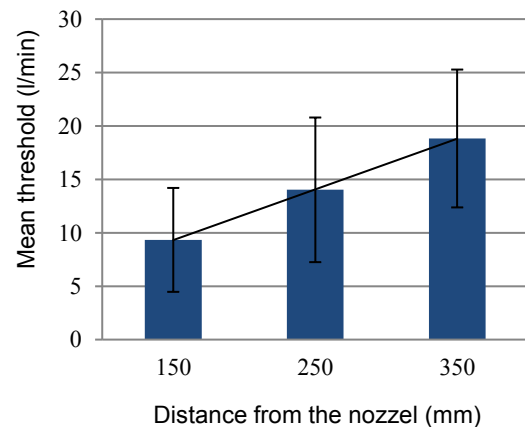


Figure 7 shows the mean threshold values for all subjects. We observe that the absolute threshold decreases when the stimulus is closer to the subject hand.

This result is in agreement with the physical air jet flow velocity model discussed in [8]. As a matter of fact, the jet velocity decreases proportionally according to the distance from the nozzle (x). We can consider the hypothesis of this study validated. In order to calculate the threshold (T) model according to the distance from the nozzle (Equation 3), we perform a linear regression from the obtained data (See Figure 7).

$$T = 0.047x + 2.158 \quad (3)$$

This model will be used for the display control of the haptic rendering in order to calculate the minimum flow rate, according to the user's hand position, to generate a perceptible tactile stimulation.

5 EVALUATION OF THE DIFFERENTIAL THRESHOLD (JND)

5.1 Objective

The second experiment aims to identify the JND between two air flow rates released by the nozzle. This threshold was measured for three stimulus references distributed between the maximum and the minimum flow rates that can be generated with the air jet system. The objective is to determine the flow rate to be applied, so that the user can distinguish between different flow rate intensities.

5.2 Hypothesis

For this study, we considered two hypotheses:

- [H1]: We supposed that a proportional relationship exists between the JND and the reference stimulus according to the Weber-Fechner law [13]:

$$\Delta I / I = k \quad (4)$$

Where ΔI is the differential threshold (JND), I is the intensity of the standard stimulus, and the constant k is the characteristic of the sensory modality.

- [H2]: We also supposed that the JND increases as the referential flow rate increases.

5.3 Method

5.3.1 Participants

15 participants were invited to take part of the experience (9 men and 6 women aged between 22 and 37 years old). All subjects were right-handed. None of the subjects presented neurological or physical deficiencies that could affect the sensitivity of the hand. The participants were from the University of Paris-Sud and CNRS/LIMSI laboratory (Orsay, France).

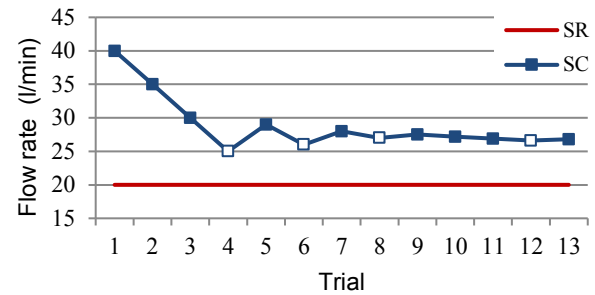
5.3.2 Procedure

The experimental setup is similar to the previous experimentation. However, the user's hand palm was maintained at a fixed distance of 150 mm. This distance seems to be a good compromise between the jet diameter, estimated at 35 mm using equation 3, and the estrangement from the nozzle. This envelope jet diameter should also keep the jet energy on the user's hand palm. For this experiment, we used the "1up - 1down" simple adaptive staircase procedure with a variable step-size.

Subjects received air jets on the hand palm. These air jets were presented as separate pairs of stimuli. Subjects were asked to indicate if they perceive a difference in the intensity between the two stimuli. Each pair was composed of a first stimulus reference (SR) and a comparison stimulus (CS). The trial consisted in presenting the stimulus reference for 2 seconds and the comparison stimulus after an interval second. During the first trial, the presented stimulus corresponded to the intensity well above the reference stimulus. The subject was asked to answer 'yes' if he/she perceived a difference between SR and SC, and 'no' otherwise, using mouse buttons. For a negative response, the level of comparison stimulus was incremented by one intensity step on the next trial and for a positive response was decremented by one. After each reversal (change of response), we reduced the stimulus unit to have a more accurate adjustment. The steps used were 5, 4, 3, 2, 1,

0.5, 0.3, and 0.2 l/min. The procedure consisted of eight reversals and the threshold was calculated by taking the average of the last 4 reversal point values.

The experiment was conducted in three phases, separated by exposures of 2 minutes. During each phase, the reference stimulus was changed. The three reference values (10, 20, 30 l/min) were presented randomly to participants. The experience lasted an average of 15 minutes. For all trials, subjects were wearing headphones with white noise to prevent the sound of the jet flow to bias the user tactile perception. Before each session, subjects were informed about the objective of the experiment and the experimental tasks. A quick learning session was conducted to

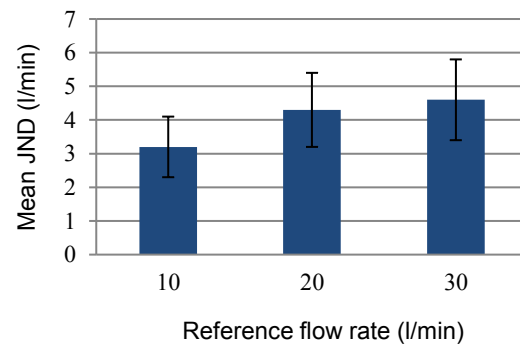


make sure that the participant understood all the experiment aspects.

5.4 Results and Discussion

Figure 8: Psychophysical adaptive staircase for subject 1 with a reference flow rate of 20 l/min.

Figure 8 shows an example of a participant's response with a reference stimulus of 20 l/min. The red line represents the psychophysical staircase. The blue line represents the reference value of the stimulus. The subject performed 8 transitions after 13



trials. The threshold value was calculated by performing a differential subtraction between the stimulus reference values and the average value of the air flow past 4 transition points.

Figure 9: Mean JND according to the three flow rate references.

This experiment identified the air jet differential threshold, according to three different flow rate references. The results, in figure 9, indicate that the perception of a difference between the intensities of the air jet is proportional to the reference stimulus. This is in agreement with our hypothesis based on Weber rule. In fact, the JND increases as the referential flow rate increases. Based on the on obtained results we performed a linear approximation to calculate the weber fraction $k=0.06$.

This result will be used for the display control of the haptic rendering in order to calculate the minimum increment or

decrement to apply to generate a perceptible difference in the tactile stimulation.

6 CONCLUSION AND FUTURE WORKS

This paper investigated the relationship between the control air jet parameters and the user perception. Different psychophysical experiments were carried out in order to understand how these control parameters affect the perceived stimuli on the hand palm. The experimental results showed that the absolute threshold of air flow rate on the hand palm presents a linear relationship according to the distance from the air nozzle. We also evaluate mean JND values measured in relation with three different reference stimuli. We also observed a linear relationship between the JND and the flow rate references. The different results will be used to characterize the haptic rendering parameters of the proposed device. Future works include additional psychophysical experiments in order to clarify how air jet supply frequency affects the tactile perception. We will also use tactile sensors to collect physical data like the pressure impact distribution according to the shape and size of the nozzle, air supply frequency, and distance from the nozzle. This study and future works should be compromising to provide performance specifications for the air jet haptic display and to lead to the design of the proposed non-contact haptic interface.

REFERENCES

- [1] V. Hayward, O.R. Astley, M. Cruz-Hernandez, D. Grant, and G. Robles-De-La-Torre. Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, 24:16–29, 2004.
- [2] T. Iwamoto, M. Tatezono, and H. Shinoda, Non-Contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound, In Proceedings, EuroHaptics 2008, LNCS 5024, 504-513, 2008.
- [3] Y. Suzuki and M. Kobayashi. Air jet driven force feedback in virtual reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 25:44-47, 2005.
- [4] K. Inoue, F. Kato and S. Lee. Haptic device using flexible sheet and air jet for presenting virtual lumps under skin. In Proceedings. *IEEE/RSJ Intl Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1749-1754, 2009.
- [5] J. M. Romano and K. J. Kuchenbecker. The AirWand: Design and Characterization of a Large-Workspace Haptic Device. In Proceedings, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1461-1466, 2009.
- [6] M. Bianchi, J. C. Gwilliam, A. Degirmenci, and A. M. Okamura. Characterization of an Air Jet Haptic Lump Display. In *33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 3467-3470, 2011.
- [7] J.W. Gauntner, J.N.B. Livingwood, P. Hrycak, Survey of literature on flow characteristics of a single turbulent jet impinging on a flat plate, NASA TN D-5652, 1970.
- [8] R. Stephane. Aerothermal experimental contribution for an acoustically forced impinging air jet. *PhD thesis*, university of Poitiers, Jun 2011.
- [9] A. G. Gescheider. Psychophysics: The Fundamentals. *Lawrence Erlbaum Associates Inc.*, Mahwah, New Jersey, 3rd edition, 1997.
- [10] W. H. Ehrenstein and A. Ehrenstein. Psychophysical methods. U. Windhorst, H. Johansson. *Modern Techniques in Neuroscience Research*. Berlin, New York, Springer, 1211-1241, 1999.
- [11] L. G. Allan, S. D. Hannah, M. J. C. Crump, and Shepard Siegel. The Psychophysics of Contingency Assessment. *Journal of Experimental Psychology*, 137:226–243, 2008.
- [12] C. Kaernbach. Simple adaptive testing with the weighted up–down method. *Perception & Psychophysics*, 49: 227-229, 1991.
- [13] S.C Masin, V. Zudini, and M. Antonelli. Alternative derivations of Fechner’s law, *Journal of the History of Behavioral Sciences*, 45:56-65, 2009.

Titre : Communication affective médiée via une interface tactile

Mots clés : émotion, tactile, jet d'air, expression faciale, voix, communication médiée

Résumé : L'objectif de cette thèse est de proposer et d'étudier une technique de stimulation tactile sans contact avec des systèmes mécaniques pour médier des signaux affectifs. Sur la base de l'état de l'art des interfaces haptiques, nous avons proposé une stratégie de stimulation tactile basée sur l'utilisation d'un jet d'air mobile. Nous avons conduit une étude expérimentale pour comprendre les relations entre les caractéristiques physiques de la stimulation tactile par jet d'air et la perception affective des utilisateurs. Les résultats mettent en évidence les effets principaux de l'intensité et de la vitesse du mouvement du jet d'air sur l'évaluation subjective mesurée dans l'espace affectif (à savoir, la valence, l'arousal et la dominance).

La communication des émotions est clairement multimodale. Nous avons conduit deux études expérimentales pour examiner la combinaison de la stimulation tactile par jet d'air avec les expressions faciales et vocales pour la perception de la valence. Ces expérimentations ont été conduites dans un cadre théorique et expérimental appelé théorie de l'intégration de l'information. Ce cadre permet de modéliser l'intégration de l'information issue de plusieurs sources en employant une algèbre cognitive. Les résultats de nos travaux suggèrent que la stimulation tactile par jet d'air peut être utilisée pour transmettre des signaux affectifs dans le cadre des interactions homme-machine. Les modèles perceptifs d'intégration bimodales peuvent être exploités pour construire des modèles informatiques permettant d'afficher des affects en combinant la stimulation tactile aux expressions faciales ou à la voix.

Title: Affective Mediated Communication via a Tactile Interface

Keywords: emotion, tactile, air jet, facial expression, voice, mediated communication

Abstract: This thesis proposes and study a non-intrusive tactile stimulation technique for communicating affective messages. Based on the state of the art of the haptic interfaces, we proposed a strategy of tactile stimulation based on air jet. We conducted an experimental study to understand the relationships between the physical characteristics of the air jet tactile stimulation and the emotional perception of the users. The results highlight the main effects of the intensity and the speed of movement of the air jet on the subjective perception assessed using the dimensional affective space (namely, the Valencia, the arousal and dominance).

Communication of emotions is clearly multimodal. We conducted two experimental studies to examine the combination of tactile stimulation by air jet with facial and vocal expressions for perception of the Valence. These experiments were conducted within a framework called information integration theory. This framework allows to model the integration of information from multiple sources using a cognitive algebra. Our work suggests that the tactile stimulation by air jet can be used to transmit emotional signals in human-machine interactions setups. The perceptual bimodal integration models can be exploited to design computational models in order to display affects by combining tactile stimulation with facial expressions or the voice.

