



Communication kinesthésique des émotions dans un contexte d'interaction homme-machine

Yoren Gaffary

► To cite this version:

Yoren Gaffary. Communication kinesthésique des émotions dans un contexte d'interaction homme-machine. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Paris Sud - Paris XI, 2015. Français. NNT : 2015PA112097 . tel-01191502

HAL Id: tel-01191502

<https://theses.hal.science/tel-01191502>

Submitted on 4 Sep 2015

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.

UNIVERSITÉ PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE 427
INFORMATIQUE PARIS-SUD
LABORATOIRE : LIMSI-CNRS

THÈSE DE DOCTORAT

INFORMATIQUE

par

Yoren GAFFARY

**Communication kinesthésique
des émotions dans un contexte
d'interaction homme-machine**

Date de soutenance : 18/06/2015

Composition du jury :

Directeur de thèse : Mehdi AMMI
Co-encadrant : Jean-Claude MARTIN
Rapporteurs : Dirk HEYLEN
Anatole LÉCUYER
Examineurs : Nadine COUTURE
Michel-Ange AMORIM

Maître de conférence (LIMSI-CNRS, Orsay)
Professeur (LIMSI-CNRS, Orsay)
Professeur (Univ. of Twente, Pays-Bas)
Directeur de Recherche (INRIA, Rennes)
Professeur (ESTIA, Bidart)
Professeur (Univ. Paris-Sud), Orsay

Résumé

La communication des émotions s'effectue naturellement par le biais de différentes modalités, comme par exemple les expressions faciales et le toucher. L'informatique affective cherche à intégrer la composante émotionnelle dans les interactions homme-machine. Cependant, le toucher, qui est un puissant vecteur d'émotions, reste peu exploité.

L'objectif de cette thèse est d'étudier les paramètres qui influencent l'expression et la perception des émotions dans la modalité kinesthésique dans un contexte d'interaction homme-machine.

Dans un premier temps, cette thèse considère l'expression kinesthésique liée à la perception physique de forces et de mouvements d'un ensemble d'émotions actées sémantiquement proches. Sur la base des résultats de cette première étude, un couplage des expressions kinesthésiques typiques de différentes émotions avec des expressions faciales exprimées par un avatar est proposé afin d'étudier l'influence de la modalité kinesthésique dans la perception d'une expression multimodale d'émotion. Enfin, cette thèse va au-delà de ces émotions actées en abordant dans une dernière étude le cas de l'expression et de la perception d'un état affectif de stress spontané.

Ces différentes expérimentations ont considéré différents dispositifs matériels pour la communication kinesthésique : des dispositifs de type Geomagic Touch ainsi qu'un dispositif de rendu de pression développé spécifiquement dans le cadre de cette thèse.

Les résultats de ces travaux ont de multiples applications pratiques. Premièrement, une meilleure intégration de la modalité kinesthésique en contexte virtuel, qu'il s'agisse de communication humain-humain à distance ou d'immersion dans les jeux vidéo. Cette thèse ouvre également la voie à la détection automatique d'états affectifs exprimés spontanément par la modalité kinesthésique.

Mots-clés : Interaction kinesthésique, Expression des émotions, Perception des émotions

Abstract

The communication of emotions use several modalities of expression, as facial expressions or touch. The affective computing field aims to integrate an emotional component in human-computer interactions. Even though touch is an effective vector of emotions, is remains little explored.

This thesis aims to investigate the kinesthetic features of the expression and perception of emotions in a human-computer interaction setting.

Firstly, this thesis considers the kinesthetic expression and perception of semantically close and acted emotions. Secondly, this thesis proposes a facial-kinesthetic combination of expressions of several close emotions. This aims to investigate the influence of the kinesthetic modality on the multimodal perception of emotions. Finally, this thesis goes beyond acted emotions by focusing on the expression and perception of a spontaneous state of stress.

Those different experiments used various devices for kinesthetic interaction, as Geomagic Touch devices and a pressure rendering device developed for this thesis.

Results have multiple applications. Firstly, a better integration of the kinesthetic modality in virtual settings, from human-human remote communications to immersion in video games. This thesis also paves the way for an automatic recognition of affective states expressed by the kinesthetic modality.

Keywords : Kinesthetic interaction, expression of emotions, perception of emotions

Publications

Soumissions

Yoren Gaffary, David Antonio Gómez Jáuregui, Jean-Claude Martin et Mehdi Ammi. Haptic Expression and Perception of Spontaneous Stress. Dans : *International Journal on Human-Computer Studies*. IF = 1.165.

Yoren Gaffary, David Antonio Gómez Jáuregui, Jean-Claude Martin et Mehdi Ammi. Approach-Avoidance Behavior in a Haptic Task Inducing Spontaneous Stress. Dans : *Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction MeTA workshop*.

Yoren Gaffary, Jean-Claude Martin et Mehdi Ammi. Perception of Congruent Facial and Haptic Expressions of Emotions. Dans : *Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction MeTA workshop*.

Journaux internationaux

Yoren Gaffary, Victoria Eyharabide, Jean-Claude Martin et Mehdi Ammi. The Impact of Combining Kinesthetic and Facial Expression Displays on Emotion Recognition by Users. Dans : *Special Issue of the International Journal on Human-Computer Interaction, entitled "Does Touch Matter ? : The Effects of Haptic Visualization on Human Performance, Behavior and Perception"*, 30(11), 2014. IF = 0.72.

Yoren Gaffary, Victoria Eyharabide, Jean-Claude Martin et Mehdi Ammi. Clustering Approach to Characterize Haptic Expressions of Emotions. Dans : *ACM Transactions on Applied Perception*, 10(4), art. 21, 2013. IF = 1.05.

Conférences internationales

Mehdi Ammi, Virginie Demulier, Sylvain Caillou, **Yoren Gaffary**, Yacine Tsalamlal, Jean-Claude Martin et Adriana Tapus. Haptic Human-Robot Interaction in a Handshaking Social Protocol. Dans : *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages ??, Portland, Oregon, USA, 2015. AR : 25 %.

Florimond Guéniat, Julien Christophe, **Yoren Gaffary**, Adrien Girard et Mehdi Ammi. Tangible Windows for a free Exploration of Wide 3D Virtual Environment. Dans : *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 115–118, Singapore, 2013. 115-118

Yoren Gaffary, Victoria Eyharabide, Jean-Claude Martin, et Mehdi Ammi. Comparison of Statistical Methods for the Analysis of Affective Haptic Expressions. Dans : *International Workshop on Haptic and Audio Interaction Design*, pages 69–78, Daejeon, Korea, 2013.

Posters internationaux

Yoren Gaffary, Jean-Claude Martin et Mehdi Ammi. Perception of Congruent Facial and Haptic Expressions of Emotions. Dans : *ACM Symposium on Applied Perception*, Vancouver, Canada, 2014. AR : 40 %.

Yoren Gaffary, Jean-Claude Martin et Mehdi Ammi. Haptic Expressions of Stress During an Interactive Game. Dans : *Eurohaptics*, pages 266-274, Versailles, France, 2014. AR : 65 %.

Yoren Gaffary, Victoria Eyharabide, Jean-Claude Martin, et Mehdi Ammi. Comparison of Statistical Methods for the Analysis of Affective Haptic Expressions. Dans : *ACM Symposium on Applied Perception*, page 128, Los Angeles, USA, 2012. AR : 53 %

Florimond Guéniat, **Yoren Gaffary**, Luc Pastur, et Mehdi Ammi. Haptic stimulus for the discrimination between intrinsic properties of dynamic systems. Dans : *EuroHaptics*, pages 37–42, Tampere, Finland, 2012.

Workshops internationaux

Yoren Gaffary, Jean-Claude Martin et Mehdi Ammi. How to Collect Haptic Expressions of Spontaneous Emotions? Methodological considerations. Dans : *Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction MeTA workshop*, pages 776–779, Geneva, Switzerland, 2013.

À ma mère,

Mme. Nicole Gaffary,

Qui nous a quitté lors de mon doctorat.

Sans elle, je n'aurais sûrement jamais fait cette thèse.

Je lui avais promis que je la lui dédierai.

Voilà qui est chose faite désormais.

Remerciements

Force m'est de constater que ces remerciements constituent la partie la plus difficile à écrire de ce manuscrit. Il y a tant de gens que j'aimerais remercier, et ces quelques mots ne pourront vraiment leur rendre justice.

Il me semblait logique de commencer par les remerciements que je souhaitais adresser à mes encadrants. Jean-Claude Martin et Mehdi Ammi, c'est vous qui avez fait de moi le docteur que je suis devenu. Mais à bien y réfléchir, je ne peux décemment pas considérer Mehdi en simple encadrant. Il fut également pour moi un soutien et un ami précieux, et j'eus une grande chance de l'avoir comme directeur.

Au déjà de mes encadrants, c'est tout un laboratoire et ses occupants qui m'ont accueilli en leur sein. J'aimerais donc remercier mes collègues : Florimond, Matthieu, Jean, Adrien, Yacine, Paul, etc., qui ont rendu mon temps passé au laboratoire des plus agréables.

J'ai pu aussi apprécier le soutien que mes amis, humains ou poneys, ont su m'apporter. Par leur écoute et leur bonne humeur, ils ont été pour moi un solide réconfort tout au long de ce travail. Ils sont très nombreux, je préfère ne pas citer de noms par peur d'en oublier. Et puis zut ! Citons au moins Thomas, Thibaut, Roven, Jean, Kayvan, Nicolas, Axel, Joris et Benjamin pour les plus proches.

Pour terminer, je tiens à remercier ma famille, qui ont partagé mes repas, mes lectures et un peu tout en fait. Deux personnes tout particulièrement. D'abord mon frère, qui me soutient depuis toujours et qui a eu le courage de relire ce manuscrit. Ma mère ensuite, qui m'a donné la force d'arriver jusqu'ici, et l'envie de continuer au-delà.

Table des matières

Introduction générale	1
1 La communication affective	1
1.1 Un besoin de longue date	1
1.2 La communication d'aujourd'hui	1
1.3 Présentation du domaine de recherche	2
2 Contribution de la thèse	3
2.1 Problématique et objectifs scientifiques	3
2.2 Approche proposée	4
1 Étude bibliographique	7
1.1 Introduction	7
1.2 L'émotion : composante majeure de la communication non-verbale	8
1.2.1 Définitions et Modèles	8
1.2.2 Les expressions non-verbales des émotions	12
1.2.3 Induction expérimentale des émotions	13
1.2.4 Mesurer les réactions émotionnelles	16
1.2.5 Informatique affective	19
1.3 Communication affective via la modalité haptique	21
1.3.1 La modalité haptique	22
1.3.2 Le toucher social et affectif	25
1.3.3 Interfaces homme-machine dédiées à la communication homme-homme des émotions par la modalité haptique	29
1.4 Conclusion	34
2 L'expression kinesthésique des émotions actées	36
2.1 Introduction	36
2.2 Contexte de l'étude et objectifs	37
2.2.1 Travaux existants	37
2.2.2 Objectifs	38
2.3 Étude des expressions kinesthésiques des émotions	39
2.3.1 Hypothèses	39
2.3.2 Méthode expérimentale	39
2.3.3 Résultats	45
2.3.4 Analyse et Discussion	48
2.4 Analyses alternatives	51
2.4.1 Analyse en composante principale	51
2.4.2 Clustering	53
2.5 Proposition d'une nouvelle méthode	55
2.5.1 Principe global de la méthode d'analyse	55
2.5.2 Résultats	58
2.5.3 Avantages de la méthode proposée	61
2.6 Conclusion	63

2.6.1	Résumé des travaux	63
2.6.2	Synthèse et perspectives	63
3	Reconnaissance des émotions actées avec expressions faciales et kinesthésiques	64
3.1	Introduction	65
3.2	Contexte de l'étude et objectifs	65
3.2.1	Travaux existants	65
3.2.2	Objectifs	67
3.3	Étude de la reconnaissance d'émotions actées dans des expressions faciales	67
3.3.1	Hypothèses	67
3.3.2	Méthode expérimentale	67
3.3.3	Résultats	69
3.3.4	Analyse des résultats et Discussion	71
3.4	Étude de la reconnaissance d'émotions actées dans des expressions kinesthésiques	71
3.4.1	Pré-sélection statistique	72
3.4.2	Méthode expérimentale	73
3.4.3	Résultats	74
3.5	Étude de la reconnaissance des émotions actées dans des expressions multimodales	77
3.5.1	Hypothèses	78
3.5.2	Méthode expérimentale	79
3.5.3	Résultats et Analyses	83
3.6	Conclusion	91
3.6.1	Résumé des travaux	91
3.6.2	Synthèse et perspectives	92
4	Expression et perception kinesthésique d'un stress spontané	94
4.1	Introduction	95
4.2	Contexte de l'étude et objectifs	95
4.2.1	Travaux existants	95
4.2.2	Objectifs	97
4.3	Étude de protocoles pour la collecte d'expressions kinesthésiques d'états affectifs spontanés	98
4.3.1	Contraintes de la modalité haptique	98
4.3.2	Exploration de protocoles expérimentaux	99
4.3.3	Tâche sélectionnée : conduite	104
4.4	Étude de l'expression haptique d'un état de stress spontané	105
4.4.1	Hypothèses	105
4.4.2	Méthode expérimentale	106
4.4.3	Résultats	111
4.4.4	Analyse et Discussion	113
4.5	Étude de la perception haptique de la composante cinématique d'expressions de stress	115
4.5.1	Hypothèses	115
4.5.2	Méthode expérimentale	116
4.5.3	Résultats	119
4.5.4	Analyse et Discussion	120
4.6	Étude de la perception haptique de la composante en intensité de force d'expressions de stress	121
4.6.1	Hypothèses	121
4.6.2	Méthode expérimentale	121
4.6.3	Résultats	124
4.6.4	Analyse et Discussion	126
4.7	Conclusion	126

4.7.1	Résumé des travaux	126
4.7.2	Synthèse et perspectives	126
Conclusion générale		128
1	Rappel des objectifs de recherche	128
2	Contribution de cette thèse	129
2.1	L'expression kinesthésique des émotions actées	129
2.2	Reconnaissance multimodale des émotions actées	129
2.3	Communication kinesthésique d'un stress spontané	130
3	Perspectives de recherche	130
Glossaire		134
A Questionnaires pour l'évaluation de la réponse émotionnelle		135
B Présentation des dispositifs haptiques utilisés		148
B.1	Geomagic Touch et Geomagic Touch X	148
B.2	Capteur de pression	150
B.3	Restitution de pression	151
B.3.1	Conception	151
B.3.2	Réalisation matérielle	152
B.3.3	Mise en service	153
C Mesures collectées		155
Bibliographie		155

Table des figures

1	Le contact physique pour s'exprimer est naturel chez l'homme et certains animaux. Il communique émotions, confère présence, soutien moral, motivation et augmente l'estime de soi (Guéguen (2004); Bailenson et Yee (2007); Chung et al. (2009)).	2
2	Trois stratégies haptiques différentes pour la communication en Interaction Homme-Machine (IHM) des émotions. À ce jour, peu d'études parviennent à restituer la sensation d'un contact physique humain-humain authentique.	3
1.1	Deux modèles dimensionnels des émotions.	10
1.2	Modèle des composantes de Scherer (reproduit d'après Sander et al. (2005)).	11
1.3	Stimuli visuels pour induire des émotions.	15
1.4	L'expérience émotionnelle d'après Scherer (2004)	17
1.5	Deux méthodes d'évaluations des émotions basées sur des modèles dimensionnels.	18
1.6	Nombre d'études consacrées à la modalité haptique dans PsychINFO d'après Hertenstein et al. (2006b)	22
1.7	La perception tactile et kinesthésique.	24
1.8	Utilisation courante des dispositifs haptiques	28
1.9	Téléphones mobiles augmentés pour la communication affective via la modalité haptique.	30
1.10	Dispositifs augmentés pour la communication affective	32
1.11	Robots zoomorphiques pour l'interaction affective par le toucher.	33
1.12	Dispositifs fixes permettant de communiquer des émotions.	34
2.1	Plateforme expérimentale de collecte d'expression kinesthésiques.	40
2.3	Utilisateur interagissant avec le Geomagic Touch X.	44
2.4	Analyse en Composantes Principales (ACP) à deux facteurs sur les données du corpus.	52
2.5	Deux méthodes de comparaison de paramètre.	57
3.1	Expressions faciales de MARC.	68
3.2	Écran pour les sujets	70
3.3	Document donné au sujet au début de l'expérimentation	75
3.4	Valeur de $score_3$ pour chacune des expressions de l'étude	77
3.5	Expression kinesthésique ayant le plus haut score pour chaque émotion exprimée	78
3.6	Plateforme expérimentale couplant expressions faciales et kinesthésiques.	80
3.7	Procédure expérimentale pour l'évaluation de la reconnaissance et de la perception d'expressions multimodales d'émotions.	83
3.8	Taux de reconnaissance des émotions selon la modalité d'expression.	84
3.9	Taux de reconnaissance par émotion.	85
3.10	Distances entre les perceptions moyennes des émotions selon la modalité d'expression. La distance entre les perception en modalité faciale et en modalité kinesthésiques (courbes jaunes) est la plus importantes ($dist(F, K) = 0.50$ en moyenne, contre $dist(F/FK) = 0.30$ et $dist(K, FK) = 0.31$).	87
3.11	Taux de reconnaissance en fonction des dimensions des émotions.	90
3.12	Avis subjectifs sur le couplage facial-kinesthésique	92
4.1	Différents protocoles testés pour l'induction d'un état affectif, incluant une collecte de l'expression kinesthésique via un Geomagic Touch.	103
4.2	Tâche de conduite/évitement d'obstacles.	104

4.3	Plateforme expérimentale pour la collecte d'expressions kinesthésiques issues d'un stress spontané.	107
4.4	Comportement d'approche-évitement durant l'induction de stress.	112
4.5	Conductance électrodermale du premier sujet ayant passé l'expérimentation.	112
4.6	Mesures calculé pour avant, pendant et après stimulus.	114
4.7	Sujet interagissant avec la plateforme expérimentale.	117
4.8	Corrélations entre les mesures Ms1 , Ms2 et les différences objectives dans les forces exercées de chaque couple présenté.	120
4.9	Différences de perception dans les vitesses moyennes et la perception du stress en fonction de la condition expérimentale. Les sujets ont perçu le stimulus <i>B</i> avec une valeur plus élevée dans la condition C1 pour les deux mesures (réciproquement, le stimulus <i>A</i> pour C2). . . .	120
4.10	Sujet interagissant avec la plateforme expérimentale. Il perçoit une intensité de force sur son pouce à l'aide du dispositif ANGEL fixé à la table.	124
4.11	Différences de perception dans les forces exercées et la perception du stress en fonction de la condition expérimentale. Les sujets ont perçu le stimulus <i>B</i> avec une valeur plus élevée dans la condition C1 pour les deux mesures (réciproquement, le stimulus <i>A</i> pour C2).	125
4.12	Corrélations entre les mesures Ms1 , Ms2 et les différences objectives dans les forces exercées de chaque couple présenté.	125
A.1	Formulaire de collecte des informations de bases sur les sujets concernant nos différentes études. En plus de ces informations, les noms et prénoms des sujets sont collectés, mais remplacés par des numéros d'anonymat lors des analyses.	136
A.2	Formulaire utilisateur pour l'étude des expressions kinesthésiques des émotions, présentée en 2.3. Ce formulaire permet au sujet d'enregistrer une expression kinesthésique puis de l'évaluer. . . .	137
A.3	Formulaire utilisateur pour l'étude de la perception des émotions avec des expressions faciales, présentée en 3.3. Ce formulaire permet au sujet de jouer une expression faciale, puis de reporter l'émotion qu'il a perçu dans cette expression.	138
A.4	Formulaire utilisateur pour l'étude de la perception des émotions avec des expressions kinesthésiques, présentée en 3.4. Ce formulaire permet au sujet de reporter quelles émotions il a perçu dans l'expression kinesthésique présentée, en cochant les labels des émotions concernées ainsi qu'une évaluation dans l'espace Plaisir-Activation-Dominance (PAD), chaque dimension étant évaluée sur une échelle de Likert à 5 points.	139
A.5	Formulaire utilisateur pour l'étude de la perception des émotions avec des expressions multimodales, présentée en 3.5. Ce formulaire permet au sujet de reporter quelles émotions il a perçu dans l'expression multimodale présentée, en cochant les labels des émotions concernées ainsi qu'une évaluation dans l'espace PAD, chaque dimension étant évaluée sur une échelle de Likert à 5 points. Le sujet reporte également son niveau de confiance dans sa réponse. . . .	140
A.6	Formulaire utilisateur pour l'évaluation de l'expressivité et du niveau de présence ressenti dans des expressions (faciales, kinesthésiques ou les deux couplées) lors de l'étude présentée en 3.5. Chaque évaluation est effectuée sur une échelle de Likert à 5 points.	141
A.7	Formulaire utilisateur pour l'évaluation de la modalité d'expression préférée et de l'intérêt de la modalité kinesthésique pour exprimer des émotions lors de l'étude présentée en 3.5. . . .	142
A.8	Formulaire d'autorisation pour l'enregistrement des données comportementales et physiologiques lors de l'étude 4.4.	143
A.9	Formulaire State-Trait Anxiety Inventory (STAI) pour évaluer l'anxiété habituelle du sujet, utilisée lors de l'étude présenté en 4.4.	144
A.9	Formulaire d'évaluation subjectif de stress induit proposé au sujet en fin de l'étude présentée en 4.4. Ce formulaire est inspiré de l'Echelle de mesure du stress perçu (PSS) et de l'Echelle différentielle des émotions (DES).	146
A.10	Formulaire d'évaluation d'expressions kinesthésiques de stress par des sujets pour l'étude présentée en 4.5.	146
A.11	Formulaire d'évaluation de pressions exercées exprimant du stress par des sujets pour l'étude présentée en 4.6.	147
B.1	Augmentation d'un Geomagic touch par un capteur d'intensité de force exercée.	150
B.2	Principe de restitution d'une intensité de force. une pression : une affaire de force.	151
B.3	Le dispositif ANGEL.	152

C.1	Boîte à moustaches des paramètres principaux extraits des expressions collectées lors de l'étude présentée en 2.3. Plus la boîte correspondant à une émotion est de couleur claire, plus sa valeur est statistiquement élevée par rapport aux autres émotions ($p < 0.05$).	157
-----	---	-----

Liste des tableaux

1	Résumé des différentes études menées et des principaux résultats obtenus.	5
1.1	Mécanorécepteurs liés aux perceptions tactiles et kinesthésiques (reproduit d'après Dougherty (1997)).	23
2.1	Les quatre paires d'émotions étudiées.	41
2.2	Phrases proposées de mise en contexte des émotions.	45
2.3	Nombre d'expressions retenues par émotion étudiée	45
2.4	Différences entre les émotions par Analyse de Variance (ANOVA)	46
2.5	Moyennes et écarts-types pour l'ensemble des mesures et émotions étudiées.	47
2.6	Distance entre les barycentres calculés par ACP	52
2.7	Constitution de chaque cluster en pourcentage des expressions de chaque émotion qu'il contient. Les émotions les plus représentatives de chaque cluster sont mises sur fond noir. .	53
2.8	Répartition en pourcentage de chaque émotion dans les clusters. Les clusters contenant le plus d'expressions d'une émotion particulière sont mis sur fond noir.	54
2.9	Avantages et limitations de chaque méthode d'analyse présentée.	54
2.10	Caractéristiques des expressions discriminant les clusters.	59
3.1	Taux de reconnaissance en pourcentage des émotions	71
3.2	Paramètres des expressions sélectionnées.	77
3.3	Moyenne et écart-type des évaluations PAD par les sujets	88
3.4	Comparaison des perceptions monomodales et multimodales	89
4.1	Valeurs moyennes et écart-types des différentes mesures pour les périodes correspondants à avant, pendant et après le stimulus stressant. Les trois dernières colonnes correspondent aux résultats des tests statistiques effectués entre ces différentes périodes.	113
B.1	Caractéristiques techniques des Geomagic Touch.	148

Introduction générale

1 La communication affective

1.1 Un besoin de longue date

Les êtres humains, en tant qu'animaux sociaux, passent une importante partie de leurs journées à communiquer entre eux. D'après le petit Robert, la communication est le passage de messages entre un sujet émetteur et un sujet récepteur au moyen de signes, de signaux. On pense généralement que cette transmission s'effectue par le langage verbal.

C'est pourtant par le ton de la voix, la gestuelle et les expressions faciales que l'homme s'exprime le plus souvent ([Mehrabian et Ferris \(1967\)](#)). Bien que nous n'y prêtons pas toujours attention, ces messages non-verbaux que nous envoyons et recevons en permanence constituent une importante partie de ce qu'on exprime. Ils influencent nos relations avec nos partenaires, donnant de précieuses informations sur nos intentions, notre personnalité et notre état d'esprit actuel. Ces messages non-verbaux sont l'assurance d'une bonne communication et nous permettent d'exprimer nos besoins vitaux, notamment par l'expression de nos émotions ([Argyle \(1988\)](#)).

Avec la complexité des moyens de transports et de communication, les communications en face à face se font de plus en plus rares, réduisant le nombre de nos contacts visuels et physiques. Le besoin de continuer à communiquer affectivement via une expression non-verbale est pourtant présent, comme le suggère l'utilisation intensive d'émoticônes apparues dès les premières communications textuelles grand public ([Tetteroo \(2008\)](#); [Lo \(2008\)](#)). Partager ses émotions est nécessaire au bien-être de chacun, notamment pour exprimer à son partenaire considération et affection, deux besoins fondamentaux de l'être humain. Dans ces travaux, nous restreindrons la notion de communication à l'expression homme-machine et la perception machine-homme d'un état affectif.

1.2 La communication d'aujourd'hui

Le développement des moyens de communication informatiques et mobiles permet de plus en plus de diminuer virtuellement la distance physique. On peut par exemple aujourd'hui se voir par webcam ou s'entendre par micro-casque. Cependant, si notre ordinateur personnel relaye ces informations non-verbales, lui ne les comprend pas. L'ordinateur ne comprend que les mots issus d'un langage verbal bien défini. Il est ironique de constater que la technologie qui prend



FIGURE 1 : Le contact physique pour s'exprimer est naturel chez l'homme et certains animaux. Il communique émotions, confère présence, soutien moral, motivation et augmente l'estime de soi (Guéguen (2004); Bailenson et Yee (2007); Chung et al. (2009)).

aujourd'hui un rôle de plus en plus important dans nos communications ne puisse pas percevoir la majeure partie de l'information qu'on émet. C'est l'une des raisons pour lesquelles naquit l'informatique affective.

Cette discipline est une branche de « l'informatique qui traite, simule ou influence les émotions ou les autres phénomènes affectifs » (Picard (1997)). Par exemple, grâce aux évolutions apportées par l'informatique affective, on utilise aujourd'hui des humains virtuels afin de restituer des expressions gestuelles ou faciales d'émotions. L'informatique affective oublie cependant souvent un canal majeur de l'expression de l'émotion. Alors que les distances physiques entre les personnes augmentent, les être humains ont peu l'occasion d'interagir entre eux par le toucher.

Pourtant, comme nous le rappelle la figure 1, toucher pour communiquer affectivement est naturel chez l'homme. Il aide le nourrisson à communiquer avec sa mère, et nous suit tout au long de notre vie : poignées de mains, mains posées sur l'épaule, caresses pour les amoureux. Ces contacts physiques témoignent sympathie, affection et rassurent, tandis qu'en être privé trop longtemps génère stress et anxiété (Hertenstein (2009)). Ce n'est ainsi pas surprenant que le récent salon « Cuddle Up To Me », proposant des séances de câlins à ses clients, connaît un départ florissant (Hooton (2014)). Cette importance du toucher dans la communication affective impacte jusqu'au langage verbal, comme le suggère des expressions courantes telles que « *on reste en contact ?* » ou « *j'en suis touché* ».

1.3 Présentation du domaine de recherche

Les travaux de cette thèse se situent à la rencontre de deux domaines de recherche. Le premier est celui de l'expression non-verbale de l'émotion, tandis que le second est l'IHM.

Il faudra attendre les années 2000 avec des études comme celles de Bailenson et al. (2007) pour que naissent les premières recherches sur l'utilisation du toucher en IHM pour communiquer des émotions. Ce manque d'études de l'expression de l'émotion par le toucher peut s'expliquer de différentes manières. D'abord, par le fait que les normes culturelles et sociales de certains

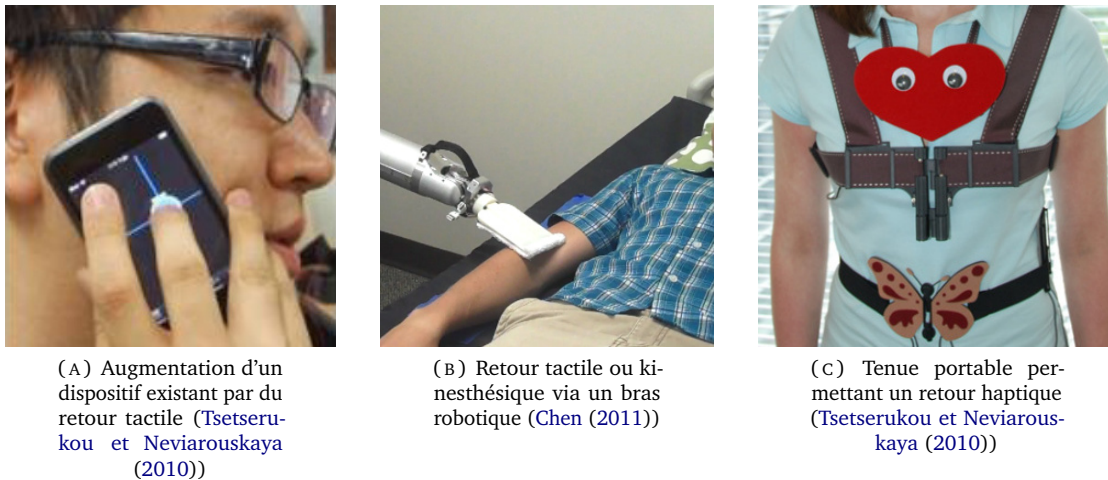


FIGURE 2: Trois stratégies haptiques différentes pour la communication en IHM des émotions. À ce jour, peu d'études parviennent à restituer la sensation d'un contact physique humain-humain authentique.

pays restreignent les contacts physiques entre les personnes (Harris (2002)). Ce constat ne doit cependant pas nous faire oublier le rôle du toucher dans la communication affective. Ensuite, peu d'interfaces homme-machine ont été développées pour le toucher affectif, bien que ceci soit en train de changer (voir figure 2).

Le domaine de la communication des émotions par la modalité haptique prend cependant peu à peu sa place dans le milieu académique. En 2013, la conférence *Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII)* dédiée aux émotions inclue dans son programme un workshop intitulé « Mediated Touch and Affect ». Le milieu industriel et économique commence également à s'intéresser au toucher affectif. En 2014, la conférence internationale Eurohaptics rajoute à ses thématiques d'intérêt « Affective Haptics ».

2 Contribution de la thèse

2.1 Problématique et objectifs scientifiques

Cette thèse se situe dans un contexte d'interaction affective par la modalité kinesthésique, qui fait partie de la modalité haptique (ou tactilo-kinesthésique). Alors que la composante tactile de l'haptique se réfère aux perceptions situées au niveau de la peau, comme pour la texture d'un objet, la composante kinesthésique se rapporte quand à elle à la perception du corps dans l'espace et de l'effort musculaire.

Les études existantes abordent principalement la perception tactile. Pourtant, les possibilités d'interactions avec cette modalité sont relativement limitées. Par exemple, une grande partie des études du domaine utilisent exclusivement des vibrations (Dijk et al. (2009); Huisman et al. (2013)). La modalité kinesthésique est quant à elle étroitement couplée à notre utilisation sociale du toucher : poignée de mains, accolades etc.

Nous pourrions résumer l'ensemble de nos objectifs en une phrase : comment communique-t-on dans un contexte d'interaction homme-machine une émotion par la modalité kinesthésique ? La notion de « communiquer » intègre ici deux composantes. D'une part, l'expression, soit ici l'encodage de l'émotion dans une expression affective, transmise d'un humain vers un dispositif d'interaction. D'autre part, la perception, c'est à dire ici le décodage de l'émotion dans l'expression restituée depuis un dispositif d'interaction vers un humain. Ces deux étapes doivent être prises en compte dans la communication de l'émotion.

La notion d'émotion peut quant à elle faire référence à deux aspects. Généralement, les travaux sur la modalité haptique traitent d'émotions actées, c'est à dire pour lesquelles les personnes les expriment volontairement et sur demande. Il existe aussi des émotions à caractère plus spontané, comme celles dont nous faisons quotidiennement l'expérience en milieu naturel ([Klaus R. Scherer, Tanja Banziger et Roesch \(2010\)](#)).

Notre objectif principal est donc de tenter de comprendre sur quels paramètres de l'expression une émotion (actée ou spontanée) peut être communiquée par la modalité kinesthésique dans un contexte d'IHM. Ainsi, plutôt que de proposer de meilleurs dispositifs pour la communication affective, nous nous focalisons sur les paramètres kinesthésiques pertinents pour exprimer et percevoir des émotions.

2.2 Approche proposée

Dans une première étape, nous nous sommes focalisés sur l'expression kinesthésique des émotions actées. Nous avons commencé par créer un corpus d'expressions kinesthésiques d'un groupe d'émotions. Ces émotions avaient pour particularité d'être sémantiquement proches et donc potentiellement difficiles à discriminer. Cette étape visait à identifier les invariants et paramètres discriminants des expressions kinesthésiques des émotions abordées.

Sur la base de ces résultats, nous avons abordé dans la deuxième étape de nos travaux la perception des émotions avec des expressions kinesthésiques. Il s'agissait ici d'étudier l'apport d'un retour kinesthésique à une perception d'émotions sémantiquement proches combiné avec les expressions faciales affichées par un agent virtuel. Cette partie vise à traiter à la fois des aspects objectifs (taux de reconnaissance) et subjectifs (préférences utilisateur) de l'intérêt de cette intégration de la modalité kinesthésique dans la communication des émotions.

Enfin, nous avons abordé dans la troisième étape de nos travaux l'expression et la perception d'un état de stress naturel. Cette partie a visait à tester la possibilité de communiquer un état affectif naturel avec la modalité kinesthésique.

Ces différentes étapes de travail nous ont amenés à proposer des outils d'étude de la communication kinesthésique des émotions dans des contextes d'interactions. Le tableau 1 présente un résumé des travaux réalisés.

Les résultats de ces travaux visent de multiples applications pratiques. On peut citer en premier lieu l'amélioration de la communication en IHM. Ces résultats peuvent également servir pour améliorer l'immersion dans les jeux vidéos, faciliter l'apprentissage des étudiants dans des plateformes d'enseignement ou encore améliorer l'assistance à la personne en prenant en compte les aspects affectifs des utilisateurs.

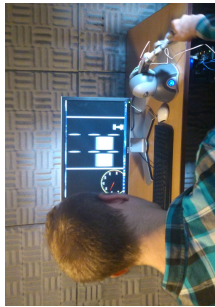
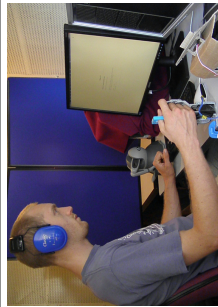
Étude	Objectifs	Résumé de l'étude	Illustration
Chap. 2 : étude de l'expression kinesthésique d'émotions actées.	Étudier l'expression kinesthésique d'émotions proches. Proposer une méthode d'analyse adaptée aux expressions kinesthésiques.	Collecte d'expressions kinesthésiques d'émotions actées via un dispositif Geomagic Touch X.	
Chap. 3 : étude de la perception faciale kinesthésique d'émotions actées.	Étudier l'influence de la multimodalité sur les taux de reconnaissance. Déterminer sur quelle modalité les utilisateurs perçoivent le mieux les émotions.	Étude de la reconnaissance/perception via une plateforme de présentation de stimuli multimodaux. Utilisation d'un Geomagic Touch X et un agent virtuel pour communiquer des émotions.	
Chap. 4 : étude de l'expression kinesthésique d'un stress spontané.	Élaborer un protocole de collecte d'expressions haptiques issues d'émotions spontanées. Étudier l'expression kinesthésique d'un stress spontané	Réalisation d'une plateforme logicielle basée sur un jeu utilisant l'haptique. Induction de stress et collecte d'expressions kinesthésiques.	
Chap. 4 : étude de la perception kinesthésique d'un stress spontané.	Déterminer la possibilité de percevoir du stress dans une expression kinesthésique. Déterminer sur quels paramètres les utilisateurs le perçoivent.	Évaluation subjective de paramètres kinesthésiques par des sujets auxquelles des stimuli kinesthésiques et des pressions sont présentés.	

TABLE 1 : Résumé des différentes études menées et des principaux résultats obtenus.

Ce rapport de thèse s'organise de la manière suivante. Le premier chapitre présente le contexte dans lequel s'inscrit notre travail. Nous y introduisons la notion d'émotion, son expression non-verbale, ainsi que les méthodes couramment employées pour induire à des sujets en laboratoire des émotions afin de pouvoir étudier leurs expressions. Ce chapitre présentera ensuite l'influence du toucher sur notre état physiologique, le rôle de la modalité haptique au sein de la communication sociale et affective entre êtres humains, ainsi que différentes technologies issues de l'informatique affective et de la robotique permettant de communiquer à distance des émotions par la modalité haptique.

Le chapitre 2 présentera notre première étude visant à étudier l'expression kinesthésique d'émotions actées. On commencera par y présenter la création d'un corpus d'expressions d'émotions actées. À partir des expressions de ce corpus, nous avons extrait des informations cinématique et gestuelle que nous avons comparées à celles de d'autres études. Enfin, nous élaborerons et appliquerons une méthode d'analyse statistique avancée sur notre corpus afin d'étudier les différences et les similarités entre les expressions de huit émotions actées.

Le chapitre 3 se focalise sur la perception multimodale faciale-kinesthésique d'émotions actées. Nous commencerons par montrer les limites de l'expression faciale issue d'un avatar pour la perception d'émotions sémantiquement proches. Sur la base du corpus et de l'étude statistique précédente, nous proposerons des expressions kinesthésiques affectives pertinentes pour la communication affective et mènerons une étude multimodale, qui nous aidera à comprendre comment les êtres humains perçoivent et reconnaissent des émotions exprimées en contexte multimodal, ainsi que l'influence de chacune des deux modalités impliquées sur cette perception.

Cependant, les expressions d'émotions actées ne sont pas forcément caractéristiques de celles d'émotions plus spontanées. C'est pourquoi le chapitre 4 porte sur l'étude de l'expression et de la perception d'un état de stress spontané par la modalité kinesthésique. Le stress est un état affectif courant, de plus en plus adressé en informatique affective du fait de ses conséquences négatives sur le corps ([Hernandez et al. \(2014\)](#)). Ce chapitre propose un ensemble de considérations sur la collecte d'expressions haptiques d'émotions exprimées spontanément. Un protocole d'induction de stress basé sur un jeu sera élaboré et utilisé afin de créer un corpus d'expressions kinesthésiques d'un stress exprimé spontanément. Ce chapitre étudiera non seulement l'influence du stress sur l'expression kinesthésique des utilisateurs, mais aussi la perception humaine du stress au travers de ces expressions.

Enfin, une conclusion rappellera les principaux travaux et résultats obtenus. Cette conclusion proposera également des perspectives de recherche permettant d'approfondir certains aspects des travaux que nous avons menés.

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Sommaire

1.1 Introduction	7
1.2 L'émotion : composante majeure de la communication non-verbale	8
1.2.1 Définitions et Modèles	8
1.2.2 Les expressions non-verbales des émotions	12
1.2.3 Induction expérimentale des émotions	13
1.2.4 Mesurer les réactions émotionnelles	16
1.2.5 Informatique affective	19
1.3 Communication affective via la modalité haptique	21
1.3.1 La modalité haptique	22
1.3.2 Le toucher social et affectif	25
1.3.3 Interfaces homme-machine dédiées à la communication homme-homme des émotions par la modalité haptique	29
1.4 Conclusion	34

1.1 Introduction

Cette étude bibliographique a pour objectif de présenter le contexte des travaux de cette thèse. Nous y aborderons également l'état actuel des recherches. Elle est composée de deux parties. La première porte sur la définition et la communication des émotions chez l'homme. Elle vise à expliquer aux informaticiens les concepts fondamentaux de l'émotion utilisés dans cette thèse. Dans un premier temps, nous présenterons les définitions et modèles de représentations des émotions utilisés pour les décrire. Nous aborderons ensuite la communication non-verbale des émotions entre individus. Nous nous intéresserons aux différentes méthodes d'induction des émotions dans un contexte expérimental, ainsi qu'aux différentes manières de mesurer les réponses émotionnelles associées. Enfin, nous présenterons le domaine récent de l'informatique affective. Ce domaine exploite notamment des avatars virtuels et des robots afin de communiquer des émotions aux utilisateurs d'interfaces homme-machine.

La seconde partie de cette étude bibliographique traite de la modalité haptique dans les relations sociales et affectives. Nous étudierons le fonctionnement physiologique de cette modalité et son

implication sociale et affective. Nous nous attarderons en particulier sur la communication en Interaction Homme-Machine (IHM) des émotions avec cette modalité. Après avoir présenté les premiers travaux visant à communiquer des émotions via un toucher médié, nous présenterons des interfaces homme-machine dédiées à la communication médiée d'émotions par la modalité haptique.

Une synthèse de cette étude bibliographique ainsi que des limites des recherches actuelles concluront ce chapitre.

1.2 L'émotion : composante majeure de la communication non-verbale

Nous faisons chaque jour l'expérience d'émotions variées : tristesse, colère, joie, etc. Mais savons nous réellement ce que signifie *avoir des émotions* ? Définir, caractériser ou mesurer une émotion restent aujourd'hui encore des problématiques ouvertes. Cette section de notre état de l'art vise à expliciter les concepts issus des études en psychologie que nous utilisons dans cette thèse. Nous verrons d'abord les définitions et théories des émotions. Nous étudierons ensuite comment les émotions s'expriment chez l'humain, comment les mesurer et les induire en laboratoire. Nous présenterons enfin le domaine de l'informatique affective, dont l'objectif est l'intégration de la communication des émotions à l'IHM.

1.2.1 Définitions et Modèles

Étymologiquement, le terme émotion provient du français émouvoir, lui-même issu du latin *emovere*, ce qui peut se traduire par *mouvement provoqué par une cause extérieure*. Ce terme suggère deux choses. Premièrement l'idée que l'émotion est liée à un mouvement, un changement en nous. Deuxièmement, qu'elles sont provoquées par des stimulations. Cette section vise à expliquer pourquoi et comment naissent les émotions.

1.2.1.1 Le rôle naturel de l'émotion chez l'homme

L'émotion est un concept qui s'applique à certains animaux, dont l'être humain. Même si nous en faisons quotidiennement l'expérience, son rôle est resté longtemps méconnue. Durant l'antiquité, certains philosophes comme Platon la considérait comme une anomalie perturbant la raison. Plus tard, Kant compara l'émotion à une ivresse, ne laissant pas celui qui en fait l'expérience parvenir à la réflexion : l'émotion excluait la capacité de raisonner.

Il faudra attendre [Darwin \(1872\)](#) et la théorie de l'évolution pour donner une vision positive de l'émotion. [Darwin](#) introduit l'idée que les émotions aient été naturellement sélectionnées car elles jouaient un rôle important dans la survie de l'espèce et de l'individu. Selon lui, elles modifieraient et adapteraient notre comportement en réponse à notre environnement. À la même époque, [James \(1884\)](#) pensait que les émotions étaient des réponses automatiques favorisant la survie de l'organisme face à un événement. Dans certaines situations, nous faisons en effet l'expérience de

changements dans notre corps. Par exemple, notre rythme cardiaque s'accélère dans les situations de danger. D'après [James](#), ce sont ces changements qui provoqueraient en nous ce qu'on appelle la peur.

[Damasio \(2003\)](#) distingue l'émotion de l'humeur et du sentiment par sa rapidité et son expression physique associée. L'émotion est selon lui un processus métabolique. Elle est déclenchée automatiquement par certains stimuli, et son résultat est un changement temporaire de l'état du corps. Pour [Damasio](#), nos pensées et comportements sont influencés par nos émotions, elles-mêmes naissant de besoins à satisfaire. L'émotion participe donc à la prise de décision : elle n'inhibe pas le processus de décision mais en ferait partie.

1.2.1.2 Modèles catégoriels et dimensionnels des émotions

Si les émotions ont un rôle favorisant notre survie, il faut donc que notre organisme puisse être capable d'induire l'émotion la plus appropriée par rapport à une situation donnée. Toutes les émotions n'ont pas le même objectif : une émotion de colère nous pousse à affronter l'autre, une émotion de peur nous pousse à le fuir. Il existe donc de nombreuses émotions. C'est pourquoi des modèles ont été proposés pour tenter de définir les différents états émotionnels existants.

Un des premiers à avoir été proposé est le « modèle basique » des émotions. Selon [Ekman et Friesen \(1975\)](#); [Izard \(1977\)](#), il existerait un nombre fini d'émotions de base. La plupart des travaux considèrent qu'elles sont au nombre de six : la joie, la tristesse, la surprise, le dégoût, la colère et la peur. Ces émotions sont déclenchées selon un circuit neurologique interne propre à chacune d'elle, en réponse à un type d'événement spécifique. Cependant, nous faisons l'expérience de beaucoup plus que six émotions, comme l'anxiété ou l'irritation. D'après ce modèle, ces émotions correspondraient à un mélange des émotions de bases.

Un autre modèle courant est le « modèle dimensionnel » des émotions. Ce modèle suppose que les émotions ne sont pas des états indépendants mais seraient liés entre eux par des variables, comme l'intensité de l'émotion proposée par [Plutchik \(1980\)](#). Un des modèles les plus utilisés est celui de [Russell et Mehrabian \(1977\)](#). Ce modèle suggère que les émotions peuvent en réalité se caractériser dans un espace normé à trois dimensions :

- Plaisir. Est-ce que l'émotion est plaisante ou déplaisante (e.g. joie/colère) ?
- Activation. Est-ce que l'émotion provoque un état d'activation faible ou élevé (e.g. irritation/rage) ?
- Dominance. Est-ce que la personne semble dominer la situation ou être dominée par elle (e.g. colère/peur) ?

[Russell et Mehrabian](#) proposeront une correspondance entre des états affectifs nommés comme la joie ou la peur et leur position dans cet espace.

Tous les modèles ne sont cependant pas constitués de trois dimensions. [Russell \(1980\)](#) développe par exemple un modèle des émotions où ces dernières sont représentées avec seulement deux dimensions continues : le plaisir et l'activation.

Ces modèles dimensionnels possèdent un avantage sur le modèle basique des émotions. Contrairement aux modèles catégoriels, les émotions ont un degré d'interrelation entre elles défini par leur position dans l'espace qui les représente. Cependant, si ces modèles sont souvent utilisés pour

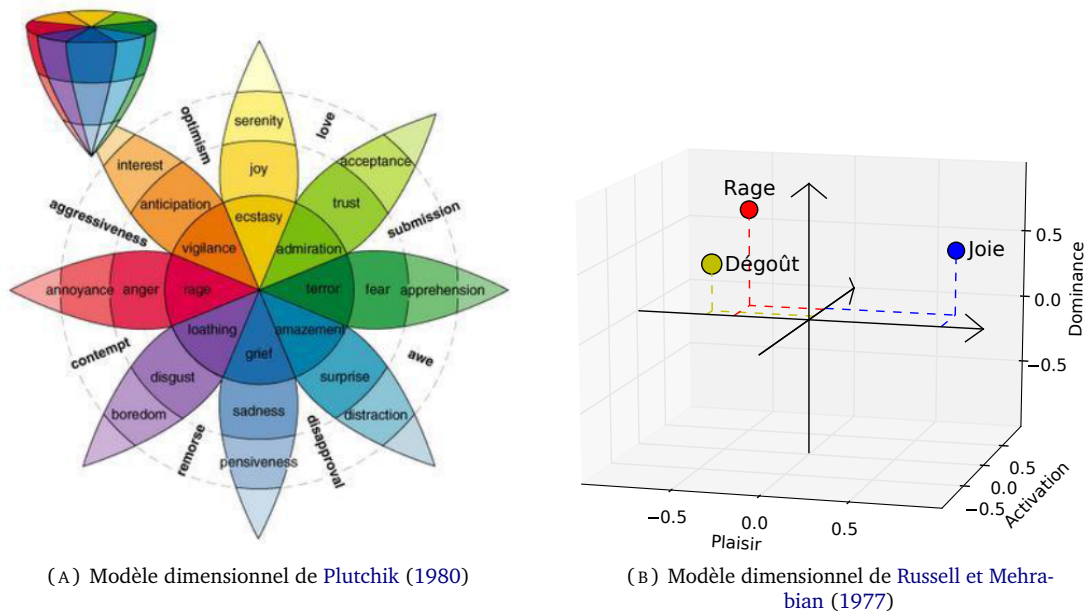


FIGURE 1.1 : Deux modèles dimensionnels des émotions.

décrire ou représenter les émotions, ils ne permettent de comprendre sur quels critères précis une émotion particulière est favorisée par rapport à une autre en réponse à un événement donné.

1.2.1.3 Modèle cognitif en composantes de Scherer

Les modèles cognitifs des émotions ont été développés sur l'idée que les émotions permettent de s'adapter aux événements ayant des conséquences potentiellement importantes pour nous. Ces modèles proposent que les émotions sont le fruit d'une évaluation/adaptation continue à l'environnement. Des critères comme la pertinence de l'événement pour l'individu sont pris en compte dans ce modèle. Frijda et al. (1989) identifient des éléments de l'événement (comme sa soudaineté ou le niveau de contrôle que nous pouvons avoir dessus) qui semblent pertinents à l'induction d'une émotion spécifique. Par exemple, un événement soudain allant à l'encontre de notre survie et contre lequel nous ne sommes pas sûr de pouvoir faire face (par exemple, croiser un ours à la montagne) induira une émotion de peur.

Scherer (2001, 2005) proposent un fonctionnement des émotions basé sur une perspective cognitive. Pour lui, l'émotion est une séquence de changements en réponse à l'évaluation par l'organisme d'un stimulus en fonction des intérêts de l'individu. L'émotion intervient alors dans cinq systèmes organiques, agissant de manière indépendante et synchronisée :

- Système cognitif (activité du système nerveux central).
- Système motivationnel (tendance à répondre à l'événement).
- Système physiologique (sueur, rythme cardiaque etc.).
- Système moteur (mouvement, expression faciale etc.).
- Système subjectif (ressenti conscient).

Ce modèle basé sur une approche cognitive des émotions est nommé « modèle des composantes ». Sur la base de ce modèle, Scherer propose un modèle d'évaluation de la réaction émotionnelle

attendue face à un événement donné : le Stimulus Evaluation Checks. Chaque étape de cette évaluation séquentielle traite un type d'information en rapport à l'événement :

1. Est-ce que cet événement est pertinent pour moi ? Est-ce que cet événement affecte directement ma personne ou mon groupe social ?
 Cette évaluation est faite selon l'aspect soudain de l'événement, ses conséquences et sa pertinence par rapport à mes buts.
2. Quelles sont les implications ou les conséquences de cet événement et à quel point vont-elles affecter mon bien-être ou mes buts à court et long terme ?
 Cette évaluation est faite selon la cause de l'événement, ses issues possibles, s'il était prévisible, en faveur de mes objectifs et besoins à traiter.
3. Suis-je capable de faire face à ces conséquences ?
 Cette évaluation est faite selon le niveau de contrôle sur l'événement, selon que j'ai le pouvoir de m'ajuster à la nouvelle situation.
4. Quelle est la pertinence de cet événement par rapport à mes convictions personnelles ainsi que face aux normes et valeurs sociales ?
 Cette évaluation est faite selon la compatibilité de l'événement avec les normes de la société et ses propres valeurs morales.

Un schéma représentant l'évaluation d'un événement selon le modèle en composantes de Scherer est présenté en figure 1.2.

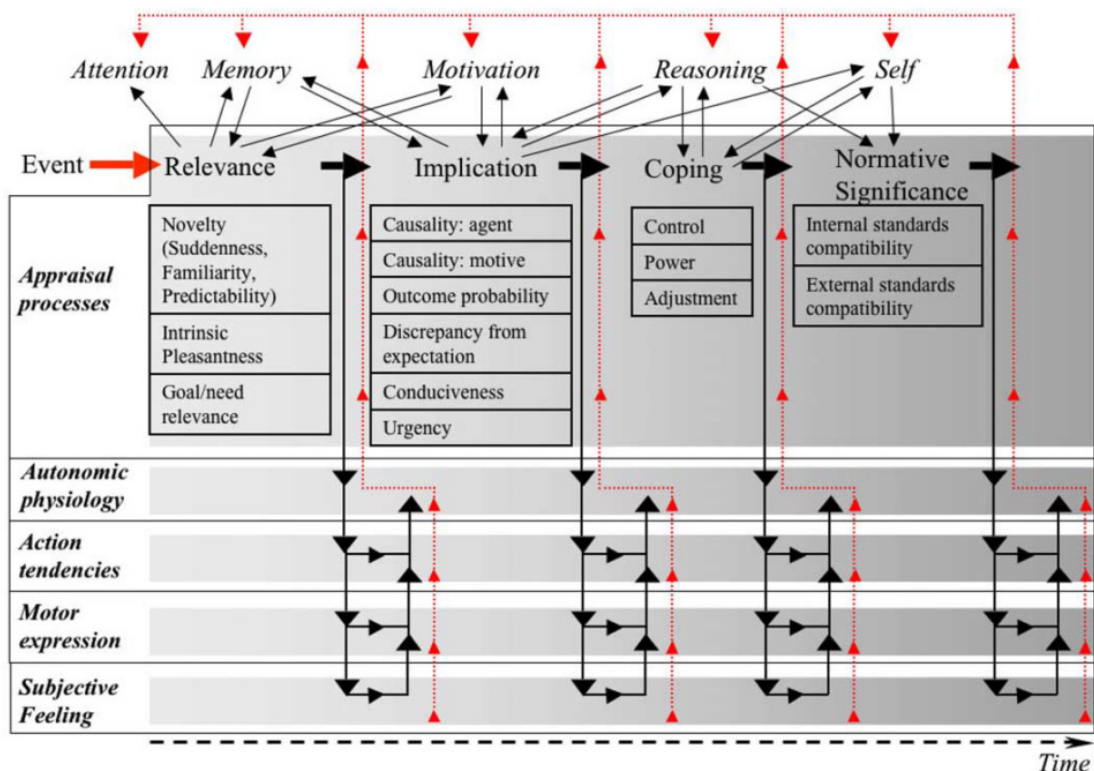


FIGURE 1.2: Modèle des composantes de Scherer (reproduit d'après Sander et al. (2005)).

Ces modèles basiques, dimensionnels et cognitifs des émotions ne sont pas les seuls existants. Par exemple, le modèle du système interruptif suppose que l'émotion sert à la gestion de l'attention de l'individu en fonction de ses besoins vitaux. Le modèle motivationnel suppose quant à lui que l'émotion est un vecteur d'action, motivant par exemple un comportement de fuite en cas de danger. Ces modèles ne seront pas davantage abordés dans cette étude bibliographique car nous ne les utiliserons pas dans nos travaux, plus axés sur la représentation et la mesure des émotions que sur leur origine.

1.2.2 Les expressions non-verbales des émotions

Les modèles des émotions comme ceux de [Ekman et Friesen](#); [Scherer](#) que nous avons présenté suggèrent que chaque émotion est associée à des modifications comportementales, physiologiques mais également motrices spécifiques. Ces changements moteurs peuvent être observés et interprétés par autrui.

[Argyle](#) (1988) montre que l'expression motrice, c'est à dire non-verbale, inclut entre autres : l'expression faciale, le contact oculaire, la posture, la prosodie, la gestuelle. D'après [Mehrabian et Wiener](#) (1967); [Mehrabian](#) (1981), l'expression non-verbale représente la majeure partie de ce nous communiquons aux autres.

C'est donc par ce langage non-verbal que s'expriment en partie nos émotions. Le modèle basique des émotions suggère par exemple que chaque émotion possède une expression faciale associée. Une personne pourrait donc être capable de percevoir et de reconnaître une émotion chez autrui en observant son expression non-verbale. Cette section présente deux catégories d'expressions non-verbales permettant de communiquer des émotions : l'expression faciale et l'expression gestuelle. L'expression de l'émotion par le toucher sera abordée plus en détail dans la seconde partie de cette étude bibliographique. Ces catégories d'expressions sont les principales abordées dans ces travaux de thèse.

1.2.2.1 L'expression faciale

L'expression faciale est la modalité d'expression non-verbale des émotions la plus étudiée.

Dans le livre « Unmasking the Face », [Ekman et Friesen](#) (1975) affirment que certaines émotions possèdent des expressions faciales spécifiques. Ils décrivent les expressions faciales des six émotions basiques, en termes de positions des sourcils, forme de la bouche etc. D'après [Boucher, J. D., Carlson](#) (1980), les expressions faciales de ces émotions semblent être universelles. [Boucher, J. D., Carlson](#) ont réalisé une étude avec des individus pris dans différentes cultures : des américains et des arborigènes de Malaisie. Les arborigènes étaient capables de reconnaître des émotions dans des expressions faciales d'américains, et réciproquement.

Ce n'est que récemment que [Ekman](#) (2009) a mis en évidence l'existence de brèves expressions faciales qu'il nomma microexpressions. Ces microexpressions ne sont pas réalisées de manière volontaire et peu d'individus sont capables de les inhiber, mettant en évidence un processus moteur inconscient. Ce résultat termine de lier l'expression faciale à celle des émotions.

Les expressions faciales ont cependant des limites dans leur efficacité à communiquer des émotions. Par exemple, les femmes semblent être meilleures que les hommes pour reconnaître des émotions à partir d'expressions faciales ([Hall et Matsumoto \(2004\)](#)). Par ailleurs, malgré que certaines émotions semblent avoir une expression faciale associée, [Ekman \(1999\)](#) mis en évidence que la manière d'exprimer une émotion dépend en partie du vécu de la personne. [Russell \(1994\)](#) a montré par ailleurs également qu'il est rare que l'émotion contenue dans une expression faciale puisse être reconnue par 100 % des individus. Deux raisons peuvent justifier ce constat. Premièrement, certaines émotions présentent des expressions faciales ressemblant à celles d'autres émotions. Deuxièmement, l'expression des émotions ne se fait pas uniquement par cette modalité.

1.2.2.2 L'expression gestuelle

Jusqu'aux années 2000, d'après [Wallbott \(1998\)](#) l'expression gestuelle était principalement considérée comme indicative de la dimension de l'activation d'une émotion. [Wallbott](#) affirme qu'on sous-estime cependant le rôle de cette expression gestuelle, et que la plupart des émotions présentent des expressions gestuelles qui leurs sont spécifiques. Ils observent en effet que différents individus expriment de manière similaire certaines émotions. Par exemple, un recul de la tête serait souvent observé dans le cas où un individu exprime du dégoût.

[Coulson \(2004\)](#) a reproduit à partir d'une description verbale l'expression posturale de chacune des six émotions de base. Il a ensuite demandé à des sujets de reconnaître l'émotion exprimée dans ces postures. Hors mis pour la joie et la surprise qui présentent des confusions, les sujets réussissent à reconnaître l'émotion de base exprimée. Dans le même temps, [Hietanen et al. \(2004\)](#) ont mis en évidence que des individus parviennent à discriminer l'état d'une personne en observant le mouvement de ses mains lors d'un message exprimé en langage des signes. Ces études appuient l'idée d'expressions gestuelles spécifiques à certaines émotions.

Malgré le nombre d'études portant sur l'expression gestuelle des émotions, [Kipp et Martin \(2009\)](#) dénotent que nous ignorons toujours comment les individus sont capables de décoder une émotion exprimée gestuellement. Certaines études comme celles de [Castellano \(2008\)](#) tentent de répondre en partie à cette question. [Castellano](#) propose d'analyser informatiquement des expressions gestuelles issues de sujets de certaines émotions afin d'extraire les paramètres gestuels discriminant ces émotions.

1.2.3 Induction expérimentale des émotions

Les sections précédentes ont permis de définir l'émotion et comment elle pouvait s'exprimer de manière non-verbale. Afin de pouvoir étudier l'expression de certaines émotions, certains travaux se sont intéressés aux manières de les induire dans un contexte expérimental.

Une des premières et des plus simples méthodes utilisées pour collecter des expressions non-verbales d'émotions est de faire acter une émotion à des sujets ([Bailenson et al. \(2007\)](#)). Cette méthode consiste par exemple à demander à un sujet de simuler une expression de joie via une expression faciale. Cette méthode rend facile la collecte et l'analyse des expressions des émotions, puisqu'on peut demander au sujet de réaliser son expression faciale devant une caméra.

Cette forme de collecte est cependant critiquable. [Motley et Camden \(1988\)](#) dénotent vers la fin du vingtième siècle un grand nombre d'études sur les expressions faciales issues des émotions actées comparées aux expressions faciales issues d'émotions plus naturelles et spontanées. [Tcherkassof et al. \(2007\)](#) ont montré que les expressions faciales issues d'émotions actées et spontanées sont différentes. Des résultats similaires ont été observés avec la prosodie ([Audibert et al. \(2008\)](#)). [Wilting et al. \(2006\)](#) iront jusqu'à affirmer : « *ceci jette un doute sur l'utilisation d'acteurs pour les recherches sur l'émotion* ». C'est pourquoi les études les plus récentes visent à induire des émotions plus naturelles et spontanées en contexte expérimental afin d'en étudier l'expression non-verbale.

L'étude de l'expression d'une émotion spontanée est cependant difficile à mettre en oeuvre. D'une part, parce que le sujet est conscient d'être dans un cadre expérimental et artificiel, ce qui n'est pas favorable à l'expression des émotions ([Coan et Allen \(2007\)](#)). Le sujet ne devrait pas non plus être perturbé ou gêné par la présence de dispositifs d'enregistrements de ses expressions non-verbales. Pour résoudre ces contraintes, diverses méthodes d'induction des émotions en laboratoire ont été proposées.

Les premières méthodes consistaient à recréer des situations suscitant des émotions. Il s'agissait par exemple de placer des pétards sous la chaise d'un sujet pour le faire sursauter, ou encore de lui demander de décapiter un rat pour lui induire du dégoût. Heureusement, les méthodes d'induction des émotions ont aujourd'hui évoluées.

Par exemple, [Strack et al. \(1988\)](#) émettent l'hypothèse que faire adopter au sujet l'expression d'une émotion permet d'induire cette émotion. Cette idée a été controversée à sa sortie, puisqu'elle impliquerait que l'émotion découle du changement d'état physiologique. Elle sera cependant validée par [Levenson et al. \(1990\)](#) qui ont montré qu'il est effectivement possible d'induire une émotion avec un changement d'état physiologique. Cette section présente trois méthodes d'induction des émotions parmi les plus importantes : les supports média, les interactions sociales et les jeux vidéos.

1.2.3.1 Supports média

La méthode la plus couramment utilisée pour induire des émotions est l'utilisation de médias comme stimuli. Nous distinguons trois grands types de médias : les images, les sons et les films. Les stimuli visuels à base d'images sont très courants et plusieurs corpus d'images visant à induire des émotions ont été proposés. Le plus connu est l'International Affective Picture System (IAPS) ([CSEA-NIMH \(1995\)](#)). Ce corpus permet d'induire plusieurs catégories d'émotions, des plus positives aux plus négatives. Un exemple d'image positive issue de ce corpus est illustré dans la figure 1.3a.

Les stimuli audios sont également très utilisés pour induire des émotions. [Bradley et Lang \(1999\)](#) ont réalisé le corpus International Affective Digital Sounds (IADS), banque de données de sons permettant d'induire des émotions. Chaque stimulus de ce corpus est accompagné d'une évaluation selon le modèle de représentation Plaisir-Activation-Dominance (PAD) des émotions. [Stevenson et James \(2008\)](#) réévaluera l'IADS en attribuant un label d'émotion aux stimuli du corpus. Au niveau des stimuli audio, on peut encore citer l'utilisation de musiques pour induire des émotions ([Scherer et Sangsue \(2004\)](#)).

Enfin, les films sont un autre type de stimuli utilisé pour induire des émotions. Certaines études comme celles de [Gross et Levenson \(1995\)](#); [Schaefer et al. \(2010\)](#); [Bartolini \(2011\)](#) proposèrent des corpus d'extraits de films permettant d'induire des émotions. Ce type de média est capable de capter l'attention des individus et d'induire en eux des réactions émotionnelles intenses. Un exemple d'image issue d'un extrait de film induisant de la peur est illustré en figure 1.3b.

Cette méthode d'induction des émotions présente néanmoins certaines limitations. Les images, de par leur nature statique, sont limitées pour l'induction de certaines émotions. De leur côté, les sons et extraits de films ne procurent pas une intensité émotionnelle uniforme sur leur durée. Par ailleurs, ces stimuli peuvent communiquer des mélanges de plusieurs émotions, et non pas une émotion spécifique ([Tcherkassof et al. \(2007\)](#)).



(A) Image visant à induire une émotion positive, extraite de l'IAPS ([Lang et al. \(2008\)](#)).



(B) Image d'un extrait de film visant à induire une émotion de peur, extraite du corpus FilmStim ([Schaefer et al. \(2010\)](#)).

FIGURE 1.3 : Stimuli visuels pour induire des émotions.

1.2.3.2 Interactions sociales

La seconde méthode couramment utilisée pour induire des émotions est l'utilisation d'interactions sociales. Cette méthode s'appuie sur le fait que ce type d'interaction est naturellement propice à l'induction d'émotions ([Roberts et Levenson \(2001\)](#)).

Cette méthode requiert la présence d'au moins deux personnes et de fixer un certain degré de contrôle de leur interaction. Par exemple, ces personnes pourraient être limitées à aborder un sujet de discussion sur lequel elles sont en désaccord. La difficulté de mise en oeuvre de cette méthode réside dans le fait de trouver l'équilibre juste entre contrôle et spontanéité de l'interaction. Trop de contrôle risque de freiner le côté naturel de l'interaction. À l'inverse, un manque de contrôle peut résulter en une absence d'induction de l'émotion ciblée. Cette méthode permet notamment d'induire un stress social, par exemple en soumettant un sujet à un faux entretien en face de plusieurs juges humains ([Kirschbaum et al. \(1993\)](#)).

Certaines études, comme celles de [Giraud et al. \(2013\)](#); [Le Chenadec et al. \(2011\)](#), ont utilisé cette méthode d'induction d'émotions par interactions sociales afin de collecter des corpus d'expressions gestuelles pour certaines émotions, comme du stress pour [Giraud et al.](#) ou des émotions plus libres pour [Le Chenadec et al.](#).

1.2.3.3 Jeux vidéos

La troisième méthode couramment utilisée pour induire des émotions est l'utilisation de jeux vidéos. Les jeux vidéos ont l'avantage de motiver les sujets et de les aider à oublier le contexte expérimental dans lequel ils se trouvent. Du fait qu'ils immergent le joueur, il est possible d'induire des émotions en s'inspirant d'événements induisant naturellement des émotions. Par exemple, il est possible d'utiliser la peur naturelle de mourir afin de susciter cette émotion en mettant en danger la vie du personnage contrôlé par le joueur (Geslin (2012)).

Jörg et al. (2012) simulent une importante latence dans un jeu afin de faire perdre le joueur. Par cette méthode, ils ont réussi à induire de la frustration chez des sujets. De nombreuses études utilisent le principe de gain/perte afin d'étudier l'expression des émotions, notamment des expressions orales (Aharanson et Amir (2006)) ou faciales (Gratch et al. (2013)). Wang et Marsella (2006) ont proposé un outil nommé l'Emotion Evoking Game afin d'induire un ensemble d'émotions. Dans ce jeu, le sujet contrôle un personnage virtuel et est aidé par un personnage virtuel contrôlé par le système. Au fil du jeu, des événements se produisent afin d'induire des émotions au sujet. Par exemple, une nuée d'ennemis apparaît pour induire de la surprise, ou le personnage allié non-jouable attaque subitement le joueur afin de voler l'or qu'il a gagné au cours du jeu pour induire de la colère.

1.2.4 Mesurer les réactions émotionnelles

Nous avons vu qu'il existait des méthodes d'induction des émotions en laboratoire. Afin d'évaluer l'efficacité de ces inductions, il est nécessaire de mesurer et d'évaluer les réactions émotionnelles.

Le plus facile à mettre en oeuvre est de demander à la personne de décrire l'émotion qu'elle ressent. Cependant, Scherer (2004) affirme que nous ne sommes pas forcément conscient de la complexité des processus mentaux mis en oeuvre dans les émotions (partie A de la figure 1.4). Nous ne pouvons que ressentir leur impact physiologique et moteur sur nous-mêmes (partie B de la figure). Il est d'autre part difficile de retranscrire à l'aide du langage verbal sa propre expérience émotionnelle (partie C de la figure). Demander à une personne de décrire verbalement ce qu'elle ressent n'est donc pas une mesure fiable pour mesurer des réactions émotionnelles.

Cette section explore différentes méthodes pour mesurer les réactions émotionnelles avec une précision plus ou moins importante. Ces méthodes peuvent être classées en trois catégories :

- Mesure subjective de l'expérience émotionnelle (e.g. questions posées au sujet).
- Mesure des changements de comportements (e.g. expression faciale du sujet).
- Mesure des changements physiologiques (e.g. rythme cardiaque du sujet).

1.2.4.1 Mesure subjective

Bien qu'il soit impossible de se fier à une description subjective d'un sujet pour savoir précisément quelle émotion il éprouve, on peut fiabiliser les reports subjectives en posant des questions précises aux sujets, auxquelles il répond généralement via un formulaire de réponse. Ces questions se

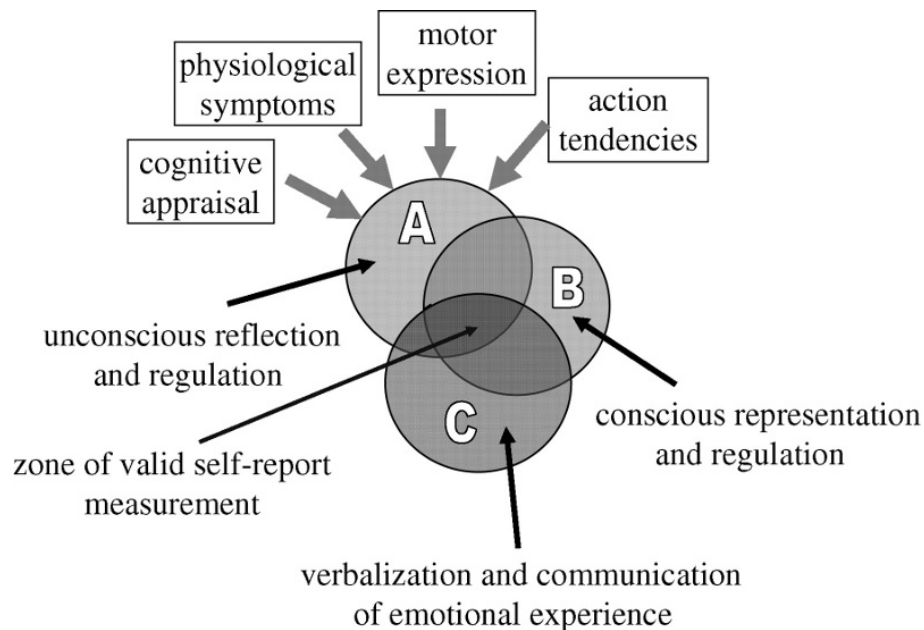


FIGURE 1.4 : L'expérience émotionnelle d'après Scherer (2004). Ce schéma met en évidence que ce qu'une personne peut verbaliser de son ressenti émotionnel n'est qu'une interprétation de l'émotion qu'elle ressent réellement.

basent sur les modèles des émotions décrits précédemment (basique, dimensionnel et évaluation cognitive).

La première façon et la plus directe est de proposer une liste prédéfinie d'émotions nommées, dans laquelle les sujets cochent celle qui leur paraît décrire le mieux ce qu'ils ressentent. Cette méthode nécessite pour le sujet d'avoir une connaissance précise de la définition des émotions, en particulier si certaines émotions de la liste présentée sont sémantiquement proches. Cette méthode ne permet pas de reporter une émotion qui n'est pas dans la liste. Il est possible cependant de laisser les sujets cocher plusieurs cases, s'ils pensent que ce qu'ils ressentent correspond à un mélange de plusieurs émotions.

Cette approche ne permet pas de quantifier l'émotion ressentie. Izard et al. (1974) proposent de palier à ce manque en créant l'Echelle différentielle des émotions (DES). Pour chaque émotion présentée, l'utilisateur ne reporte pas de façon binaire s'il ressent ou non cette émotion mais quantifie de manière quantitative sur une échelle de Likert son ressenti. Dans cette échelle, plusieurs émotions dérivées de la même émotion de base sont généralement proposées. Ceci est fait pour tester la consistance des données reportées par le sujet. D'autres mesures similaires existent, comme l'échelle d'affects positifs et d'affects négatifs, proposant notamment un nombre de points plus importants (Watson et al. (1988); Watson et Clark (1994)).

La deuxième façon de mesurer subjectivement une réaction émotionnelle est dérivée de l'approche dimensionnelle des émotions. Russell et Weiss (1989) proposera une méthode évaluant les dimensions de plaisir et d'activation. Cette méthode consiste pour le sujet à choisir une case d'un tableau à deux dimensions, représentant les dimensions plaisir et activation, et correspondante à son état actuel (voir figure 1.5a). La principale limite de l'application de cette mesure est que les sujets doivent comprendre la signification exactes des axes évalués. L'échelle d'auto-évaluation par

mannequin proposée par [Bradley et Lang \(1994\)](#) remédie à ce problème, permettant d'expliciter les axes par une représentation visuelle schématique à l'aide d'un personnage (voir figure 1.5b). Le sujet doit ici choisir l'un des personnage présentés.

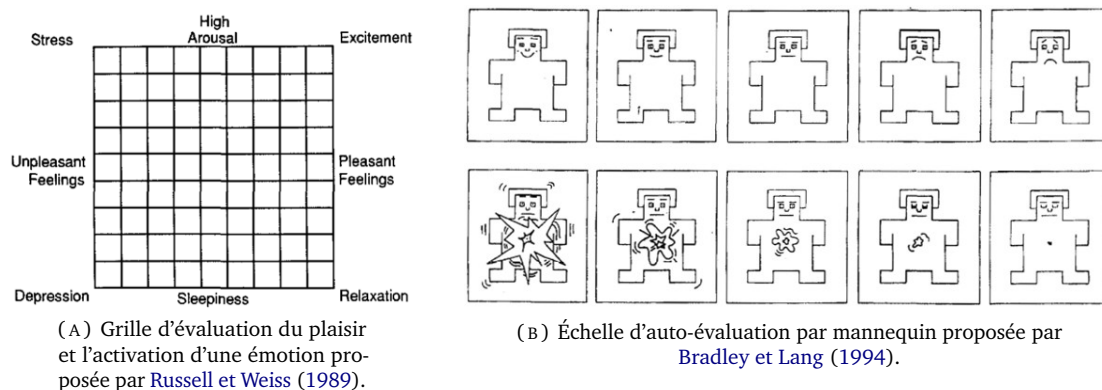


FIGURE 1.5 : Deux méthodes d'évaluations des émotions basées sur des modèles dimensionnels.

D'autres méthodes d'évaluation subjective des émotions existent. On peut citer par exemple le Time Sampling Diary proposé par [Stinson \(1999\)](#), permettant d'évaluer une expérience émotionnelle en dehors d'un contexte de laboratoire en proposant de répondre à un questionnaire inspiré du Stimulus Evaluation Checks de [Scherer](#).

1.2.4.2 Mesure comportementale

La seconde méthode pour mesurer l'émotion ressentie par un individu est d'observer son comportement non-verbal. [Picard et Daily \(2005\)](#) dressent une liste non exhaustive des expressions non-verbales pouvant traduire l'émotion d'un individu, ainsi que la façon dont on peut collecter ces expressions. Par exemple, un microphone peut capturer les intonations d'une personne.

[Gómez Jáuregui et al. \(2013\)](#) utilisèrent une caméra afin de déterminer le comportement d'approche-évitement de collégiens. Cette caméra, placée au niveau de l'écran d'un ordinateur utilisé par les collégiens, permettaient d'observer si ces derniers avaient tendance à avancer ou reculer par rapport à l'écran. De tels comportements peuvent traduire un état d'intérêt ou de désintérêt envers le contenu de l'interaction avec l'ordinateur. D'autres méthodes permettent de mesurer l'intérêt porté, par exemple la direction du regard ([Yang et al. \(2011\)](#)).

1.2.4.3 Mesure physiologique

La dernière méthode que nous verrons pour mesurer l'émotion ressentie par un individu est la surveillance de son état physiologique. Le développement de capteurs permet aujourd'hui d'accéder à la plupart des changements physiologiques survenant lors d'une expérience émotionnelle.

Une mesure physiologique couramment employée et la mesure de l'activité électrique de certaines zones du corps ([Sequeira et al. \(2009\)](#)) :

- Au niveau du cerveau : cette mesure peut être effectuée par électroencéphalogramme et permet de déterminer les zones liées aux émotions actives.
- Au niveau des muscles : cette mesure peut être effectuée par électromyogramme et permet d'étudier l'activité musculaire, et permet notamment d'étudier les microexpressions et la dimension du plaisir de l'émotion.
- Au niveau de la peau : la sueur sécrétée augmente la conductance électrique de la peau. Cette mesure peut-être effectuée via un capteur électrodermale et serait corrélée avec l'activation de l'émotion ressentie par un individu.

Le rythme cardiaque est également un paramètre physiologique pouvant être influencé par les émotions. Des études comme celle d'[Ekman et al. \(1983\)](#) montrent que des émotions comme la colère ou la peur sont liées à une augmentation du rythme cardiaque, alors qu'une émotion de joie diminue le rythme cardiaque. Cette mesure peut être réalisée à l'aide d'un électrocardiogramme ou d'un capteur optique. La pression sanguine, liée au système vasculaire, est un complément intéressant à cette mesure. [Cacioppo et al. \(1993\)](#) montrent par exemple que la pression sanguine permet de distinguer la peur de la colère, traduite par une augmentation de la pression sanguine.

Il existe d'autres paramètres physiologiques liés à l'émotion : dilatation des pupilles, variation de la température corporelle, etc.

Ces mesures physiologiques présentent cependant quelques limites. Premièrement, elles sont corrélées à des états émotionnels, mais ne sauraient prétendre à une détection précise d'une émotion, notamment car l'état physiologique d'un individu dépend de nombreux paramètres. En outre, la plupart des capteurs permettant de mesurer l'état physiologiques sont intrusifs (casque, électrodes). De ce fait, ils peuvent limiter les gestes de l'utilisateur. Étant continuellement en contact avec lui, ces capteurs peuvent difficilement être oubliés par l'utilisateur, ce qui limite l'aspect naturel de ses réactions.

Chaque méthode de mesure des réactions émotionnelles présentée ici (subjective, comportementale et physiologique) possède ses propres avantages et inconvénients. Leur combinaison permet d'évaluer les émotions ressenties par un individu la manière la plus fiable possible.

1.2.5 Informatique affective

Nous avons vu que les émotions s'expriment et se communiquent par des modalités d'expressions non-verbales. Ce type d'expression joue un rôle majeur dans une communication réussie ([Mehrabian et Wiener \(1967\)](#)). Elle permet par exemple de différencier un ton humoristique d'un ton sarcastique et d'exprimer à autrui son affection ou sa désapprobation. L'utilisation importante d'émoticônes dans les conversations écrites à longue distance ne sont qu'un exemple parmi tant d'autres de l'importance de l'expression non-verbale des émotions dans la communication humaine ([Lo \(2008\)](#)).

C'est afin de permettre une communication non-verbale des émotions en contexte médié que [Picard \(1997\)](#) développe l'informatique affective. Cette discipline vise à traiter, simuler ou influencer les émotions ou les autres phénomènes affectifs. Plusieurs modalités de l'expression non-verbale sont couramment exploitées en informatique affective, comme la gestuelle ou le ton de sa voix ([Hartmann et al. \(2006\)](#); [Hofer \(2004\)](#)). L'informatique affective la création de

propriétés physiques humaines permettant la transmission de signaux non-verbaux dans le cadre d'une communication médiée, processus qu'on appelle incorporation (Ruttkay et al. (2002)).

Cette section présente deux outils de l'informatique affective pour communiquer des émotions : les agents virtuels et les robots, qui sont ceux que nous utiliserons dans ces travaux de thèse.

1.2.5.1 Les agents virtuels

L'expression faciale étant la modalité la plus étudiée pour communiquer des émotions, l'informatique affective s'est penchée sur son intégration dans des contextes virtuels. Cette intégration s'effectue à l'aide d'agents virtuels. Les agents virtuels souffrent cependant du problème de la vallée dérangeante mis en évidence par Mori (1970), expliquant que plus un agent virtuel sera réaliste, plus ses défauts seront dérangeants.

Un exemple de framework d'agents virtuels expressif est le framework Multimodal Affective and Reactive Characters (MARC) proposé par Courgeon et al. (2008). Ce framework permet la production d'expressions faciales fidèles en temps réel. MARC a été employé avec succès lors de plusieurs études. Par exemple, Courgeon et al. (2009b) l'ont utilisé pour représenter un adversaire virtuel lors d'une partie d'Othello. L'émotion qu'exprimait l'agent avec son visage changeait en fonction du déroulement de la partie. Cet agent a servi également pour l'étude de l'impact des rides du visage Courgeon et al. (2009a) comme les rides du lion ou du sourire sur la perception de l'émotion et du réalisme de l'agent virtuel.

Bien que cet agent virtuel se veut graphiquement réaliste, ses expressions faciales doivent être réalisées à la main en modifiant des points de contrôle placés sur le visage. Ceci peut rendre difficile la création d'expressions dynamiques d'apparence naturelle. Schiel (2008) ont proposé d'utiliser des modèles de contrôle au niveau des expressions d'un agent virtuel. Ces modèles permettent par exemple de gérer l'expansion spatiale d'un geste en contrôlant automatiquement les positions des bras et des épaules selon le degré d'expansion souhaité.

1.2.5.2 Interactions affectives avec des robots

Bien que les avatars virtuels soient couramment utilisés pour exprimer des émotions en contexte virtuel, les progrès du domaine technologique favorisent l'expansion des robots expressifs. Les robots de demain seront amenés à interagir davantage avec les utilisateurs (accueil, assistance aux personnes âgées etc.), leurs capacités de communication doit donc s'enrichir d'expressions non-verbales, dont nous avons souligné l'importance dans la communication chez l'homme. Par exemple, Bennett et Sabanovic (2013) proposèrent un robot économique capable d'exprimer avec succès la plupart des émotions de base. Les robots sont aujourd'hui de plus en plus utilisés dans la communication affectives (Beck et al. (2011)). Ils présentent l'avantage d'être physiquement ancrés dans le monde de leurs utilisateurs.

Breazeal (2001) émet l'idée que les êtres humains sont capables de relation empathiques envers les robots. Dans son étude, il demanda à des humains d'exprimer des émotions à un robot androïde, censé répondre à ces expressions. Certains sujets, après avoir remarqué que le robot était capable d'exprimer des émotions, ont reporté avoir éprouvé un sentiment de culpabilité

lorsqu'ils provoquaient chez le robot une réaction de tristesse. Cette démonstration d'empathie envers un robot n'est pas un cas isolé. [Fussell et al. \(2008\)](#) ont montré que durant une interaction homme-robot, les sujets avaient tendance à attribuer au robot des qualités humaines, comme le fait que ce robot semblait avoir des humeurs. [Seo et al. \(2015\)](#) ont montré que l'empathie envers les robots est beaucoup plus importante qu'avec les avatars virtuels.

Les robots, même s'il n'ont pas une forme humaine, ont la capacité de communiquer affectivement avec les êtres humains. [Bethel et Murphy \(2007\)](#) ont proposé un robot pouvant circuler dans des décombres et évaluer l'état de santé de victimes de catastrophes. Pour évaluer correctement l'état de santé d'une victime, le robot doit s'approcher très près d'elle. Une telle proximité génère et de l'anxiété chez le blessé, qui ne peut connaître l'intention du robot. [Bethel et al. \(2009\)](#) ont mis en évidence que si le robot suit une certaine stratégie d'approche, par exemple, en regardant la victime durant son approche, les blessés se sentent davantage rassurés.

Ces dernières années ont vu le développement de nombreux robots humanoïdes destinés à communiquer avec les humains. Cependant, à l'instar des expressions faciales issues des avatars, les robots humanoïdes souffrent du problème de la vallée dérangeante [Becker-Asano et al. \(2010\)](#). L'effet est d'autant plus important chez eux que la réaction de rejet provoquée par la vallée dérangeante est amplifiée par les mouvements. Cependant, les technologies avancent autant dans le réalisme visuel [Nishio et al. \(2013\)](#) que comportemental [Matsui et al. \(2005\)](#).

Cependant, si les robots ont l'avantage d'évoluer dans le même environnement que leurs utilisateurs, ils sont moins expressifs que les avatars virtuels. Les avatars ne sont limités en terme d'apparence visuelle que par la puissance de la machine et des algorithmes de rendus, tandis que les robots présentent des contraintes physiques et technologiques supplémentaires. Par exemple, il est technologiquement plus difficile de créer des expressions faciales réalistes avec des robots, bien que ce soit l'objet d'étude de récents travaux comme celui de [Nishio et al. \(2013\)](#). [Park et Kim \(2009\)](#) proposent l'intégration d'un rétroprojecteur à l'intérieur d'un robot. L'image projetée permet d'exprimer des émotions de façon réaliste, en s'affranchissant des limites actuelles de la robotique. [Dragone et al. \(2006\)](#); [Young et al. \(2007\)](#) utilisent de la réalité augmentée afin de projeter des expressions faciales ou gestuelles sur des robots afin de donner à leurs utilisateurs un retour visuel expressif.

Bien que ces robots permettent de communiquer des émotions, leur présence physique dans le monde de l'utilisateur permet une nouvelle forme d'interaction négligée jusqu'ici : le toucher. La section suivante présente le rôle du toucher dans la communication humaine en général dans un premier temps, puis de celle des émotions dans des contextes d'IHM.

1.3 Communication affective via la modalité haptique

Nous avons vu que la communication non-verbale des émotions, directe ou médiée, utilise plusieurs modalités d'expression.

La modalité haptique est l'une des modalités d'expression des émotions possédant un des pouvoirs affectifs les plus forts ([Tetteroo \(2008\)](#)). Elle est pourtant très peu étudiée et utilisée comme le montre la figure 1.6.

Cette section de l'étude bibliographique présente l'utilisation de la modalité haptique pour la communication des émotions. Dans un premier temps, nous présenterons cette modalité et son implication biologique dans la communication des émotions. Dans un second temps, nous verrons l'utilisation de cette modalité dans des contextes de communication naturels ou médiés. Enfin, cette section se clôturera sur une présentation des interfaces haptiques dédiées à la communication des émotions.

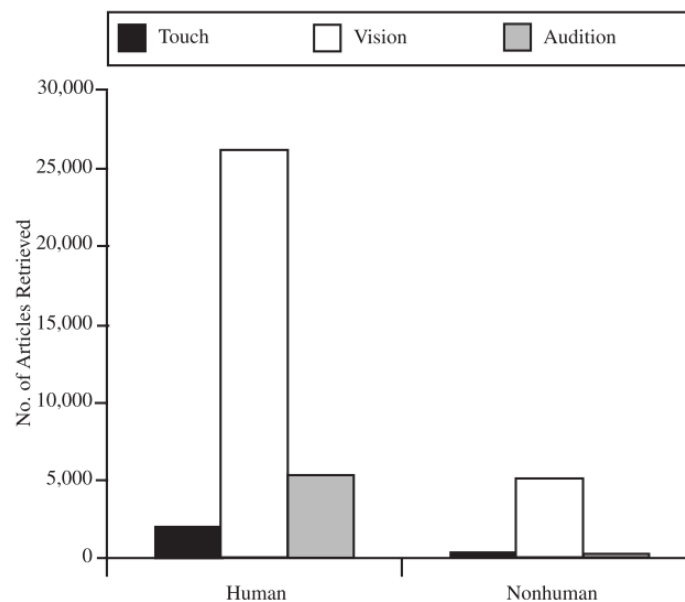


FIGURE 1.6: Nombre d'études consacrées à la modalité haptique dans PsychINFO d'après [Hertenstein et al. \(2006b\)](#). Le toucher a reçu très peu d'intérêt en comparaison aux autres sens, notamment la vue.

1.3.1 La modalité haptique

Cette section définit ce qu'est la modalité haptique. Elle fait la différence entre le sens du toucher perceptif et sa fonction affective.

1.3.1.1 Introduction à la modalité haptique

Le toucher est l'un des cinq sens de l'être humain. Bien avant la vue ou l'ouïe, le toucher est le premier sens à être apparu chez l'animal ([Ghedighian-Courier \(2006\)](#)). [Seay et al. \(1964\)](#), ayant travaillé sur l'influence du toucher dans les réactions affectives chez les singes, écriront même : « C'est principalement par la peau que nous sommes devenus des êtres aimants ».

1.3.1.2 Le sens haptique

Le sens haptique (parfois nommé tactilo-kinesthésique) permet la perception tridimensionnelle d'objets en s'appuyant sur différents types de perceptions, notamment tactile et kinesthésique.

Nom	Sens	Localisation	Stimulus
Corpuscule de Pacini	T	Hypoderme	Pression profonde, vibration
Corpuscule de Ruffini	T	Hypoderme	Étirement de la peau
Corpuscule de Meissner	T	Chorion	Tact Pression
Disque de Merkel	T	Chorion	Tact Pression
Fuseau neuromusculaire	K	Fuseau neuromusculaire	Étirement musculaire
Organe tendineux de Golgi	K	Tendon	Variation de force contractile
Récepteurs articulaires	K	Articulation	Variation d'angle et position

TABLE 1.1 : Mécanorécepteurs liés aux perceptions tactiles et kinesthésiques (reproduit d'après [Dougherty \(1997\)](#)).

Ces deux perceptions se font par l'intermédiaire de mécanorécepteurs, qui sont des neurones sensoriels sensibles aux déformations mécaniques. Une stimulation physique de ces mécanorécepteurs entraîne une déformation de leur membrane, donnant naissance à la transmission d'une information par la fibre nerveuse du mécanorécepteur jusqu'au cerveau. Plus précisément, c'est dans la région somato-sensorielle du cortex cérébral que cette information est traitée ([Clos et Muller \(1997\)](#); [Group \(2002\)](#)).

La perception tactile permet l'exploration des propriétés de surface des objets : rugosité, contours, etc. Ce sens permet de déterminer les propriétés surfaciques d'un objet. Les mécanorécepteurs impliqués se situent principalement dans la peau. Les corpuscules de Meissner et les disques de Merkel, situés au niveau de l'épiderme, permettent de percevoir respectivement la géométrie de surface des objets et leur texture. Les corpuscules de Pacini et de Ruffini, situés dans le derme, permettent respectivement de percevoir les accélérations et l'étirement de la peau. La figure 1.7a illustre le fonctionnement de la perception tactile.

La perception kinesthésique, qui sera l'objet principal de nos études, est la perception de la position et du mouvement de nos membres, ainsi que de des forces que nous exerçons. [Sir Cherrington \(1920\)](#) introduira pour cette perception le terme propriocepteurs, récepteurs liés à la perception de notre corps dans l'espace. Les capteurs impliqués se situent principalement au niveau des muscles. Parmi ces capteurs, on retrouve notamment les fuseaux neuromusculaires, permettant d'estimer la longueur et l'état de fatigue du muscle. Les récepteurs tendineux de Golgi sont quant à eux sensibles à la contraction musculaire. Les récepteurs articulaires sont eux sensibles aux variations de positions et aux rotations. La figure 1.7b illustre le fonctionnement de la perception kinesthésique.

Le tableau 1.1 résume les principaux mécanorécepteurs du corps ainsi que leur localisation.

1.3.1.3 Lien physiologique entre toucher et émotion

De récentes études suggèrent que le toucher n'est pas seulement un sens de perception de l'environnement, mais jouerait également un rôle dans les relations affectives. Le contact physique permettrait de stimuler l'état affectif d'une personne, par exemple, via des caresses sur la peau ou des câlins. Cette section explique le lien physiologique entre le toucher et le système affectif.

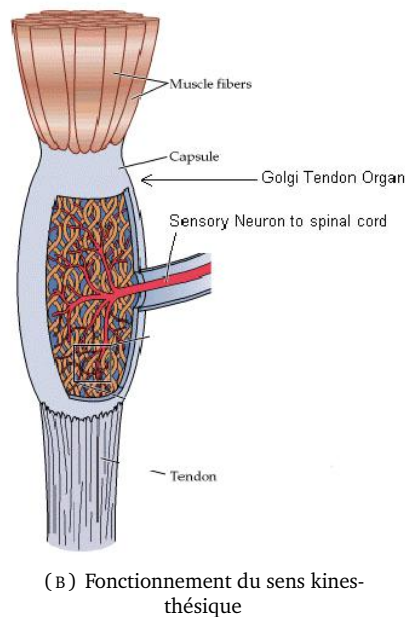
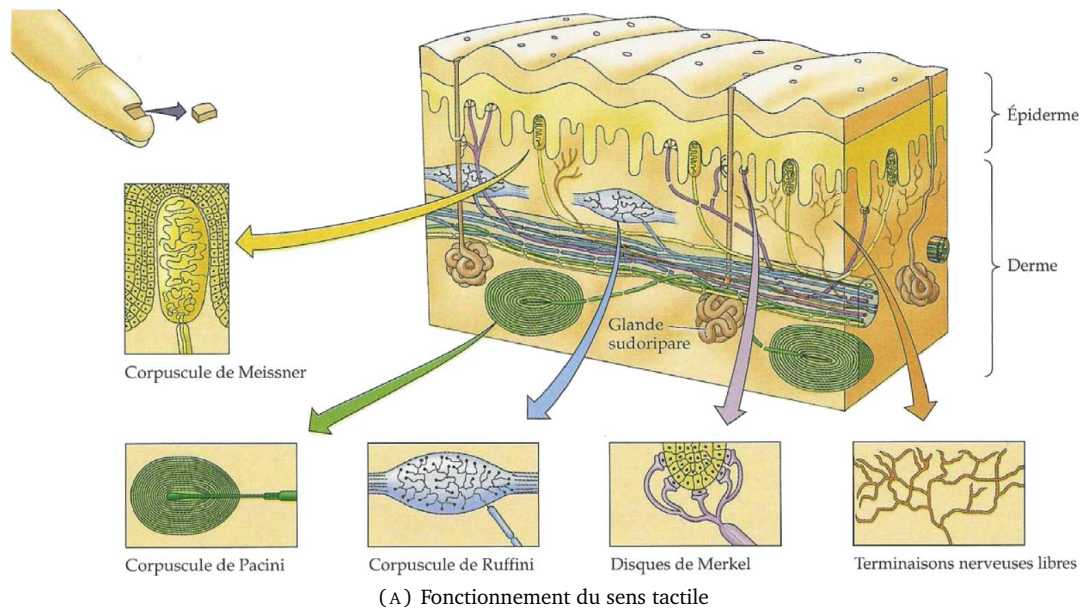


FIGURE 1.7: La perception tactile et kinesthésique.

En plus des mécanorécepteurs de la peau listés dans la section précédente, [Olausson et al. \(2002, 2008\)](#); [McGlone et al. \(2014\)](#) mettent en évidence l'existence d'un autre type de mécanorécepteurs nommés fibres tactiles-C. Ces récepteurs sont sensibles à des contacts physiques. Ils sont lents et situés en plus forte concentration à la base des poils. Ils ont la particularité de ne pas être liés au cortex somato-sensoriel mais au cortex insulaire, impliqué dans le traitement des émotions.

Cette influence du toucher sur l'émotion est appuyé par [Rolls et al. \(2003\)](#). Alors que le cortex somato-sensoriel est activé dans le cadre d'un contact physique neutre, le cortex orbitofrontal semble davantage être sollicité lors d'un contact physique agréable ou douloureux. En connexion avec le thalamus, le cortex orbitofrontal est également actif dans les processus affectifs et dans la prise de décision.

Cette activation des zones du cerveau liées aux émotions et le toucher explique pourquoi l'un des effets du contact physique est la sécrétion de certaines hormones ([Handlin \(2010\)](#); [Ellingsen et al. \(2014\)](#)). Par exemple, les massages favorisent la sécrétions d'endorphine, procurant une sensation de bien être. Les caresses favorisent la sécrétion d'ocytocine, liées au plaisir et à l'empathie.

1.3.2 Le toucher social et affectif

Si le toucher est lié au système affectif, il s'agit aussi d'une modalité d'expression des émotions ([Hertenstein et al. \(2006a\)](#))

Cette implication du toucher dans l'induction des émotions suggère qu'il possède outre un rôle de perception, un rôle social ([Morrison et al. \(2010, 2011\)](#)). Cette section illustre ce rôle social du toucher. Elle présentera ensuite les aspects affectifs du toucher homme-homme dans des contextes d'interaction naturels ou d'IHM via des interfaces haptiques.

1.3.2.1 Le toucher : premier sens de contact

Nous avons vu que le toucher était le premier sens à être apparu dans l'évolution des êtres vivants. C'est également le premier sens avec lequel un nourrisson communique avec sa mère ([Kaye \(1982\)](#)).

[Seay et al. \(1964\)](#) a tenté d'étudier l'importance du contact physique chez les singes. Il a séparé de jeunes singes de leur mère dès la naissance et les a mis face à deux mannequins entre lesquels ils doivent choisir. L'un de ces mannequins représentait une mère de substitution en coton, l'autre une mère de substitution en fil de fer avec de la nourriture. Les jeunes singes ont choisis généralement le premier mannequin, préférant ainsi la douceur physique à la nourriture.

Plus récemment, [Zhang et Cai \(2008\)](#) a étudié deux populations de rats, une recevant des stimulations tactiles journalières, l'autre aucune. A l'âge de trois mois, les rats ayant reçus des stimulations tactiles montraient moins de stress que les autres.

Cette importance du toucher se retrouve également chez les enfants humains. [Hertenstein et Campos \(2001\)](#) ont observé que la manière qu'avaient des mères de tenir leurs enfants sur les genoux pouvait influencer la façon dont ils interagissaient avec un nouvel objet qui leur était présenté. Par exemple, si la mère augmentait la pression qu'elle exerçait sur son enfant, ce dernier était moins enclin à vouloir interagir avec cet objet. L'enfant affichait également dans ce cas des comportements liés à des états émotionnels négatifs, comme des froncements de sourcils.

[Kozima et Nakagawa \(2006\)](#) ont mené une étude visant à étudier comment des enfants interagissaient naturellement avec un robot. Ils ont mené une expérience où un robot était présenté à des enfants en bas âge. Il montrèrent que les enfants de moins d'un an interagissaient principalement avec le rôle par exploration tactile. Ce n'est qu'à plus d'un an qu'ils commencent à comprendre les expressions du robot. La manière d'interagir avec le robot semble évoluer au fil des âges : à deux ans, les enfants interagissaient avec le robot en lui parlant. Mais également en le caressant.

1.3.2.2 Le toucher comme message social

Si le toucher agit sur notre biologie, on peut supposer que son utilisation impacte notre quotidien, en particulier dans nos interactions sociales.

Crusco et Wetzel (1984); Lynn et al. (1998) ont mené une étude sur l'influence du contact physique d'un serveur avec ses clients dans un restaurant. Ils mirent en évidence que lorsque le serveur touchait son client sur l'épaule ou le coude lors du rendu de la monnaie, ce serveur recevait un pourboire plus important. Ce résultat n'est pas propre à une culture. Guéguen et Jacob (2005) ont observé également cette influence du contact physique entre un serveur et ses clients sur les pourboires laissés dans un bar français. Hornik (1992) a observé que les clients d'un magasin étaient aussi plus conciliants avec un vendeur si ce dernier les touchait avant de leur soumettre une requête.

Le toucher semble avoir un impact positif dans les interactions sociales humaines. Guéguen (2004) a montré que le fait de toucher un étudiant augmente la probabilité qu'il soit volontaire pour passer au tableau. Une des explications présentées pour expliquer ce phénomène est que le toucher semble être perçu comme un encouragement de la part du professeur et augmente la confiance en soi de l'étudiant.

Le manque de contacts humains peut en revanche avoir des conséquences négatives dans la vie quotidienne. Par exemple, une absence de toucher prolongée semble participer à l'augmentation d'états négatifs comme le stress (Field (2001)). Bargh et Shalev (2012) affirment par exemple que les personnes recevant moins de contacts physiques que d'autres ont tendance dans leur quotidien à prendre des bains plus chauds afin de compenser le manque de chaleur humaine. À l'opposé, les personnes mises en contact avec un objet froid reportent se sentir davantage seules que d'autres personnes.

Le toucher en IHM, de par sa stimulation physique, permet d'apporter une sensation de présence. Bailenson et Yee (2007) menèrent une étude où des sujets devaient nettoyer le visage d'un avatar virtuel à l'aide d'un dispositif haptique. Ils observèrent que ces sujets exerçaient moins de pression sur le visage de l'avatar lorsque ce dernier était de sexe féminin. Chen et al. (2009) étudièrent la sensation de présence sociale lors d'une communication textuelle avec le logiciel Skype. Dans certains cas, cette communication s'effectuait un retour haptique via un dispositif Geomagic Touch. Dans ce cas, les sujets reportaient un accroissement de la sensation de présence. Similairement, Sallnäs (2010) a montré que la présence perçue est d'origine sociale : les sujets ont l'impression que la personne avec laquelle ils communiquent se trouvent physiquement près d'eux.

1.3.2.3 Le toucher pour transmettre une émotion

Si le toucher est biologiquement impliqué dans les mécanismes émotionnels et possède un rôle social, on peut supposer qu'il possède également un rôle dans la communication affective. Eichhorn et al. (2008) rappellent que le contact physique était important pour les personnes en couple, par exemple afin de réconforter son partenaire. Erp et Toet (2013) suggèrent que le toucher est important dans la communication affective : tenir l'autre par la main, le masser ou l'embrasser, permet de générer chez soi et chez son partenaire des émotions positives.

Les recherches portant sur la communication des émotions par la modalité haptique vont dans ce sens. À l'aide d'un dispositif très basique composé d'un cylindre tournant, [Salminen et al. \(2008\)](#) appliquèrent différentes frictions sous le doigt de sujets. Il réussirent avec ce système à transmettre des sensations de plaisir ou déplaisir : lorsque le sens de rotation du cylindre est constant, le contact est perçu comme plaisant, dans le cas contraire il est perçu comme déplaisant.

[Essick et al. \(2010\)](#) mirent en évidence que la nature de la surface des objets influence notre état affectif. Par exemple, un contact de la peau avec un scratch est jugé moins plaisant que le contact avec les poils d'une brosse. [Cooper et al. \(2010\)](#) ont montré que la perception d'une émotion passe également par le sens kinesthésique. Ils mirent en évidence que des stimuli administrés par un Geomagic Touch semble peuvent être perçu comme porteur d'émotions différentes, présentant des valeurs de plaisir et d'activation variées. Plus récemment, [Bianchi-berthouze et Tajadura-Jiménez \(2014\)](#) ont montré que ces deux modalités participent conjointement à la perception des émotions : non seulement le matériau est important, mais la façon de le toucher l'est également.

[Rantala et al. \(2013\)](#) ont mené une expérience où ils ont demandé à des sujets comment ils exprimeraient une émotion particulière par le toucher. À un autre groupe de sujets, ils demandèrent comment ils aimeraient que cette même émotion leur soit communiquée par le toucher. [Rantala et al.](#) ont mis en évidence des similarités entre les réponses de ces deux groupes de sujets. Par exemple, émetteurs et receveurs s'accordent sur le fait qu'ils utilisent généralement un contact tactile pour exprimer/percevoir une émotion positive.

Cependant, les hommes et les femmes sont différents dans leur manière de communiquer et de percevoir certaines émotions. [Hertenstein et Keltner \(2011\)](#) ont montré que les femmes exprimaient différemment les émotions des hommes par cette modalité. D'après [Hall et Matsumoto \(2004\)](#), les femmes seraient aussi généralement meilleures pour reconnaître des émotions exprimées via cette modalité.

La modalité haptique permet donc de communiquer des émotions. La section suivante discute de l'intérêt de l'intégration du toucher médié dans la communication homme-homme.

1.3.2.4 Apport du toucher médié dans la communication à distance

C'est dans les années 60 – 70 que naquirent les premières interfaces haptiques. Aujourd'hui, les applications pratiques sont nombreuses, allant de la manipulation d'objets en environnement virtuel aux opérations chirurgicales, où avoir un feedback haptique durant l'interaction est essentiel. De nos jours, le retour haptique possède également des applications grand public, notamment avec les vibreurs des téléphones mobiles. Il s'agit ici d'attirer discrètement l'attention de l'utilisateur lorsque les modalités visuelle et audio sont inappropriées. Des illustrations de l'utilisation de dispositifs haptiques existants sont montrées dans la figure 1.8.

Cependant, les dispositifs haptiques permettant la communication homme-homme médiée sont beaucoup moins courants. Ceci est principalement lié à des limitations d'ordres technologiques, elle-mêmes liées à un manque d'études sur le rôle de la modalité haptique en communication médiée. Cette section discute de cet apport.

Le toucher médié permet de restituer un contact physique entre deux partenaires situés à distance. [Haans et al. \(2007\)](#) montra que bien que médié, ce style de toucher pouvait non seulement être

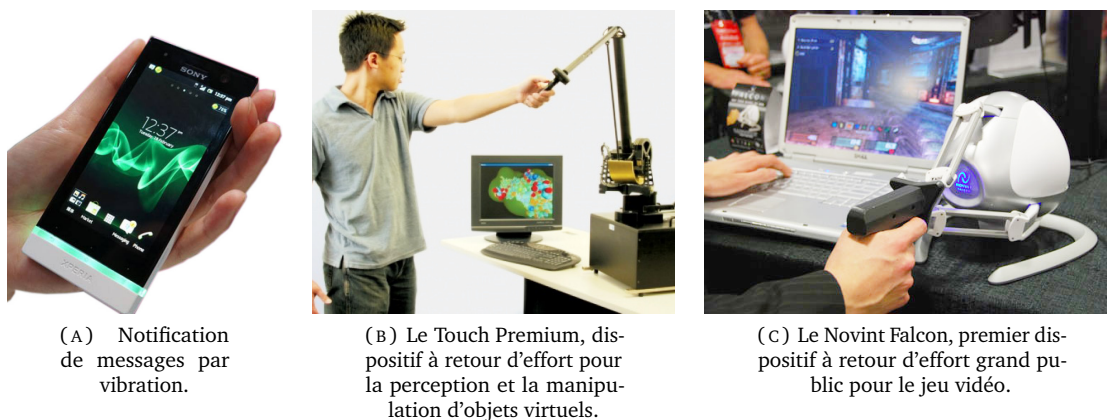


FIGURE 1.8: Utilisation courante des dispositifs haptiques. Aucun de ces dispositifs n'a été développé pour la communication affective.

perçu de la même manière qu'un toucher non médié, mais aussi avoir des impacts similaires sur le plan affectif.

Le développement des interfaces haptiques pour la communication médiée est relativement récent. [Brave et Dahley \(1997\)](#) ont développé un dispositif à base de trois cylindres motorisés pour communiquer à distance. Cependant, ils n'ont pas proposé pas de langage haptique associé, se limitant à étudier la manière dont des sujets l'utilisaient et si la voie de la communication médiée par le toucher semblait prometteuse. Un an plus tard, [Fogg et al. \(1998\)](#) ont proposé un dispositif haptique tenu en main, cette fois-ci en proposant un langage haptique associé très basique pour la communication entre deux personnes. Il faudra encore attendre les travaux de [Enriquez et al. \(2004\)](#); [Macleane et al. \(2004\)](#) pour poser les bases d'une communication haptique humain-humain médiée structurée par un langage haptique.

C'est [Hertenstein et al. \(2006a\)](#) qui ont mené la première étude sur la communication haptique des émotions. Ils étudièrent la manière dont des sujets communiquent une émotion en stimulant physiquement le bras d'un autre individu, caché à leur vue par un rideau et ayant l'interdiction de parler. Des expérimentations ont été menées pour étudier l'efficacité de différentes méthodes pour exprimer les émotions par le toucher : caresses, tapotements, etc. Il a été observé des similarités dans l'expression de certaines émotions de base. Les taux de reconnaissance élevés de certaines émotions (exemple : 71 % pour le dégoût) suggèrent que la modalité haptique permettait de communiquer par le toucher efficacement les émotions étudiées.

[Bailenson et al. \(2007\)](#) menèrent des travaux similaires à ceux d'[Hertenstein et al.](#), mais dans le contexte une poignée de main médiée à l'aide d'un joystick. Leur étude portait sur la manière dont des sujets exprimaient les différentes émotions de bases avec ce joystick. Dans un deuxième temps, ils restituèrent les expressions haptiques collectées à d'autres sujets afin d'étudier la perception des émotions. Bien qu'obtenant des taux de reconnaissance inférieurs à ceux d'[Hertenstein et al.](#), ils restaient supérieurs au seuil de hasard.

Cependant, toutes les émotions ne semblent pas pouvoir s'exprimer par la modalité haptique. C'est notamment le cas des émotions centrées sur soi-même, comme la fierté ou la honte. [Thompson et](#)

Hampton (2011) ont montré cependant que si les partenaires se connaissaient suffisamment, ces émotions pouvaient malgré tout se communiquer par la modalité haptique.

Avec des méthodes de rendus adaptées, il est aujourd'hui possible de rendre des expressions haptiques de synthèse suffisamment crédibles pour que des individus ne puissent pas les distinguer d'expressions haptiques restituées d'après un sujet réel (Avraham et al. (2012)).

Nakagawa et al. (2011) ont étudié l'influence sur l'émotion d'un toucher humain-robot. Ils ont montré qu'en touchant de façon active une personne (par exemple en caressant sa main), un robot est capable de motiver une personne pour effectuer une tâche ennuyeuse qui lui est proposée. Les interfaces haptiques permettent donc de communiquer ou d'induire des émotions dans un contexte d'interaction médiée.

1.3.3 Interfaces homme-machine dédiées à la communication homme-homme des émotions par la modalité haptique

A l'origine, les dispositifs haptiques ne furent pas conçus pour la communication affective. Les bras à retour d'effort sont davantage conçus pour la téléopération et l'interaction avec les environnements virtuels, tandis que les vibreurs des téléphones mobiles ne peuvent rendre que des stimulations tactiles très limitées.

Le développement de nouvelles interfaces haptiques est fortement contraint par les limites technologiques actuelles. En effet, il n'est pas possible aujourd'hui de construire une interface haptique permettant de stimuler l'intégralité de la surface du corps. De ce fait, les interfaces existantes sont conçues pour stimuler des zones prédéfinies du corps, selon un type de stimulation haptique prédéfini. La forme même de ces interfaces pose une contrainte, puisqu'elles risquent d'être trop intrusive pour leurs utilisateurs et de les gêner (MacLean (2000)).

Cette section présente les dispositifs développés dans le but de permettre une communication affective en IHM via la modalité haptique. Cette section sera divisée en trois parties. La première partie traite de l'augmentation de téléphones mobiles. Ces derniers étant déjà répandus dans la société, développer des interfaces haptiques intégrées à ces dispositifs permettrait un déploiement commercial rapide. Cependant, les possibilités de rendu haptique sont limitées dû au téléphone, qui doit rester petit et léger.

Nous explorerons alors dans un deuxième temps différentes technologies portables permettant de répondre à ces contraintes. Dans un troisième temps, nous aborderons l'interaction homme-robot pour mettre en place une communication affective entre un humain et un robot. Enfin, nous verrons des interfaces haptiques intégrées à l'environnement, permettant des stimulations haptiques plus intéressantes mais étant en contre-partie coûteuses en espace.

1.3.3.1 Augmentation de téléphones mobiles pour la communication affective via la modalité haptique

Avec le développement d'Internet, l'ordinateur personnel est devenu l'un des dispositifs de communication les plus utilisés : mail, messagerie instantanée, communication audio et vidéo. Les

ordinateurs n'exploitent pas la modalité haptique dans la communication médiée. À l'inverse, les téléphones mobiles embarquent aujourd'hui tous un vibreur, principalement utilisé pour capter l'attention de l'utilisateur lorsque la modalité audio n'est pas adaptée. Bien que ce vibreur soit très limité en possibilité de rendu haptique, il a l'avantage d'être répandu. Cette section présente des interfaces haptiques destinées aux téléphones mobiles, permettant d'enrichir leurs possibilités de rendu haptique.

Luk et al. (2006) propose un système tactile piézoélectrique, c'est à dire dont la forme se modifie à l'application d'un courant, à l'endroit où les utilisateurs placent leur pouce. Ce système permet de rendre des signaux plus complexes que le vibreur intégré, comme des textures tactiles. Bien que ce dispositif ne soit pas conçu pour la communication affective, il permet d'enrichir un téléphone mobile de nouvelles possibilités de stimulation haptique.

Par la suite, Park et al. (2010) ont placé une matrice de vibreurs sur la coque d'un téléphone tactile. Il ont défini des mouvements applicables sur l'écran qui sont retranscrits haptiquement sur le téléphone de leur interlocuteur. Ceci permet de transmettre des stimulation tactiles comme des chatouilles, des caresses ou encore un baiser. La figure 1.9a illustre ce dispositif.

Hashimoto et al. (2009) souhaitent reproduire le même type de stimuli. Leur plateforme est composée d'un haut-parleur placé sur un téléphone et recouvert de la main permet de rendre des sensations tactiles par dépressions et surpressions créées par le haut-parleur. Ce dispositif illustré figure 1.9b permet par exemple de simuler un tapotement par une surpression rapide suivie par d'une dépression rapide.

ur Réhman et Liu (2010) proposent une autre utilisation de la modalité haptique destinées aux aveugles. Ils associent les formes de lèvres de l'interlocuteur observées par caméra à des émotions. Chaque émotion reconnue est associée à un stimulus haptique pour permettre aux aveugles de percevoir l'émotion de leur interlocuteur. Le dispositif augmenté est illustré figure 1.9c.

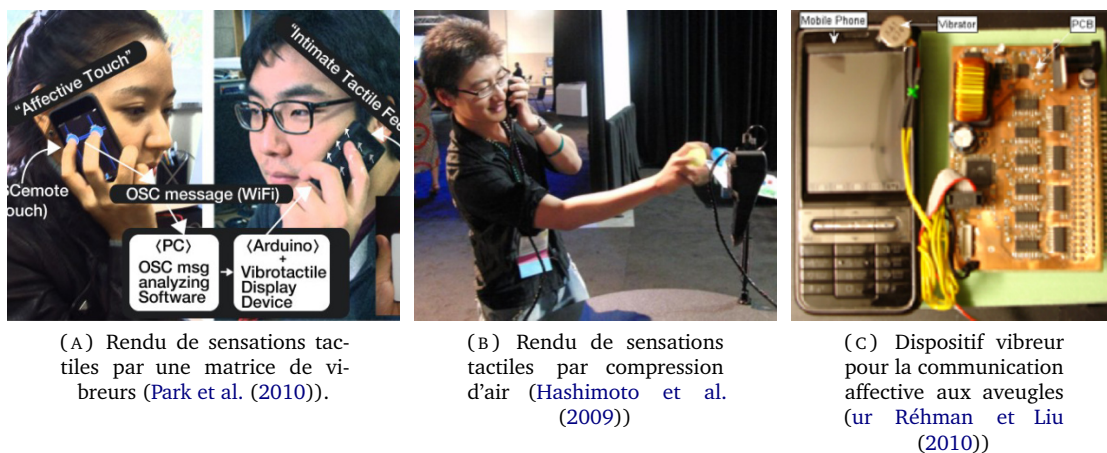


FIGURE 1.9 : Téléphones mobiles augmentés pour la communication affective via la modalité haptique.

Ces dispositifs correspondent à des augmentations de téléphones mobiles. De ce fait, ils présentent des contraintes liées à ces dispositifs. Par exemple, ils ne peuvent stimuler que la joue de

l'utilisateur si ce dernier est en conversation audio, le téléphone devant être placé près de son oreille.

1.3.3.2 Interfaces haptiques portables

Une autre approche technique pour l'intégration de la modalité haptique pour la communication des émotions est de réaliser des interfaces portables. Ce type d'interface se porte sur le corps comme des vêtements. Ces interfaces permettent ainsi de stimuler de plus larges zones du corps.

Bonanni et Vaucelle (2006) proposèrent une écharpe équipée de tactons, permettant une stimulation tactile du porteur. De façon similaire, Lemmens et al. (2009) équipent une veste de tactons pour enrichir l'expérience cinématographique de l'utilisateur avec des stimulations tactiles diffusées au cours de films. Tsetserukou et Neviarouskaya (2010) ont mis au point un dispositif composé de plusieurs éléments répartis sur le haut du corps. Ce système produit des stimuli haptiques visant à reproduire des sensations comme l'enlacement.

Chung et al. (2009) proposèrent un dispositif tactile placé dans le dos permettant à une personne de recevoir des massages par des inconnus via Internet. Pour chaque personne répondant à l'appel, une zone du dos est stimulée en fonction de l'emplacement géographique de la personne.

Lemmens et al. (2009) ont proposé d'utiliser des stimulations haptiques afin d'augmenter la réponse émotionnelle dans un contexte de visionnage de films. Il demandèrent à des personnes de porter une veste équipée d'une série de stimulateurs tactiles. Ils ont défini quarante motifs tactiles à reproduire au cours d'un clip, chacun lié à une émotion (la surprise produira par exemple des mouvements énergétiques). Avec la stimulation haptique, les sujets ont trouvé les clips un peu plus immersifs, offrant une expérience plus intense. Plus intéressant, leurs réponses physiologiques étaient également plus fortes lorsque la veste les stimulait.

D'autres dispositifs proposent de stimuler la main. Krishna et al. (2010) ont proposé une version haptique des émoticônes grâce au VibroGlove, dispositif en forme de gant avec neuf vibreurs : trois situés sur l'index, trois sur le majeur et trois sur l'annulaire. Des vibrations sont envoyées pour reproduire la forme de la bouche pour exprimer une émotion (par exemple, un sourire est représenté par une vibration au milieu de l'index, du bas du majeur et du milieu de l'annulaire).

Huisman et al. (2013) ont récemment fait la démonstration d'un dispositif à porter sur le bras, constitué de capteurs tactiles et d'une matrice de vibreurs. Avec ce dispositif, il est possible d'enregistrer et de restituer des stimuli tactiles en faisant vibrer des zones définies sur le bras de l'utilisateur.

1.3.3.3 Interfaces haptiques zoomorphiques pour la communication affective homme-robot

Les dispositifs présentés dans cette section ont été spécifiquement développés pour la communication affective entre un homme et un robot de forme animale.

Ces dispositifs ressemblent à des animaux affectueux afin d'inciter les utilisateurs à interagir physiquement avec eux, comme le montre le robot en forme de bébé phoque illustré en figure 1.11a



FIGURE 1.10 : Dispositifs augmentés pour la communication affective. Ces dispositifs, basés le plus souvent sur des stimulations par vibrations, permettent de stimuler diverses zones du corps.

(Shibata et Tanie (2001)). Le succès commercial de Furby (Tiger Electronic, illustré figure 1.11b), un jouet qui répond aux interactions physiques, démontre l'intérêt des robots zoomorphiques pour la communication affective. Cet intérêt est d'autant plus flagrant lorsqu'on augmente une peluche destinées aux enfants (Stiehl et al. (2006), voir figure 1.11c).

Ces robots zoomorphiques présentent de nombreux avantages. Premièrement, les animaux sont connus pour pouvoir induire des réactions émotionnelles. Deuxièmement, un robot de forme animal souffre moins de l'effet de la vallée dérangeante qu'un robot de forme humanoïde (Ho et al. (2008); Becker-Asano et al. (2010)). Enfin, il semble naturel aux individus d'interagir avec des robots d'aspect animal par le toucher, car naturellement nous ne pouvons pas communiquer verbalement avec les animaux.

Un des exemples les plus développés de ces robots de forme animale est la créature haptique de Yohanan et al.. Il s'agit d'un animal artificiel capable de communiquer son état uniquement par la modalité haptique. Ce robot est capable de faire varier sa température, simuler une respiration, et ronronnement et de rendre ses oreilles plus ou moins raides. Ce robot est illustré figure 1.11d. Utilisant au début un magicien d'Oz pour contrôler ses réactions, cette créature peut aujourd'hui répondre de façon autonome aux interactions avec les utilisateurs et communiquer différents états émotionnels (Yohanan et MacLean (2008); Yohanan et al. (2009); Yohanan et MacLean (2011)).

On peut citer un dernier avantage à ces créatures à l'aspect animal. Dotées de poils, elles permettent de dissimuler des capteurs permettant de détecter les contacts physiques et pour la suite générer une stimulation appropriée. Des fourrures conductrices ont également été développées pour ce type de robot. (Knight et al. (2009); Chang et al. (2010); Flagg (2012)).

Bien que les robots zoomorphiques soient donc adaptés pour la communication affective avec un robot, ils ne permettent en revanche pas de réaliser une communication médiée homme-homme.



(A) Paro, un robot à la forme d'un bébé phoque (Shibata et Tanie (2001)).



(B) Le robot Furby : un succès commercial.



(C) Le Huggable, robot prenant l'apparence d'une peluche d'enfant (Stiehl et al. (2006)).



(D) La créature haptique (Yohanan et MacLean (2011)).

FIGURE 1.11 : Robots zoomorphiques pour l'interaction affective par le toucher.

1.3.3.4 Interfaces haptiques intégrées à l'environnement

Les interfaces haptiques présentées jusqu'ici ont des limitations en terme de rendu ou peuvent être intrusives. Cette section présente des interfaces fixes dans l'environnement et ne nécessitant donc pas d'être portées.

Danieau et al. (2014) ont étudié les effets de l'augmentation d'un fauteuil de stimulations haptiques dans un contexte de visionnage de film. Leurs résultats ont montré que le retour haptique augmentait la qualité de l'expérience cinématographique. Similairement, Kok et Broekens (2008) a augmenté un fauteuil de vibreurs, systèmes d'irrigation et de ventilation pour enrichir l'expérience émotionnelle. Ce fauteuil permet d'exprimer à l'utilisateur un rythme cardiaque à l'aide de vibreurs, de la sudation à travers de l'eau diffusée dans son dos et des changements de températures. Ces stimulations ont pour but de simuler un état affectif chez le sujet, permettant d'enrichir son expérience cinématographique par une simulation de symptômes émotionnels. Dijk et al. (2009) développent une matrice de vibreurs qu'ils placent entre deux couches de tissu. Ce système permet de doter une surface d'une stimulation tactile, par exemple en l'étalant sur un canapé. Ce système devrait donc permettre d'enrichir l'expérience émotionnelle éprouvée lors d'un film.

Les interfaces complexes permettent d'accéder à de nouveaux paramètres haptique jusqu'alors inexploités. [Amami et al. \(2015\)](#) ont étudié l'influence de la force de serrage dans une poignée de main en IHM sur l'émotion perçue. Ils ont proposé d'utiliser un robot humanoïde Meka (voir figure 1.12b). Les résultats de leur étude révélèrent que lorsque le robot sert avec force la main de l'utilisateur dans un contexte de poignée de main, ce robot est perçu plus dominant que s'il serrait la main avec peu de force. Cette interface permet un contact riche avec nombreux degrés de liberté, reproduisant des mouvements humains. Elle est cependant massive et onéreuse.

Toutes les interfaces haptiques présentées jusqu'à présent partagent un défaut : elle nécessite un contact direct avec l'utilisateur. Ceci est intrusif et limite les zones du corps qui peuvent être stimulées. C'est pour pallier à ces limitations que sont nées les interfaces haptiques sans contact, comme le système à ultrasons de [Shinoda \(2011\)](#) et les systèmes à air comprimé de [Suzuki et Kobayashi \(2013\)](#); [Tsalamlal et al. \(2014\)](#) (voir figure 1.12c). Les stimulations produites sont en revanche limitées en intensité, et les interfaces sans contacts sont généralement complexes.

Les interfaces présentées ci-dessus ont été réalisées pour de la communication affective. Elles permettent de stimuler différentes zones du corps, sans être toujours en contact avec elles. Elles sont cependant généralement coûteuses en temps d'installation et en espace.

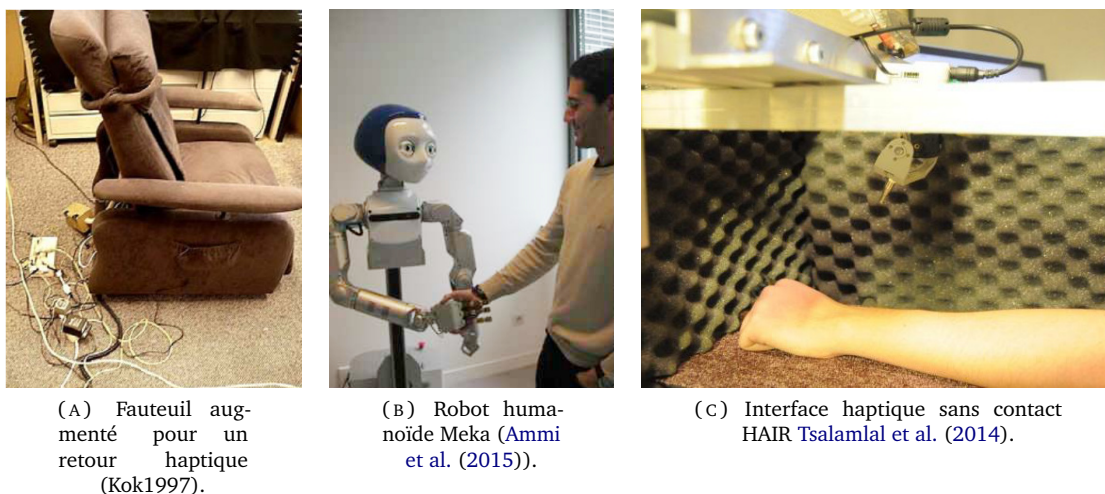


FIGURE 1.12: Dispositifs fixes permettant de communiquer des émotions.

1.4 Conclusion

Nous avons introduit dans cette étude bibliographique deux grands domaines de recherche : la communication des émotions et l'importance du toucher social dans la communication affective. Nous avons également vu que l'expression non-verbale des émotions s'intègre de plus en plus dans nos communications médiées, par exemple grâce aux humains virtuels. Ce n'est que depuis récemment que la modalité haptique commence à être elle aussi intégrée. Le développement récent des interfaces robotiques permet en effet de croiser communication médiée et toucher.

De nombreuses études s'intéressent à la perception haptique d'émotions exprimées grâce à des dispositifs novateurs. Deux aspects de la communication haptique restent cependant peu exploités. Le premier aspect concerne la manière dont l'émotion est exprimée par un individu via la modalité haptique. Le second aspect concerne l'influence d'un couplage entre la modalité haptique et une autre modalité. C'est pourquoi nous avons aujourd'hui des lacunes dans la description de l'expression haptique de certaines émotions et à utiliser ces expressions pour augmenter la communication non-verbale.

Par ailleurs, toutes les études sur la modalité haptique s'intéresse à la communication d'émotions actées. Notre état de l'art a cependant mis en évidence l'importance d'étudier des expressions d'émotions plus spontanées. Nous terminerons donc nos travaux avec l'étude de la communication médié (expression et perception) d'un stress par la modalité kinesthésique. La conclusion de ce rapport sera pour nous l'occasion de faire le point sur la contribution de nos travaux sur la communication kinesthésiques des émotions.

L'EXPRESSION KINESTHÉSIQUE DES ÉMOTIONS ACTÉES

Sommaire

2.1	Introduction	36
2.2	Contexte de l'étude et objectifs	37
2.2.1	Travaux existants	37
2.2.2	Objectifs	38
2.3	Étude des expressions kinesthésiques des émotions	39
2.3.1	Hypothèses	39
2.3.2	Méthode expérimentale	39
2.3.3	Résultats	45
2.3.4	Analyse et Discussion	48
2.4	Analyses alternatives	51
2.4.1	Analyse en composante principale	51
2.4.2	Clustering	53
2.5	Proposition d'une nouvelle méthode	55
2.5.1	Principe global de la méthode d'analyse	55
2.5.2	Résultats	58
2.5.3	Avantages de la méthode proposée	61
2.6	Conclusion	63
2.6.1	Résumé des travaux	63
2.6.2	Synthèse et perspectives	63

2.1 Introduction

De plus en plus d'études s'intéressent à la communication des émotions à distance par la modalité kinesthésique. Notre étude bibliographique a mis en évidence que les travaux dans ce domaine visent principalement à développer de nouvelles interfaces haptiques pour la communication affective (Yohanan et MacLean (2011); Tsalamlal et al. (2014)). Peu d'études se focalisent sur la manière dont une personne exprime ses émotions par la modalité kinesthésique (Bailenson

et al. (2007)). Ce type d'étude est néanmoins fondamental pour proposer une communication kinesthésique des émotions qui soit efficace.

Pourtant, ces travaux visant à décrire l'expression kinesthésique des émotions se limitent généralement à des analyses de variance basiques pour décrire des expressions kinesthésiques. Pendant ce temps, les études portant sur les modalités visuelles et auditives utilisent des méthodes plus avancées et adaptées. L'approche par analyse de variance présente en effet certaines limitations que nous aborderons ici. Dans un premier temps, nous collecterons un corpus d'expressions kinesthésiques d'émotions que nous analyserons afin d'identifier des invariants. Dans un deuxième temps, nous comparerons les expressions collectées entre elles, ainsi qu'à celles provenant d'autres études existantes à l'aide d'une méthode d'Analyse de Variance (ANOVA) classique. Sur la base de ces résultats, nous proposerons une méthode d'analyse plus appropriée pour la discrimination d'expressions kinesthésiques des émotions.

Ce chapitre s'organise de la façon suivante. La section suivante décrira les récents travaux concernant l'étude de l'expression kinesthésique ou orale de certaines émotions actées. La section 2.3 présentera la création d'un corpus d'expressions kinesthésiques de certaines émotions, que nous analyserons par ANOVA et dont nous comparerons les caractéristiques avec les expressions issues de d'autres études similaires. Après avoir mis en évidence les limites des analyses statistiques par ANOVA, nous étudierons dans la section 2.4 d'autres outils existants que nous appliquerons à notre corpus. Sur la base de ces résultats, nous proposerons en section 2.5 une méthode d'extraction de paramètres kinesthésiques pertinents pour discriminer les émotions étudiées, que nous appliquerons à notre corpus. Enfin, la section 2.6 conclura ce deuxième chapitre.

2.2 Contexte de l'étude et objectifs

2.2.1 Travaux existants

2.2.1.1 Analyse de l'émotion exprimée par la modalité haptique

De multiples études ont abordé l'efficacité de la modalité kinesthésique pour exprimer des émotions. Tsetserukou et Neviarouskaya (2010); Bonnet et al. (2011) tentent d'identifier la manière dont une émotion peut être exprimée, par exemple, avec des gestes de balancement pour la joie ou des tapotements pour le dégoût.

Bailenson et Yee (2007) ont proposé une approche statistique pour identifier les paramètres caractérisant les expressions kinesthésiques d'un certain nombre d'émotions. Leur travail se décompose en trois étapes. La première consiste à collecter un corpus d'expressions auprès de sujets. La deuxième étape consiste à extraire de ces expressions certaines mesures, comme la distance totale parcourue au cours de l'expression ou la vitesse moyenne. Enfin, la troisième étape consiste à utiliser une ANOVA afin de déterminer les mesures discriminant les expressions de différentes émotions.

D'autres études utilisent cependant des méthodes d'analyse plus avancées. Knight et al. (2009) ont proposé une approche combinant séries de Fourier et bases de données afin de reconnaître des expressions haptiques comme un serrage de mains ou une chatouille. Chang et al. (2010);

Yohanan et MacLean (2011) ont utilisé des modèles de Markov cachés afin de reconnaître les gestes appliqués sur leur propre dispositif tactile. Cette approche permet notamment de prédire le prochain geste qui sera effectué en se basant sur les gestes précédemment reconnus. Ces deux approches permettent de reconnaître les gestes et émotions en temps réel, permettant une interaction bi-directionnelle avec les utilisateurs.

2.2.1.2 Analyse de l'émotion exprimée dans la parole

À titre de comparaison, les analyses des expressions orales de l'émotion sont plus avancées en termes d'outils statistiques employés. Dès la fin du vingtième siècle, Dellaert et al. (1996) comparent différents types de méthodes permettant de discriminer des expressions de certaines émotions. Leur étude conclut qu'une méthode de clustering avec l'algorithme des K plus proches voisins donne de meilleurs résultats d'analyse que des approches Bayésienne et de régression.

Certaines études comme celles de Nicholson et al. (2000); Bhatti et al. (2004); Polzehl et al. (2009) se basent sur des modèles de réseaux de neurones afin d'apprendre à reconnaître les émotions en fonction de paramètres d'entrée. Cependant, ces modèles ne permettent pas de prendre en compte les paramètres dynamiques, c'est à dire les variations des paramètres au cours du temps. L'utilisation d'autres modèles comme ceux de Markov cachés utilisés dès 2003 par Nwe et al. (2003); Schuller et al. (2003) permettent de prendre en compte cet aspect.

Concernant les paramètres des expressions étudiés, Ververidis et al. (2004) ont utilisé une Analyse en Composantes Principales (ACP) pour réaliser une sélection de paramètres pertinents. Vogt et André (2005) ont analysé 1280 paramètres avec un algorithme de sélection basé sur les corrélations afin d'obtenir un ensemble de paramètres sans corrélations entre eux. Plus récemment, Lu et al. (2007); Mower et Narayanan (2011) ont combiné des modèles de Markov avec des outils permettant de sélectionner les paramètres les plus efficaces pour discriminer les expressions de différentes émotions.

2.2.2 Objectifs

Les travaux présentés ci-dessus étudient des expressions haptiques ou orales d'états affectifs. Les études dans la modalité haptique présentent en comparaison un retard dans leurs méthodes d'analyses d'expressions. Elles se limitent souvent à des approches ANOVA, avec un nombre limité de paramètres qui ne sont pas forcément les plus pertinents.

Il existe à ce jour un certain nombre d'études portant sur la caractérisation d'expressions kinesthésiques d'émotions. Bien que ce nombre ne fait que croître, peu d'études s'intéressent à la discrimination d'émotions sémantiquement proches, comme la joie et l'exaltation. Nous chercherons dans ce chapitre à déterminer si les expressions kinesthésiques de telles émotions sont discriminables entre elles. C'est pourquoi, nous commencerons ici par la création d'un corpus d'expressions kinesthésiques d'émotions sémantiquement proches. L'analyse de ce corpus présente deux objectifs. Premièrement, discriminer les expressions de différentes émotions entre elles, en particulier celles qui sont sémantiquement proches. Deuxièmement, comparer nos résultats à celles de d'autres études similaires afin de déterminer si les expressions kinesthésiques de certaines émotions présentent des similitudes à travers différentes populations d'individus.

Cependant, la méthode d'analyse couramment employée (analyse de variance) possède de nombreuses limitations. Nous tenterons également de répondre à ces limitations en tant que troisième objectif de ce chapitre. Nous explorerons d'autres méthodes existantes palliant à ces limitations. Nous proposerons ensuite une méthode d'analyse plus adaptée à la discrimination d'expressions kinesthésiques des émotions.

Ces trois objectifs nous permettront d'améliorer la caractérisation et la discrimination d'expressions kinesthésiques de différentes émotions.

2.3 Étude des expressions kinesthésiques des émotions

L'objectif de cette étude est de créer un corpus d'expressions kinesthésiques d'émotions ayant la particularité d'être sémantiquement proches entre elles. Ce corpus permettra d'extraire les différences entre les expressions des différentes émotions. Nous comparerons également ces données à celles d'autres études utilisant un protocole de collecte similaire.

2.3.1 Hypothèses

Divers travaux portant sur l'expression des émotions utilisant les modalités tactiles, gestuelles et kinesthésiques comme ceux de [Basori et al. \(2007\)](#); [Bailenson et al. \(2007\)](#); [Castellano \(2008\)](#) ont révélé que les expressions de différentes émotions présentaient des différences entre elles. Sur la base de ce résultat, ainsi que de notre objectif de discriminer certaines émotions sémantiquement proches à l'aide de la modalité kinesthésique, nous posons deux hypothèses :

H1 Les expressions kinesthésiques des différentes émotions présentent des différences entre elles.

H2 Les expressions kinesthésiques d'émotions proches présentent des différences entre elles.

2.3.2 Méthode expérimentale

2.3.2.1 Sujets

40 sujets, 33 ans d'âge moyen ($SD = 8$, $min = 20$, $max = 53$) ont participé à cette expérimentation. Nous n'analyserons pas les effets du genre, de la main dominante ou de l'éducation sur les résultats à cause de la grande majorité d'hommes (32), droitiers (33) et des sujets ayant reçu une éducation européenne (35).

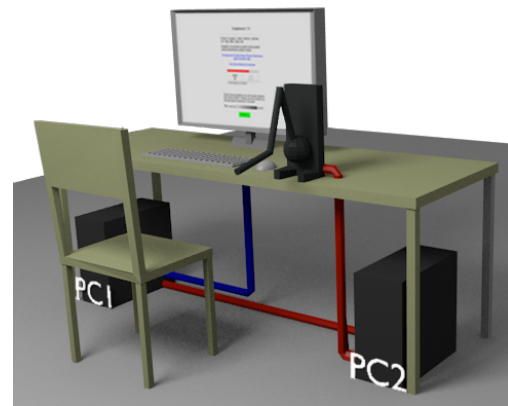
2.3.2.2 Plateforme expérimentale

La plateforme expérimentale requiert un dispositif permettant de collecter et de restituer des expressions kinesthésiques. Afin de pouvoir comparer nos résultats à ceux de [Bailenson et al. \(2007\)](#), nous nous sommes orientés vers un dispositif nommé Geomagic Touch X, illustré figure 2.1a et présenté plus en détails en annexe B.1. Ce dispositif possède un large espace de travail en trois dimensions de $16 \times 12 \times 12$ cm et peut exercer une force allant jusqu'à de 7.9 N. Cet espace

de travail et cette force permettent de restituer des expressions kinesthésiques présentant une vitesse relativement élevée. Ce dispositif est placé sur une table, à gauche ou à droite du sujet selon sa main dominante. Un clavier et une souris permettent de contrôler le déroulement de l'étude.



(A) Dispositif Geomagic Touch X



(B) Plateforme expérimentale

FIGURE 2.1 : Plateforme expérimentale de collecte d'expressions kinesthésiques d'émotions. L'ordinateur client PC1 contrôle l'expérience, liant le formulaire au contrôle du bras. L'ordinateur serveur PC2 est dédié à la collecte des expressions kinesthésiques et à leur restitution sur le dispositif kinesthésique.

La plateforme utilise deux ordinateurs selon une architecture client-serveur (voir figure 2.1b). L'ordinateur client gère le déroulement de l'étude. Il fait le lien entre les instructions affichées à l'écran aux sujets, les entrées de la souris et du clavier et commande l'enregistrement ou la restitution de données par le Geomagic Touch X. L'ordinateur serveur gère le dispositif kinesthésique. Il exécute les requêtes d'enregistrement ou de restitution d'expressions envoyées par le client. Les données correspondant aux expressions kinesthésiques ont un taux d'échantillonnage de 1 ms et sont stockées en local sur l'ordinateur serveur. Ceci permet d'éviter de les charger depuis le client. Cette configuration proposant un ordinateur dédié au contrôle du dispositif kinesthésique assure une stabilité optimale pour l'enregistrement et la restitution des expressions. La connexion entre les deux ordinateurs s'effectue via une connexion UDP locale.

2.3.2.3 Variables

Cette étude utilise deux types de variables. Premièrement, une variable indépendante correspondant aux émotions étudiées. Deuxièmement, des mesures calculées à partir des expressions collectées. Ceci nous permettra de déterminer les différences entre les expressions de différentes émotions.

Variable indépendante. La variable indépendante de notre étude correspond aux différentes émotions étudiées. Certaines études comme celles de [Hertenstein et al. \(2006a\)](#); [Bailenson et al. \(2007\)](#) se focalisent sur l'expression haptique des six émotions de base (e.g. joie, tristesse, dégoût, surprise, peur, colère). Notre seconde hypothèse liée aux différences entre émotions sémantiquement proches entre elles exclue de nous limiter à ces émotions. De ce fait, les émotions de

Paires n°	Émotion	Plaisir	Activation	Dominance
Paire 1	Joie	0.76	0.48	0.35
	Exaltation	0.50	0.42	0.23
Paire 2	Dégout	-0.60	0.35	0.11
	Mépris	-0.23	0.31	0.18
Paire 3	Inquiétude	0.01	0.59	-0.15
	Peur	-0.64	0.60	-0.43
Paire 4	Irritation	-0.58	0.4	0.01
	Rage	-0.44	0.72	0.32

TABLE 2.1 : Les quatre paires d'émotions étudiées et leur valeur dans l'espace PAD d'après [Russell et Mehrabian \(1977\)](#).

notre étude sont reprises de l'étude de [Sander et al. \(2005\)](#), basée des émotions sémantiquement proches.

L'étude de [Sander et al. \(2005\)](#) étant réalisée dans un pays anglophone, elle utilise les noms anglais des émotions. Nos sujets potentiels sont cependant majoritairement francophones. Nous avons donc choisi d'utiliser les noms français correspondant aux émotions étudiées dans cette recherche. L'étape de traduction d'une langue à l'autre est délicate car nous souhaitons étudier des émotions sémantiquement proches. De ce fait, la distinction entre les termes doit être claire et précise. Nous nous sommes basés sur les propositions de traduction de [Van Goozen et Frijda \(1993\)](#) afin d'obtenir les termes français les plus appropriés.

Nous avons retenu huit émotions pour cette étude. Ces émotions constituent l'ensemble des valeurs prises par notre variable indépendante **Vi1** : {Joie, Exaltation, Dégout, Mépris, Inquiétude, Peur, Irritation, Rage}. Les émotions sont étudiées par couples d'émotions provenant de la même catégorie. La figure 2.2 montre la proximité de ces émotions dans l'espace Plaisir-Activation-Dominance (PAD), décrit en 1.2.1.2. Le tableau 2.1 donne la position exacte de chaque émotion dans cet espace. Les émotions constituant chaque couple ont ainsi des valeurs de plaisir, activation et de dominance de même sens, excepté pour l'inquiétude et la peur.

Variables dépendantes. Pour chaque expression kinesthésique collectée, nous collectons la séquence de positions 3D $[(x, y, z)_1, (x, y, z)_2, \dots, (x, y, z)_n]$ enregistrées par le Geomagic Touch X lorsque le sujet exprime une émotion.

À partir de ces positions, nous calculons des mesures permettant de décrire l'expression. Ces mesures objectives ont été utilisées avec succès dans de précédentes études pour analyser les expressions de certaines émotions. La plupart de ces études portaient sur la modalité kinesthésique ([Bailenson et al. \(2007\)](#)) et discriminaient les expressions selon leur cinématique. D'autres études portaient sur la modalité gestuelle ([Hartmann et al. \(2006\)](#); [Castellano \(2008\)](#)) et discriminaient les expressions selon leur trajectoire. La comparaison des valeurs de ces mesures entre les expressions des différentes émotions étudiées permettra de valider ou d'infirmer **H1** et **H2**.

Il est à noter que nos mesures concernent bien la description d'expressions kinesthésiques et non gestuelles : elles sont liées au contact physique entre l'homme et le dispositif de collecte, à l'instar de l'étude de [Bailenson et al. \(2007\)](#). La liste suivante présente chaque mesure objective (ci-après abrégée par **Mo**) calculée à partir des expressions collectées.

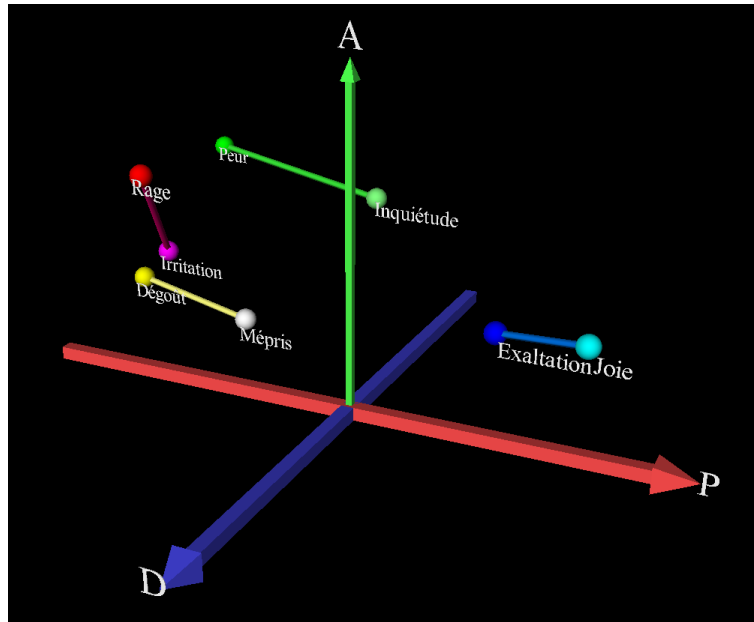


FIGURE 2.2: Les huit émotions étudiées dans l'espace PAD (Russell et Mehrabian (1977)).

Mo1 Durée (s). Durée de l'expression : calculée automatiquement lors de l'enregistrement.

Mo2 Distance parcourue (cm). Distance totale parcourue au cours de l'expression : $\sum_{t=0}^{n-1} d(p_t, p_{t+1})$, avec $d(p_t, p_{t+1})$ la distance Euclidienne entre les points pris aux temps t et $t + 1$. Une faible valeur de cette mesure signifie que le sujet n'a pas beaucoup bougé.

Mo3 Vitesse moyenne (cm.s⁻¹). Vitesse moyenne de l'expression : $\frac{\text{Mo2}}{\text{Mo1}}$. Une faible valeur de cette mesure correspond à un geste lent.

Mo4 Aspect saccadé (cm.s⁻²). Degré de fluidité de l'expression, définit comme la variation moyenne des accélérations instantanées : $\sum_{t=0}^{n-1} |a(t+1) - a(t)| / n$, avec $a(t)$ l'accélération au temps t . Une faible valeur de cette mesure signifie un geste souple, présentant peu de changements d'accélération.

Mo5 Amplitude (cm). Amplitude maximale du geste, définit comme la distance entre les deux points les plus éloignés de la boîte englobant l'expression. Une faible valeur de cette mesure caractérise un geste très restreint dans l'espace.

Mo6 Indice d'expansion (cm). Distance moyenne du barycentre de l'expression à ses points : $\sum_{t=0}^n \frac{d(p(t), \text{isobar})}{n}$, avec $d(p_t, \text{isobar})$ la distance Euclidienne entre le point pris à l'instant t et le barycentre de l'expression. Le barycentre de l'expression correspond à la position moyenne dans l'espace des points de l'expression. Une faible valeur de cette mesure signifie une trajectoire concentrée autour d'un point de l'espace.

Mo7 Axe majeur du mouvement. Axe décrivant le sens général du mouvement de l'expression, calculé par Décomposition en Valeurs Singulières (DVS) (Klema et Laub (1980)). Afin d'être exploitable par l'ANOVA, chaque axe de ce vecteur est considéré séparément : **Mo7-X** pour l'axe gauche-droite, **Mo7-Y** pour l'axe haut-bas, et **Mo7-Z** pour l'axe de la profondeur.

Mo8 Poids de l'axe majeur. Importance de l'axe majeur sur la gestuelle, déterminée par DVS. Plus cette valeur s'approche de 1, plus l'expression est contrainte sur l'axe majeur du mouvement.

Mo9 Poids du second axe majeur. Importance de second axe majeur sur la gestuelle, orthogonal à l'axe majeur, déterminée par DVS.

Mo10 Nombre de répétitions. Estimation du nombre de répétitions dans l'expression kinesthésique [Hartmann et al. \(2006\)](#). Cette estimation s'effectue par récupération du barycentre spatial de l'expression kinesthésique, calculé en Mo6, et de son axe majeur, calculé en Mo7. Nous projetons ensuite tous les points de l'expression sur l'unique droite passant par le barycentre et dont le vecteur direct est l'axe majeur. Nous comptons une répétition à chaque fois que le barycentre est traversé dans un sens prédéfini.

En plus de ces 10 mesures principales, les mesures de Mo2 (Distance parcourue), Mo3 (Vitesse moyenne), Mo4 (Aspect saccadé), Mo5 (Amplitude) et Mo6 (Indice d'expansion) sont aussi déclinées sur les trois axes (gauche-droite, haut-bas et profondeur, ci-après nommés respectivement *X*, *Y* et *Z*) calculés séparément. Ceci conduit à un total de 27 mesures associées à chaque expression kinesthésique collectée.

En complément de ces mesures objectives, nous considérons pour chaque expression la mesure subjective Ms1 du niveau de confiance accordée par chaque sujet en la capacité de cette expression à exprimer efficacement l'émotion demandée. Ce niveau est relevé sur une échelle de Likert à 7 points.

2.3.2.4 Procédure expérimentale

Présentation de l'expérimentation au sujet. Au début de l'expérimentation, le sujet s'assoit sur la chaise. Il remplit sur l'ordinateur un court questionnaire demandant son âge, genre, main dominante, s'il a déjà utilisé un bras haptique et son éducation culturelle (voir annexe A.1 pour les détails du questionnaire). Il existe en effet des différences entre genres et cultures pouvant influencer les résultats ([Nguyen et al. \(1975\)](#); [Masuda et al. \(2008\)](#)). Bien que nous ne les aborderons pas ici, il nous semble important de les mentionner. L'expérimentateur positionne ensuite le Geomagic Touch X en face de la main dominante du sujet. L'interface graphique fournit des explications textuelles au sujet concernant l'objectif de l'étude ainsi que son déroulement. Le Geomagic Touch X est présenté au sujet. La façon de le tenir lui est précisée (comme lors d'une poignée de main, voir figure 2.3).

Entraînement. L'objectif de l'entraînement vise dans un premier temps à familiariser le sujet avec la plateforme et le dispositif kinesthésique. Le sujet peut librement manipuler le dispositif afin d'explorer son espace accessible.

Dans une deuxième étape, le sujet doit exprimer une émotion (la surprise) afin de s'assurer qu'il ait bien compris la procédure. S'agissant de l'entraînement, l'expression de cette émotion n'est pas prise en compte. L'enregistrement d'une expression s'effectue en quatre étapes, comme le montre la capture d'écran en annexe A.2 :

1. Explication de l'émotion à enregistrer. Le nom de l'émotion à exprimer est inclus dans une phrase mettant en scène une situation où cette émotion est susceptible de se produire, par exemple « Vous éprouvez de l'exaltation lorsque vous venez de gagner une voiture de course » (voir liste complète dans la table 2.2). Cette phrase permet d'augmenter la

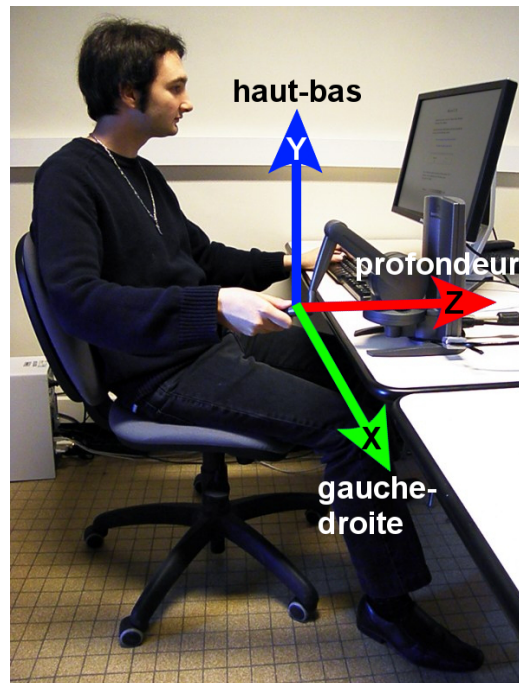


FIGURE 2.3 : Utilisateur interagissant avec le Geomagic Touch X.

compréhension de l'émotion par le sujet, ce qui est d'autant plus important que nous travaillons sur des émotions sémantiquement proches, sujettes à ambiguïté (Wallbott (1998)). Ces phrases sont inspirées des corpus de Bänziger et al. (2012); Golan et al. (2006).

2. Enregistrement de l'expression kinesthésique. Le sujet appuie sur la lettre E du clavier pour lancer l'enregistrement de l'expression. À tout moment, il peut arrêter l'enregistrement en appuyant à nouveau sur E. Il ne peut enregistrer qu'une seule fois l'expression de chaque émotion afin d'avoir un maximum de spontanéité. La durée maximale d'enregistrement est fixée à dix secondes.
3. Rendu de l'expression kinesthésique. En appuyant sur la touche Espace du clavier, le sujet peut jouer l'expression qu'il vient d'enregistrer via le dispositif. L'expression peut être rejouée autant de fois que le sujet le désire.
4. Évaluation subjective de la qualité de l'expression. Le sujet attribue une note sur une échelle de Likert à 7 points selon son niveau de confiance dans la capacité de son expression à exprimer efficacement l'émotion. Cette note va de "pas du tout confiant" à "tout à fait confiant".

Une fois cet entraînement complété, on demande au sujet s'il a des questions.

Complétion et fin de l'étude. L'expérimentateur sort de la salle pour ne pas influencer le sujet. Le sujet doit ensuite enregistrer à la suite huit expressions kinesthésiques, correspondant aux huit émotions étudiées. L'ordre de présentation des émotions à enregistrer est aléatoire. L'étude se termine une fois les enregistrements terminés.

Émotion	Phrase proposée
Joie	On éprouve de la joie lorsque l'on passe un moment agréable avec ses amis.
Exaltation	On éprouve de la joie lorsque l'on passe un moment agréable avec ses amis.
Dégoût	On éprouve du dégoût lorsqu'on s'aperçoit avoir marché dans un excrément.
Mépris	On éprouve du mépris lorsqu'on voit une personne riche se moquer d'un sans-abri.
Inquiétude	On éprouve de l'inquiétude lorsqu'on pense qu'on va rater son examen.
Peur	On éprouve de la peur lorsqu'on entend gratter à la fenêtre en pleine nuit.
Irritation	On éprouve de l'irritation lorsque l'homme juste à côté tapote sans arrêt la table.
Rage	On éprouve de la rage lorsqu'on découvre que sa voiture a été forcée et que des objets ont été volés.

TABLE 2.2 : Phrases proposées de mise en contexte des émotions.

Émotion	Joie	Exalt.	Dégoût	Mépris	Inquiét.	Peur	Irrit.	Rage	TOTAL
Nombre	23	28	19	23	20	27	25	29	194

TABLE 2.3 : Nombre d'expressions retenues par émotion étudiée

2.3.3 Résultats

Quarante expressions kinesthésiques correspondant à quarante sujets ont été collectées pour chacune des huit émotions étudiées. Le corpus final est ainsi formé de $40 \times 8 = 320$ expressions.

Avant de calculer nos mesures, nous avons filtré ces expressions selon Ms1, leur niveau de confiance associé. Seules les expressions ayant un niveau de confiance strictement positif, c'est à dire d'au moins 5/7, ont été retenues. Certains sujets ont en effet pu ne pas avoir d'idée réelle de la façon dont communiquer certaines des émotions étudiées. Pour le reste du chapitre, le terme *expressions kinesthésiques* se réfère aux 194 expressions retenues selon ce critère. Le tableau 2.3 donne la répartition par émotion des expressions retenues.

2.3.3.1 Paramètres des expressions kinesthésiques collectées

L'analyse des expressions haptiques permet de mettre en évidence les différences et similarités entre les expressions kinesthésiques de différentes émotions. L'ANOVA est une approche courante pour identifier les différences entre deux émotions (Bailenson et Yee (2007); Lemmens et al. (2009); Bonnet et al. (2011)). Nous avons choisi de commencer l'analyse avec cette approche afin de pouvoir comparer nos résultats à ceux provenant d'autres études utilisant la même approche d'analyse. Ceci a aussi l'intérêt de pouvoir déterminer les inconvénients de cette approche pour ce type de données. La mise en évidence de ces inconvénients nous guidera vers d'autres techniques d'analyse potentiellement plus adaptées.

L'ANOVA a été réalisée via un test des rangs signés de Wilcoxon. Ce test permet d'analyser des populations ne respectant pas une loi normale et présentant des tailles différentes. Nous avons choisi ce test car l'étape de filtrage basée sur Ms1 le niveau de confiance a fournit un nombre différents d'expressions retenues pour chaque émotion. Par ailleurs, les mesures collectées ne suivent pas forcément une loi normale.

	Exaltation	Dégoût	Mépris	Inquiétude	Peur	Irritation	Rage
Joie	8	7	<u>19</u>	<u>16</u>	<u>14</u>	<u>17</u>	5
Exaltation	↳	<u>12</u>	<u>14</u>	<u>15</u>	<u>15</u>	<u>21</u>	2
Dégoût	-	↳	1	5	3	9	9
Mépris	-	-	↳	1	4	5	<u>13</u>
Inquiétude	-	-	-	↳	1	1	<u>11</u>
Peur	-	-	-	-	↳	5	<u>11</u>
Irritation	-	-	-	-	-	↳	<u>18</u>

TABLE 2.4 : Nombre de paramètres dont les valeurs présentent des différences significatives par ANOVA entre deux émotions. Les valeurs en gras et soulignées correspondent aux émotions présentant plus de différences significatives entre elles que la moyenne (9.4 paramètres avec valeurs différentes).

Le test des rangs signés de Wilcoxon montre de nombreuses différences significatives (p -value $< .05$) entre les expressions de différentes émotions. La table 2.5 présente les moyennes et écart-type de l'ensemble des mesures étudiées. Dans la suite du chapitre, nous nommerons ces mesures *paramètres* des expressions.

Le test des rangs signés de Wilcoxon a été appliqué entre toutes les combinaisons de paires d'émotions possibles, pour chaque paramètre. Les boîtes à moustaches des résultats pour les mesures principales sont en annexe C. La table 2.4 montre le nombre de paramètres présentant une différence significative ($p < 0.05$) entre les expressions de chaque paire d'émotions. En moyenne, 9.4 paramètres présentent une différence significative entre ces paires. Les paires d'émotions présentant plus que 9.4 paramètres dont les valeurs sont significativement différentes entre elles sont en gras et soulignées dans le tableau. Ceci signifie que les expressions de ces paires d'émotions présentent plus de différences entre elles que la moyenne, comme c'est le cas de la joie et de l'inquiétude. De façon plus intéressante, c'est également le cas de l'irritation de la rage, qui sont pourtant deux émotions liées à la colère.

Ces résultats valident donc notre hypothèse H1 : les expressions kinesthésiques de différentes émotions présentent des différences entre elles.

2.3.3.2 Paramètres discriminant les émotions proches

Cette section présente les différences entre les couples d'émotions d'une même classe. Les données numériques ne sont pas indiquées dans le texte par soucis de lisibilité et sont reportées dans le tableau 2.5.

Paramètres discriminants la joie de l'exaltation. Les principales différences entre les expressions kinesthésiques de ces deux émotions sont l'axe du geste et la vitesse de moyenne. Les expressions de la joie utilisent majoritairement l'axe horizontal X , tandis que celles de l'exaltation utilisent plutôt l'axe vertical Y . Les expressions de l'exaltation présentent une vitesse moyenne supérieure à celles de la joie. Ces différences se répercutent aussi sur les mesures secondaires. Par exemple, les expressions de la joie utilisant majoritairement l'axe X , l'amplitude du geste sur X et l'indice d'expansion sur X sont plus grandes pour les expressions de la joie que pour celles de l'exaltation.

	Joie	Exa	Dég	Mép	Inq	Peur	Irr	Rage
	durée (s)							
M	6.4	5.2	5.6	<i>4.6</i>	<i>5.1</i>	6.0	5.3	<i>5.1</i>
σ	(2.7)	(2.8)	(3.0)	(2.6)	(2.9)	(3.1)	(2.5)	(2.6)
	distance (m) - puis sur les axes X, Y et Z seuls							
M	1.30	1.6	<i>0.80</i>	<i>0.60</i>	<i>0.79</i>	1.0	<i>0.82</i>	1.8
σ	(0.71)	(1.1)	(0.66)	(0.54)	(.70)	(1.2)	(0.64)	(1.5)
M_X	0.78	0.72	<i>0.50</i>	<i>0.43</i>	<i>0.46</i>	0.64	<i>0.48</i>	
σ_X	(0.45)	(0.74)	(0.54)	(0.46)	(0.44)	(0.84)	(0.40)	(0.91)
M_Y	0.83	1.1	<i>0.41</i>	<i>0.25</i>	<i>0.45</i>	<i>0.53</i>	<i>0.46</i>	1.1
σ_Y	(0.48)	(0.81)	(0.27)	(0.22)	(0.52)	(0.66)	(0.49)	(1.2)
M_Z	0.26	0.35	<i>0.24</i>	<i>0.15</i>	<i>0.20</i>	0.27	<i>0.19</i>	0.43
σ_Z	(0.19)	(0.24)	(0.23)	(0.14)	(0.29)	(0.23)	(0.17)	(0.45)
	vitesse moyenne (m.s ⁻¹) - puis sur les axes X, Y et Z seuls							
M	0.23	0.32	<i>0.15</i>	<i>0.13</i>	<i>0.14</i>	<i>0.16</i>	<i>0.16</i>	0.33
σ	(0.17)	(0.18)	(0.092)	(0.089)	(0.075)	(0.13)	(0.10)	(0.19)
M_X	0.13	0.13	<i>0.085</i>	<i>0.093</i>	<i>0.078</i>	<i>0.095</i>	<i>0.094</i>	0.17
σ_X	(0.097)	(0.095)	(0.057)	(0.076)	(0.058)	(0.085)	(0.071)	(0.15)
M_Y	0.15	0.24	<i>0.089</i>	<i>0.061</i>	<i>0.085</i>	<i>0.091</i>	<i>0.086</i>	0.21
σ_Y	(0.12)	(0.15)	(0.072)	(0.049)	(0.066)	(0.087)	(0.086)	(0.15)
M_Z	<i>0.047</i>	0.071	<i>0.042</i>	<i>0.034</i>	<i>0.033</i>	0.048	<i>0.037</i>	0.076
σ_Z	(0.042)	(0.041)	(0.024)	(0.022)	(0.029)	(0.037)	(0.030)	(0.051)
	aspect saccadé (m.s ⁻²) - puis sur les axes X, Y et Z seuls							
M	<i>4.1</i>	6.0	<i>3.8</i>	<i>2.7</i>	<i>3.6</i>	<i>4.3</i>	<i>3.0</i>	11
σ	(3.1)	(13)	(3.0)	(0.89)	(2.4)	(4.7)	(0.67)	(19)
M_X	3.4	3.5	<i>3.1</i>	<i>2.2</i>	<i>2.3</i>	<i>3</i>	<i>2.3</i>	6.2
σ_X	(2.5)	(4.5)	(2.4)	(0.81)	(0.56)	(1.7)	(0.64)	(11)
M_Y	<i>3.5</i>	5.7	<i>3.0</i>	<i>2.2</i>	<i>3.1</i>	<i>3.8</i>	<i>2.5</i>	8.8
σ_Y	(2.0)	(12)	(1.3)	(0.87)	(2.3)	(4.0)	(0.77)	(14)
M_Z	<i>2.6</i>	3.2	<i>2.8</i>	<i>2.3</i>	<i>2.5</i>	<i>3.0</i>	<i>2.5</i>	4.5
σ_Z	(0.49)	(1.5)	(0.75)	(0.75)	(0.80)	(2.0)	(0.56)	(3.8)
	amplitude (m) - puis sur les axes X, Y et Z seuls							
M	0.24	0.23	0.22	0.17	<i>0.16</i>	<i>0.16</i>	<i>0.13</i>	0.21
σ	(0.095)	(0.080)	(0.077)	(0.089)	(0.093)	(0.10)	(0.075)	(0.093)
M_X	0.18	0.12	0.14	0.12	<i>0.095</i>	<i>0.098</i>	<i>0.088</i>	0.13
σ_X	(0.083)	(.081)	(0.066)	(0.082)	(0.079)	(0.078)	(0.068)	(0.087)
M_Y	0.15	0.17	0.13	<i>0.090</i>	<i>0.10</i>	<i>0.096</i>	<i>0.073</i>	
σ_Y	(0.057)	(0.051)	(0.067)	(0.056)	(.071)	(0.075)	(0.046)	(0.063)
M_Z	0.061	0.059	0.066	0.056	<i>0.045</i>	0.063	<i>0.035</i>	0.064
σ_Z	(0.031)	(0.031)	(0.029)	(0.042)	(0.039)	(0.044)	(0.024)	(0.044)
	indice d'expansion (m) - puis sur les axes X, Y et Z seuls							
M	0.071	0.059	0.059	0.051	0.042	<i>0.041</i>	<i>0.027</i>	0.054
σ	(0.033)	(0.025)	(0.032)	(0.032)	(0.030)	(0.030)	(0.023)	(0.034)
M_X	0.050	0.028	0.034	0.034	<i>0.023</i>	<i>0.023</i>	<i>0.017</i>	0.028
σ_X	(0.029)	(0.021)	(0.022)	(0.027)	(0.022)	(0.020)	(0.015)	(0.024)
M_Y	0.039	0.042	0.037	0.024	0.025	<i>0.022</i>	<i>0.014</i>	0.036
σ_Y	(0.019)	(0.021)	(0.028)	(0.019)	(0.022)	(0.023)	(0.014)	(0.026)
M_Z	0.014	0.013	0.015	0.015	0.010	0.014	<i>.007</i>	0.014
σ_Z	(0.007)	(0.008)	(0.007)	(0.015)	(0.011)	(0.012)	(.006)	(0.011)
	axe majeur en X, Y et Z							
M_X	0.73	<i>0.42</i>	0.66	0.68	<i>0.51</i>	0.57	0.58	0.61
σ_X	(0.33)	(0.30)	(0.24)	(0.3)	(0.31)	(0.30)	(0.33)	(0.30)
M_Y	<i>0.40</i>	0.74	<i>0.50</i>	<i>0.42</i>	0.59	<i>0.48</i>	<i>0.48</i>	0.52
σ_Y	(0.33)	(0.31)	(0.31)	(0.32)	(0.33)	(0.29)	(0.31)	(0.33)
M_Z	<i>0.24</i>	<i>0.22</i>	0.34	0.34	0.37	0.43	0.39	0.32
σ_Z	(0.21)	(0.21)	(0.23)	(0.26)	(0.24)	(0.32)	(0.30)	(0.24)
	poids du premier axe majeur							
M	<i>0.58</i>	0.63	0.66	0.69	0.67	0.72	0.71	0.64
σ	<i>0.11</i>	(0.11)	(0.097)	(0.13)	(0.13)	(0.14)	(0.14)	(0.13)
	poids du second axe majeur							
M	0.29	0.29	0.26	0.23	0.26	<i>0.21</i>	<i>0.20</i>	0.27
σ	(0.074)	(0.096)	(0.077)	(0.092)	(0.11)	(0.11)	(0.093)	(0.091)
	répétitions							
M	<i>2.7</i>	5.2	<i>2.4</i>	<i>1.4</i>	<i>3.0</i>	3.4	4.9	7.1
σ	(1.9)	(6.6)	(2.2)	(2.1)	(3.1)	(4.5)	(4.2)	(9.1)

TABLE 2.5: Moyennes et écart-type pour l'ensemble des mesures et émotions étudiées. Les valeurs dans le plus haut tiers sont en gras et soulignées, dans le plus bas en italique et soulignées. Les noms des émotions sont abrégés comme suit : Joie=joie, Exa=exaltation, Dég=dégoût, Mép=mépris, Inq=inquiétude, Peur=peur, Irr=irritation, Rage=rage, Mép=mépris. Les axes X, Y et Z correspondent respectivement aux axes gauche-droite, haut-bas et profondeur.

Paramètres discriminant le dégoût du mépris. Une seule mesure discrimine les expressions de ces deux émotions : la distance parcourue sur Y , plus importante dans les expressions de dégoût.

Paramètres discriminant l'inquiétude de la peur. Une seule mesure discrimine les expressions de ces deux émotions : la distance parcourue sur Z , plus importante dans les expressions de peur.

Paramètres discriminant l'irritation de la rage. Les différences entre les expressions kinesthésiques de ces deux émotions sont nombreuses. L'importance de l'axe majeur est significativement plus grande pour l'irritation. Les expressions de la rage présentent une vitesse moyenne, distance parcourue, aspect saccadé, amplitude, expansion et importance de l'axe secondaire significativement plus élevées que pour celles de l'irritation. Ces différences se reflètent aussi sur les mesures secondaires. Par exemple, l'aspect saccadé des expressions de la rage est plus important sur les trois axes X , Y et Z que pour celles de l'irritation.

Ces résultats valident donc notre hypothèse H2 : les expressions kinesthésiques d'émotions proches présentent des différences entre elles, particulièrement pour les couples joie/exaltation et irritation/rage.

2.3.4 Analyse et Discussion

2.3.4.1 Comparaison avec d'autres études

Dans cette section, nous comparons nos résultats obtenus pour chaque émotion avec ceux tirés d'autres études étudiant l'expression haptique ([Basori et al. \(2007\)](#); [Bailenson et Yee \(2007\)](#)) ou gestuelle ([Castellano \(2008\)](#)) des mêmes émotions que celles que nous étudions. Cette comparaison vise à mettre en évidence les caractéristiques communes des expressions, indépendamment de l'éducation culturelle ou des dispositifs de collecte utilisés. Les notions de valeurs importants/intermédiaires/faibles sont relatives aux paramètres des expressions collectées, selon qu'elles se situent dans le tiers haut, intermédiaire ou bas des valeurs moyennes observées pour chaque émotion.

Joie. Les expressions kinesthésiques de la joie présentent généralement une durée, amplitude, indice d'expansion, utilisation de l'axe X et poids du second axe majeur importants. Ces expressions présentent des valeurs intermédiaires pour la distance et la vitesse moyenne. Elles présentent de faibles valeurs concernant utilisation des axes Y et Z , l'aspect saccadé, le poids de l'axe majeur et le nombre de répétitions.

Dans les autres études portant sur la joie, [Basori et al. \(2007\)](#); [Bailenson et al. \(2007\)](#) observèrent que la joie était exprimée avec une distance parcourue et une vitesse moyenne importantes. [Castellano \(2008\)](#) observe également des mouvements rapides et un important indice d'expansion. Ces résultats sont cohérents avec les nôtres. Cependant, [Bailenson et al. \(2007\)](#) mis en évidence avec un dispositif similaire au notre des mouvements davantage présents sur l'axe Y que nous.

Dans notre étude, cet utilisation de l'axe *Y* se retrouve dans les expressions de l'exaltation. La proximité de ces deux émotions pourraient expliquer cette différence.

Exaltation. Les expressions kinesthésiques de l'exaltation présentent généralement une distance parcourue, vitesse moyenne, amplitude, indice d'expansion, utilisation de l'axe *Y*, poids du second axe majeur et nombre de répétitions élevés. Ces expressions présentent des valeurs intermédiaire pour l'aspect saccadé et le poids de l'axe majeur. Elles présentent de faibles valeurs concernant l'utilisation des axes *X* et *Z*. Certains sujets ont reportés qu'ils ont principalement utilisé l'axe vertical car ils pensaient aux mouvements verticaux des mains qu'ils faisaient à l'entente d'une excellente nouvelle.

Dégoût. Les expressions kinesthésiques du dégoût présentent généralement une amplitude du geste, un indice d'expansion et une utilisation de l'axe *X* importants. Ces expressions présentent des valeurs intermédiaires pour l'utilisation de l'axe *Z* et le poids de l'axe majeur. Elles présentent de faibles valeurs pour la distance parcourue, la vitesse moyenne, l'aspect saccadé, l'utilisation de l'axe *Y* et le nombre de répétitions.

Ces résultats sont en accord avec ceux de [Basori et al. \(2007\)](#) qui observèrent de faibles distances parcourues pour les expressions de cette émotion.

Mépris. Les expressions kinesthésiques du mépris présentent généralement une utilisation de l'axe *X* et un poids de l'axe majeur importants. Ces expressions présentent des valeurs intermédiaires pour l'amplitude, l'indice d'expansion et le poids du second axe majeur. Elles présentent de faibles faibles de durée, de distance parcourue, de vitesse moyenne, d'aspect saccadé, d'utilisation de l'axe *Y* et de nombre de répétitions.

Inquiétude. Les expressions kinesthésiques de l'inquiétude présentent une utilisation de l'axe *Z* importante. Ces expressions présentent des valeurs intermédiaires pour l'indice d'expansion, l'utilisation de l'axe *Y* et le poids de l'axe majeur. Elles présentent de faibles valeurs de distance parcourue, de vitesse moyenne, d'aspect saccadé, d'amplitude et de poids du second axe majeur.

Peur. Les expressions kinesthésiques de la peur présentent généralement une utilisation de l'axe *Z* et un poids de l'axe majeur importants. Ces expressions présentent des valeurs intermédiaires pour l'utilisation de l'axe *X* et de répétitions. Elle présente des valeurs faibles de vitesse moyenne, d'aspect saccadé, d'utilisation de l'axe *Y* et de poids du second axe majeur.

Ces résultats sont en accord avec ceux de [Basori et al. \(2007\)](#) qui remarquèrent des valeurs faibles de distance dans les expression de cette émotion.

Irritation. Les expressions kinesthésiques de l'irritation présentent généralement une utilisation de l'axe *Z* et un poids de l'axe majeur importants. Ces expressions présentent une valeur intermédiaire pour le nombre de répétitions. Elles présentent de valeurs faibles de distance parcourue, de

vitesse moyenne, d'aspect saccadé, d'amplitude, d'indice d'expansion, d'utilisation de l'axe *Y* et de poids du second axe majeur.

Rage Les expressions kinesthésiques de la rage présentent généralement une distance parcourue, une vitesse moyenne, un aspect saccadé, une amplitude, un poids du second axe majeur et un nombre de répétitions importants. Ces expressions présentent des valeurs intermédiaires pour l'indice d'expansion et l'utilisation des axes *X* et *Y*. Elles présentent de faibles valeurs de poids de l'axe majeur.

Dans les autres études portant sur la rage, [Bailenson et al. \(2007\)](#) observèrent de façon similaire une vitesse moyenne élevée pour cette émotion. [Bailenson et al. \(2007\)](#); [Castellano \(2008\)](#) mirent également en évidence de fortes accélérations/aspect saccadé dans les expressions de cette émotion.

Cette étude révèle de nombreux paramètres discriminant les expressions kinesthésiques des émotions considérées. Par ailleurs, des similarités entre nos résultats et ceux d'études similaires ont été trouvées. Cependant, comme expliqué plus haut, aucune émotion ne peut être discriminée de l'ensemble des autres émotions. Seule la joie présente une différence significative par rapport à toutes les autres émotions pour l'indice d'expansion sur l'axe *X*, qui n'est qu'un paramètre secondaire.

Lors de cette étude, nous avons extrait de nouveaux paramètres par rapport à ceux utilisés dans la plupart des études de la littérature en nous inspirant de travaux portant sur la modalité gestuelle. Outre les aspects cinématiques des expressions collectées, nous avons ainsi pu étudier certains aspects de la trajectoire, comme l'expansion du geste ou ses répétitions. Nous avons également comparé nos résultats à ceux d'études existantes, utilisant des protocoles de collecte et d'analyse similaires, notamment l'ANOVA.

2.3.4.2 Limites de l'analyse ANOVA

L'ANOVA est une méthode d'analyse facile d'interprétation lorsqu'il s'agit de comparer les expressions de deux émotions. Si un paramètre présente une différence statistique entre deux émotions distinctes, on peut déduire de cette différence que ce paramètre permet de discriminer les expressions de ces deux émotions entre elles.

Cependant, au vu du nombre de paramètres des expressions étudiés et de l'aspect subjectif de l'expression émotionnelle, une ANOVA n'est pas forcément l'outil d'analyse le plus adapté pour décrire les différences (ainsi que les similarités) entre les expressions de différentes émotions. Elle possède en effet deux limites majeures. La première concerne le nombre de paramètres traités simultanément. [Bailenson et al. \(2007\)](#); [Bonnet et al. \(2011\)](#) ne traitent qu'un seul paramètre à la fois (par exemple : la vitesse moyenne). Ceci est un frein à la mise en évidence de corrélations entre différents paramètres. Par exemple, on observe souvent une augmentation de la distance parcourue lorsque la vitesse moyenne augmente. Le nombre de différences observées peut ainsi être surestimé par l'ANOVA. À noter qu'une analyse ANOVA multivariée ou une analyse de covariance suivie de tests post-hocs peuvent corriger ce problème, mais sont plus rarement appliquées.

La seconde limite d'une analyse par ANOVA est qu'elle ne peut traiter des populations non-homogènes, comme deux sous-populations au sein d'une même population. Par exemple, une même émotion pourrait être exprimée de deux façons différentes (Dael et al. (2011)). Ces différences dépendent des individus qui ont enregistré les expressions, et peuvent engendrer d'importantes variations au sein d'un même échantillon. Dans un tel cas, une ANOVA pourrait ne pas trouver de différence statistique entre deux émotions, même si l'une d'entre elles possède une sous-population avec des paramètres discriminant les émotions.

2.4 Analyses alternatives

En considérant les limitations présentées de la méthode ANOVA pour l'étude d'expressions kinesthésiques des émotions, nous proposons dans cette section deux outils alternatifs d'analyses : l'ACP et le clustering par l'algorithme Espérance-Maximisation (EM). Ces méthodes seront dans un premier temps présentées et appliquées à notre corpus. Dans un second temps, nous les comparerons en termes d'avantages et d'inconvénients à l'ANOVA.

2.4.1 Analyse en composante principale

L'ACP proposée par Klema et Laub (1980) est une méthode d'analyse prenant en paramètre un ensemble de données, dont les éléments sont décrits dans un espace à n dimensions. Son résultat est une projection de cet ensemble dans un espace de dimension inférieure à n . Pour réduire le nombre de dimensions, l'ACP construit une nouvelle base dont les axes (nommés axes factoriels) sont des combinaisons linéaires de ceux de départ. Plus l'ensemble de départ possède des corrélations entre les dimensions, plus cette réduction est efficace au prix d'une perte d'informations.

Ceci explique que contrairement à l'approche par ANOVA, celle par ACP gère simultanément l'ensemble des émotions et des paramètres décrivant leurs expressions. Cette approche permet aussi de supprimer les corrélations linéaires entre les paramètres étudiés. Par exemple, une corrélation inverse a été observée dans nos données entre le poids de l'axe majeur et le poids du second axe majeur. Plus l'axe majeur est important, moins le second axe l'est, et réciproquement. En utilisant ces corrélations, l'ACP réduit le nombre de paramètres étudiés et ne conserve que l'information utile décrivant nos données.

Le tableau 2.6 montre les résultats d'une ACP réduits à 17 dimensions, par opposition aux 27 de départ. Il s'agit du nombre limite de dimensions pour lesquelles nous conservons au moins 99 % de l'information de départ, d'après les valeurs propres associées à chaque axe factoriel. Nous avons ensuite limité à deux le nombre d'axes factoriels afin de pouvoir représenter visuellement nos données dans la figure 2.4 illustre ces données. Ces deux axes représentent à eux seuls 55 % de l'information d'origine. Ceci suggère d'importantes redondances dans les paramètres étudiés. Cette représentation des données permet d'extraire les informations les plus marquantes. Par exemple, la joie, l'exaltation et la rage sont à l'opposé des autres émotions. Ceci peut s'expliquer par des valeurs élevées sur la plupart des paramètres étudiés, comme la distance parcourue, la vitesse moyenne ou l'indice d'expansion. Les résultats obtenus par l'ANOVA corrobore ces données,

	Exaltation	Dégoût	Mépris	Inquiétude	Peur	Irritation	Rage
Joie	<u>1.629</u>	1.414	1.431	<u>1.624</u>	<u>1.734</u>	<u>1.633</u>	<u>1.822</u>
Exaltation	↳	<u>1.740</u>	<u>1.961</u>	<u>1.528</u>	<u>1.905</u>	<u>1.698</u>	<u>1.483</u>
Dégoût	-	↳	1.139	1.045	1.138	1.304	1.422
Mépris	-	-	↳	1.091	1.199	1.220	<u>1.740</u>
Inquiétude	-	-	-	↳	1.241	0.915	<u>1.457</u>
Peur	-	-	-	-	↳	1.055	<u>1.463</u>
Irritation	-	-	-	-	-	↳	<u>1.528</u>

TABLE 2.6 : Distance dans l'espace à 17D calculé par ACP entre les barycentres des émotions étudiées. Les valeurs plus élevées que la moyenne sont affichées en gras et soulignées.

affichant un grand nombre de différences significatives entre ces trois émotions par rapport aux cinq autres émotions.

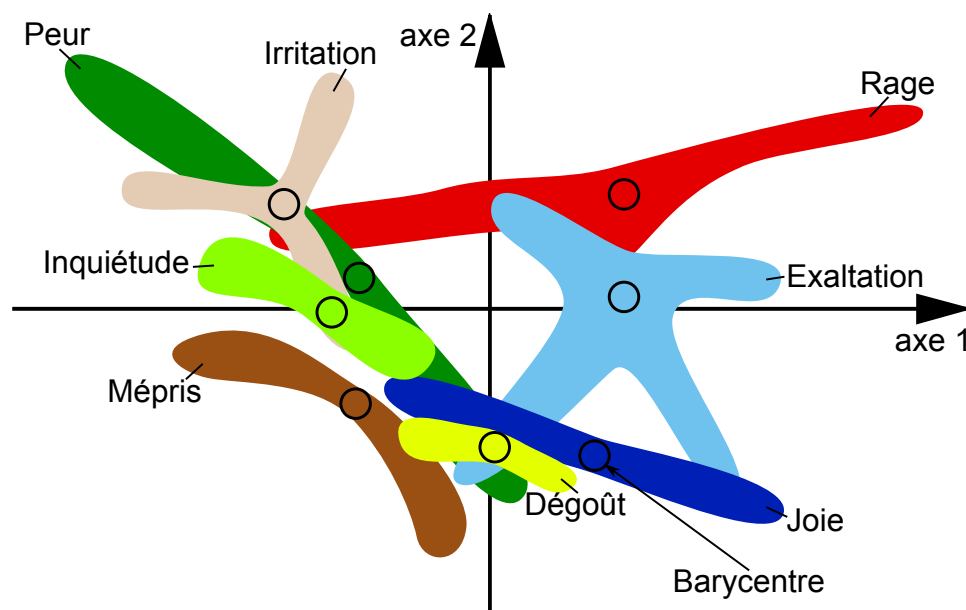


FIGURE 2.4 : ACP à deux facteurs sur les données du corpus.

Avantages de l'ACP. L'ACP présente deux principaux avantages par rapport à l'ANOVA. Premièrement, elle permet de déterminer la proximité entre les expressions des émotions par un calcul de distance des barycentres des expressions de chaque émotion, représentées dans l'espace factoriel résultat de l'ACP. Cette valeur possède l'avantage d'être continue contrairement au nombre de différences significatives proposé par l'ANOVA.

Le second avantage de cette méthode est qu'elle peut révéler l'existence de sous-populations d'expressions kinesthésiques d'une même émotion. Comme le montre la figure 2.4, les expressions d'une même émotion peuvent ne pas être concentrées en un seul point de l'espace mais réparties à plusieurs endroits.

Limites de l'ACP. L'ACP présente deux limites. Premièrement, cette approche crée des axes factoriels, constitué chacun par une combinaison des paramètres d'origine. Ainsi, une ACP n'est

	clust. #1	clust. #2	clust. #3	clust. #4	clust. #5	clust. #6
Joie	5%	11%	11%	14%	29%	0%
Exaltation	0%	11%	32%	14%	18%	9%
Dégoût	0%	18%	18%	9%	6%	0%
Mépris	16%	20%	4%	0%	12%	11%
Inquiétude	21%	5%	18%	5%	6%	14%
Peur	16%	20%	11%	9%	9%	14%
Irritation	32%	5%	4%	5%	6%	34%
Rage	11%	9%	4%	45%	15%	17%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%	100%

TABLE 2.7 : Constitution de chaque cluster en pourcentage des expressions de chaque émotion qu'il contient. Les émotions les plus représentatives de chaque cluster sont mises sur fond noir.

utile que si l'espace d'origine possède au moins deux dimensions. Contrairement à l'ANOVA, elle ne peut donc pas servir à analyser un paramètre unique.

La seconde limite de cette méthode d'analyse est qu'elle ne peut pas identifier de sous-populations dans les expressions du corpus. Par exemple, nos résultats suggèrent que la rage peut s'exprimer de deux manières (voir figure 2.4) : l'une est proche des expressions des autres émotions négatives, tandis que l'autre est isolée du reste des émotions. Déterminer à quelle sous-population chaque expression appartient permettrait d'avoir des résultats plus fiables en regroupant les expressions qui se ressemblent.

2.4.2 Clustering

En considérant les limites de l'ACP, nous nous sommes tournés dans un second temps vers une approche par clustering. Le principe de ce type d'approche est de regrouper en clusters les expressions, non en fonction de l'émotion qu'elles expriment, mais de la proximité des valeurs prises par les paramètres. Ces clusters correspondent donc aux sous-populations d'un groupe de données.

Nous utilisons l'algorithme EM implémenté dans la plateforme Weka (Golan et al. (2006)). Cet algorithme de clustering est adapté à notre étude car il ne requière pas de connaissances à priori sur le nombre de clusters cherchés. Les tables 2.7 et 2.8 donnent le résultat de cet algorithme appliqué à notre corpus. Plus précisément, la table 2.7 donne l'émotion dominante dans chaque cluster, tandis que la table 2.8 donne la répartition de chaque émotion dans les différents clusters. L'algorithme EM a retourné six différents clusters, correspondant aux expressions mixées des huit émotions étudiées. La table 2.7 décrit l'émotion la plus représentative de chacun des clusters. La prédominance d'une émotion particulière au sein d'un cluster montre que les expressions de cette émotion diffèrent des expressions des autres émotions. Par exemple, la table montre que le cluster #5 contient principalement des expressions d'émotions positives (joies et exaltation). Le cluster #3, en revanche, contient majoritairement des expressions de l'exaltation. Ceci signifie que l'expression type du cluster #5 ne permet pas de discriminer les deux émotions positives étudiées, contrairement au cluster #3.

	clust. #1	clust. #2	clust. #3	clust. #4	clust. #5	clust. #6	TOT.
Joie	4%	26%	13%	13%	43%	0%	100%
Exaltation	0%	22%	33%	11%	22%	11%	100%
Dégoût	0%	53%	26%	11%	11%	0%	100%
Mépris	13%	48%	4%	0%	17%	17%	100%
Inquiétude	20 %	15%	25%	5%	10%	25%	100%
Peur	11%	41%	11%	7%	11%	19%	100%
Irritation	24 %	12%	4%	4%	8%	48%	100%
Rage	7%	17%	3%	34%	17%	21%	100%

TABLE 2.8: Répartition en pourcentage de chaque émotion dans les clusters. Les clusters contenant le plus d'expressions d'une émotion particulière sont mis sur fond noir.

Méthode	Avantages	Limitations
ANOVA	• Donne les paramètres discriminant deux émotions.	• Affaiblie par des populations non-homogènes. • Ne peut comparer des groupes d'émotions
ACP	• Détermine les distances entre émotions. • Met en évidence des sous-populations d'expressions pour une même émotion.	• Nécessite au minimum deux paramètres pour l'analyse. • Ne traite pas les sous-populations.
EM	• Analyse simultanément de plusieurs paramètres et émotions. • Détermine les expressions spécifiques d'une émotion.	• Ne peut identifier des paramètres discriminant une émotion si elle n'est dominante dans aucun cluster.

TABLE 2.9: Avantages et limitations de chaque méthode d'analyse présentée.

Avantages de l'algorithme de clustering EM. L'algorithme de clustering EM présente deux principaux avantages. Premièrement, à l'instar de l'ACP cette approche traite simultanément un large nombre d'expressions décrites par de nombreux paramètres.

Deuxièmement, l'approche par clustering permet de déterminer les expressions haptiques caractérisant une émotion donnée. L'algorithme EM utilise les données des paramètres et non les labels d'émotions afin d'identifier les clusters. Un même cluster peut donc contenir des expressions de plusieurs émotions. Si l'une de ces émotions domine dans le cluster, les expressions étant regroupées par proximité, on peut en déduire que les expressions de cette émotion dans ce cluster discriminent cette émotion de l'ensemble des autres émotions.

Limites du l'algorithme de clustering EM. La principale limite de cette méthode concerne la difficulté à discriminer des émotions qui ne sont dominantes dans aucun des clusters. Dans ce cas, il n'est pas possible de décrire les paramètres principaux qui sont caractéristiques de cette émotion. Par exemple, les expressions du dégoût ne sont dominantes en nombre dans aucun des clusters retournés par l'algorithme EM. Afin de déterminer le cluster le plus représentatif de cette émotion, il peut alors être utile de déterminer la répartition de ces émotions au travers des différents clusters. Cette répartition est illustré dans la table 2.8. Cette table montre par exemple par exemple que 53% des expressions du dégoût sont regroupées dans le cluster #2, qui

est également le cluster où se trouve en grande quantité importantes les expressions du mépris et de la peur. Ceci suggère que les expressions kinesthésiques de ces émotions présentent des similarités entre elles.

Le tableau 2.9 résume les avantages et limitations citées pour chacune des trois méthodes ANOVA, ACP et EM utilisées.

2.5 Proposition d'une nouvelle méthode

Sur la base des différentes analyses précédemment abordées, nous proposons une méthode d'analyse basée en partie sur un algorithme de clustering. Cette méthode devra permettre de donner les paramètres discriminant les émotions (en général ou par couples) entre elles.

2.5.1 Principe global de la méthode d'analyse

La méthode d'analyse que nous proposons se décompose en quatre étapes :

1. Séparation des différentes sous-populations d'expressions pour chaque émotion.
2. Sélection des paramètres pertinents pour chaque type d'expression.
3. Comparaison entre deux types d'expression sur un paramètre.
4. Caractérisation des types d'expression.

Les sections suivantes décrivent ces étapes en détails.

2.5.1.1 Étape 1 : Séparation des différentes sous-populations d'expressions pour chaque émotion

Dans les analyses précédentes, les expressions étaient considérées ensemble pour chacune des émotions étudiées. Nos résultats de l'ACP et du clustering avec l'algorithme EM ont cependant suggéré qu'une même émotion pouvait s'exprimer de plusieurs manières. Considérer ces expressions comme un ensemble peut donc appauvrir la qualité des résultats statistiques. Cette première étape a donc pour objectif de séparer les différentes sous-populations d'expressions pour chaque émotion afin de pouvoir les analyser séparément.

Afin de réaliser cette séparation, nous proposons d'utiliser l'algorithme EM proposé par [Dempster et al. \(1977\)](#). Cet algorithme de clustering permet de réaliser les clusters en déterminant un mélange de Gaussiennes correspondant aux données. En particulier, l'intérêt de cet algorithme de clustering par rapport aux autres est qu'il estime le nombre optimal de clusters en utilisant une validation croisée. Ce point est important car le nombre de façons utilisées pour exprimer une même émotion par nos sujets nous est inconnu. Enfin, cet algorithme capture les corrélations et dépendances entre les paramètres utilisés. L'implémentation de l'algorithme utilisé est celui de la plateforme d'exploration de données Weka, développée par [Golan et al. \(2006\)](#).

Afin de séparer les multiples expressions possibles de chaque émotion, l'algorithme EM est appliqué sur les paramètres des expressions kinesthésiques pour chacune des émotions étudiées. Les colonnes de la table 2.10 montrent le résultat de ce clustering. Le titre des colonnes représente les premières lettres de l'émotion exprimée, suivi d'un numéro correspondant à celui du cluster retourné par l'algorithme EM.

2.5.1.2 Étape 2 : Sélection des paramètres pertinents pour chaque type d'expression

Cette deuxième étape a pour objectif de vérifier la pertinence de chaque paramètre pour décrire les différents clusters précédemment identifiés. Le clustering de l'étape précédente traite simultanément l'ensemble des paramètres étudiés, mais ne permet pas de déterminer les paramètres pertinents pour l'analyse. Cette deuxième étape a été ajoutée afin de déterminer ces paramètres. La méthode utilisée est celle d'un algorithme de sélection d'attributs, plus précisément basé sur les corrélations des paramètres avec méthode du *best first* (Casale et al. (2010); Vogt et André (2005)). Cette méthode est appliquée sur chaque cluster séparément.

Le résultat de cette étape est illustré dans la table 2.10. Les cellules grises de la table correspondent aux paramètres pertinents, tandis que les cellules blanches représentent les paramètres considérés comme non pertinents pour chaque cluster. Ils ne sont donc pas étudiés pour le reste de l'analyse. Par exemple, la vitesse moyenne sur l'axe *Z* affiche une moyenne très élevée pour le cluster 1 de la rage, mais a été retiré de la suite de l'analyse.

2.5.1.3 Étape 3 : Comparaison entre deux types d'expression sur un paramètre

Cette troisième étape a pour objectif de proposer une méthode de comparaison de deux clusters sur un paramètre particulier. Cette méthode permettra d'établir si un paramètre particulier est, ou n'est pas différent entre les deux clusters considérés.

La méthode proposée consiste à comparer les valeurs barycentriques de ce paramètre pour les deux clusters. L'utilisation des barycentres pour comparer les valeurs permet d'approximer le contenu du cluster en en considérant un modèle général. Cependant, la comparaison de deux valeurs moyennes n'a pas de sens d'un point de vue statistique. Les analyses statistiques ont en effet pour objectif de comparer des populations entre elles, et non des valeurs. Afin de comparer ces valeurs, nous proposons d'utiliser une comparaison relative des clusters. Cette comparaison consiste tout d'abord à déterminer la distance d entre les valeurs minimales et maximales observées pour chaque paramètre étudié. Nous fixons ensuite un seuil S correspondant au cinquième de d : $S = \frac{1}{5} \times d$. Ce seuil S découpe en cinq parts égales l'intervalle des valeurs prises par le paramètre, chacune correspondant à une classe discrète : valeur très faible, faible, modérée, élevée, très élevée. Ces classes sont couramment utilisées dans les échelles de Likert et fournissent un critère explicite de comparaison de clusters et sont utilisées dans d'autres études comme celle de de Castellano (2008).

Cette méthode de comparaison par appartenance à une classe présente néanmoins une limite. Les clusters dont les barycentres ont des valeurs proches, mais qui appartiennent à des classes différentes (comme les clusters 3 et 4 de la figure 2.5a) sont évalués comme étant différents. À

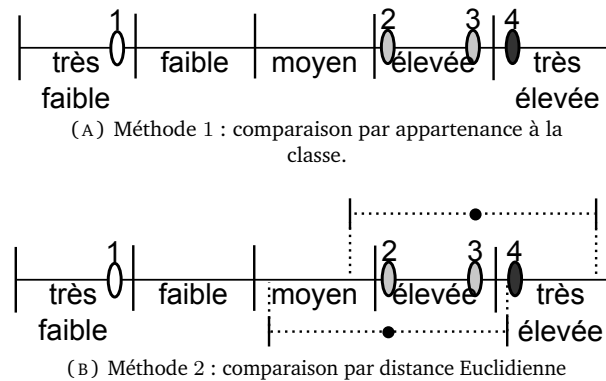


FIGURE 2.5 : Deux méthodes de comparaison de paramètre. Dans la première méthode, 2 et 3 sont indiscernables car ils sont dans la classe avec valeur élevée. A l'inverse, 3 et 4 sont discernables car ils n'appartiennent pas à la même classe. Ce n'est pas logique car 3 et 4 sont plus proches entre elles que 2 et 3. La méthode 2 permet de corriger ce problème en tenant en compte de la distance réelle entre les valeurs.

l'inverse, des clusters dont les valeurs sont aux deux extrémités d'une même classe sont évalués comme différents (comme les clusters 2 et 3 de la même figure).

Afin de palier à cette limite, l'évaluation de la différence se fait non avec l'appartenance à une classe, mais avec la distance euclidienne entre deux classes. Si la distance entre deux barycentres est inférieure à la taille d'une classe, alors les clusters sont jugés indiscernables sur le paramètre considéré. Une conséquence de ce changement est que si un paramètre se trouve dans une classe particulière et est jugé discriminant, alors il est le seul à se trouver dans cette classe puisque les valeurs des autres clusters sont à au moins une classe de lui de distance. La figure 2.5b montre le résultat de cette méthode, où les couples de clusters 3/4 et 2/3 sont maintenant tous deux jugés indiscernables, contrairement au couple 2/4.

2.5.1.4 Étape 4 : Caractérisation des types d'expression.

Cette dernière étape a pour objectif de caractériser les types d'expressions collectées les unes par rapport aux autres. Elle utilise les résultats des trois étapes précédentes.

Pour chaque cluster donné à l'étape 1, nous avons mis en évidence des combinaisons de paramètres pertinents lors de l'étape 2 de notre analyse. La méthode d'analyse que nous proposons consiste à comparer les valeurs d'un ensemble de paramètres pertinent pour un cluster à celles des clusters où cet ensemble de paramètres est également pertinent. Par exemple, supposons que nous souhaitons discriminer le cluster 1 de la rage aux clusters 1 de la joie et de l'exaltation mis en évidence dans l'étape 1. L'étape 2 de la méthode proposée a mis en évidence un sous-ensemble de mesures (vitesse moyenne et poids de l'axe majeur) pertinent pour l'ensemble de ces clusters. La vitesse moyenne (de même que le poids de l'axe majeur) de rage 1 est comparé à celle de joie 1, de même pour exaltation 1, selon la procédure de l'étape 3. La vitesse moyenne permet de discriminer joie 1 de rage 1, mais pas exaltation 1 de rage 1. Inversement, le poids de l'axe majeur permet de discriminer exaltation 1 de rage 1, mais pas joie 1 de rage 1. Cependant, les valeurs de ces deux paramètres pris conjointement permet de discriminer rage 1 de joie 1 et d'exaltation 1.

Cette dernière étape a cependant une limite. L'analyse de toutes les combinaisons de paramètres possibles décrit une complexité exponentielle. Cette complexité peut néanmoins être réduite de deux manières. Premièrement, en réduisant au maximum le nombre de paramètres requis pour discriminer un cluster. Les ensemble de paramètres les plus petits sont les plus efficaces car plus général. Par exemple, si un résultat affiche que la combinaison d'une distance parcourue importante ainsi que d'une vitesse moyenne importante est suffisante pour discriminer un cluster, alors tout combinaison de paramètres incluant ces deux-ci permet de discriminer ce cluster. Par ailleurs, utiliser moins de paramètres pour discriminer un cluster permet d'obtenir un résultat plus général.

2.5.2 Résultats

2.5.2.1 Paramètres des expressions kinesthésiques collectées

Grâce à l'approche présentée ci-dessus, nous avons pu extraire du tableau 2.10 les paramètres permettant de discriminer chaque cluster (ou type d'expression) du reste des émotions étudiées. Ainsi, lorsqu'un paramètre est discriminant pour un cluster particulier, il permet la discrimination de l'émotion qu'il représente. Il est à noter que tous les clusters ne sont pas mentionnés, puisque pour certains il n'y a pas de paramètre unique suffisant pour le discriminer des autres.

- *Exaltation 1* présente les expressions avec les durées les plus longues (7.8 s). Ces expressions ont également un aspect saccadé moyen sur l'axe X (6.2 m.s^{-2}) et présentent le plus grand nombre de répétitions (9.6).
- *Exaltation 2* présente les expressions avec la plus petite utilisation de l'axe X (0.37). A l'inverse, ce sont aussi les expressions avec la plus grande utilisation de l'axe Y (0.77).
- *Dégoût 2* présente des expressions avec une faible utilisation de l'axe Z (0.21).
- *Mépris 1* présente les expressions avec la vitesse moyenne la plus faible sur l'axe Z (0.0027 m.s^{-1}). Ces expressions présentes aussi les plus faibles valeurs pour l'aspect saccadé sur l'axe Z (0.69 m.s^{-2}), l'amplitude (0.030 m) et l'amplitude sur les axes X et Y (respectivement 0.023 m et 0.016 m). Ces expressions présentent en contrepartie la plus haute valeur du poids de l'axe majeur (0.92), et à l'inverse la plus basse pour le poids du second axe majeur (0.070).
- *Irritation 1* présente des expressions avec une faible amplitude (0.087 m) et du poids du second axe majeur (0.16). A l'inverse, ces expression présentent une valeur élevée du poids de l'axe majeur (0.78).
- *Rage 1* présente les expressions les plus saccadées sur les axes X et Z (respectivement 9.8 m.s^{-2} et 5.4 m.s^{-2}).
- *Rage 2* présente les expressions les plus saccadées en général (8.5 m.s^{-2}).

Distribution	Joie 1 100%	Exa 1 29%	Exa 2 71%	Dég 1 53%	Dég 2 47%	Mép 1 13%	Mép 2 87%	Inq 1 100%	Peur 1 100%	Irr 1 64%	Irr 2 36%	Rag 1 45%	Rag 2 55%
Durée	+	+	+	-	+	-	-	-	0	-	+	0	-
Distance parcourue	0	+	+	-	-	-	-	-	-	-	0	+	+
Axe X	0	+	+	-	0	-	-	-	-	-	0	+	-
Axe Y	0	+	+	-	0	-	-	-	-	-	0	+	-
Axe Z	0	+	+	-	-	-	-	-	-	-	0	+	-
Vitesse moyenne	0	+	0	-	0	-	-	-	-	-	0	+	0
Axe X	0	+	+	-	0	-	-	-	-	-	0	+	-
Axe Y	0	+	+	-	0	-	-	-	-	-	0	+	0
Axe Z	-	+	0	-	0	-	-	-	0	-	0	+	-
Aspect saccadé	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	0
Axe X	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Axe Y	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
Axe Z	0	+	0	-	0	-	-	-	0	-	0	+	+
Amplitude	+	+	0	0	+	-	0	0	0	-	0	+	0
Axe X	+	+	-	-	+	-	0	-	-	-	+	+	-
Axe Y	+	+	+	-	+	-	0	-	0	-	0	+	0
Axe Z	+	+	0	0	+	-	+	0	+	-	0	+	-
Indice d'expansion	+	+	+	0	+	-	+	0	0	-	0	+	0
Axe X	+	+	-	0	+	-	+	-	-	-	0	+	-
Axe Y	+	+	+	0	+	-	0	0	-	-	0	+	0
Axe Z	+	+	0	+	+	-	+	-	+	-	0	+	-
Axe majeur du mouvement	+	0	-	+	+	-	+	0	0	0	+	+	0
Axe Y	-	+	+	-	0	+	-	0	-	-	-	-	0
Axe Z	-	-	0	+	-	-	+	+	+	+	+	0	+
Poids de l'axe majeur	-	-	-	-	-	+	-	-	0	+	-	-	0
Poids du snd axe majeur	+	+	+	+	+	+	+	+	0	-	+	+	0
Répétitions	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-

TABLE 2. 10 : Caractéristiques des expressions discriminant les clusters. Les colonnes représentent les différentes façons d'exprimer les émotions relevées à l'étape 1. Les valeurs en gris sont celles pertinentes pour l'analyse à l'étape 2. Les valeurs en blanc sur fond noir sont celles déterminées discriminantes selon les étapes 3 et 4. - - correspond à très faible, - à faible, 0 à intermédiaire, + à élevé et + + à très élevé. Les noms des émotions sont abrégés comme suit : Joie=joie, Exa=exaltation, Dég=dégoût, Mép=mépris, Inq=inquiétude, Peur=peur, Irr=irritation, Rage=rage, Mép=mépris.

2.5.2.2 Paramètres discriminant les émotions proches

Cette section présente les paramètres discriminant les expressions kinesthésiques de couples d'émotions proches. Comme présenté en section 2.3.2.3, ces couples correspondent à des émotions proches à la fois sémantiquement et dans l'espace PAD. Comme mis en évidence ci-dessus, chaque émotion étudiée présente un ou deux clusters d'expressions identifiés. Pour que les expressions d'un cluster d'une émotion se distingue de l'ensemble des expressions de l'autre émotion du couple, il faut que ce cluster se distingue de tous les clusters de cette autre émotion.

Paramètres discriminant la joie de l'exaltation. Les expressions du cluster joie 1 se discriminent simultanément de celles des deux clusters de l'exaltation par leur durée et leur axe majeur du geste (composantes X et Y).

Les expressions du cluster l'exaltation 1 se distinguent de celles du cluster joie 1 par leur durée, axe majeur (composantes X et Y), vitesse moyenne, aspect saccadé, amplitude et leur nombre de répétitions. Les expressions du cluster l'exaltation 2 se discriminent de celles du cluster joie 1 par leur durée, axe majeur (composantes X et Y) et leur nombre de répétitions.

Les expressions du cluster exaltation 1 possèdent donc plus de paramètres les discriminant de celles de la joie que exaltation 2. Les expressions caractéristiques de l'exaltation présentent donc une gestuelle de très longue durée et rapide sur l'axe Y , tandis que celles caractéristiques de la joie présentent des gestes de longue durée et principalement présents sur l'axe X .

Paramètres discriminant le dégoût du mépris. Les expressions du cluster dégoût 1 se discriminent simultanément de celles des deux clusters du mépris par leur indice d'expansion et axe majeur du geste (composantes X et Z). Les expressions du cluster dégoût 2 se discriminent simultanément des deux clusters du mépris par leur durée, vitesse moyenne, amplitude et axe majeur du mouvement (composantes X , Y et Z).

Les expressions du cluster mépris 1 se discriminent simultanément de celles des deux clusters de dégoût par leur durée, amplitude, indice d'expansion, axe majeur du geste, poids des deux premier et second axes majeurs et nombre de répétitions. Les expressions du cluster mépris 2 se discriminent simultanément de celles des deux clusters de dégoût par leur durée, indice d'expansion et axe majeur du mouvement (composante Z).

Les expressions du cluster du dégoût 2 possèdent donc plus de paramètres les discriminant des expressions du mépris que cluster 1. En outre, les expressions du cluster du mépris 1 possèdent plus de paramètres les discriminant des expressions de dégoût que mépris 2. Les expressions caractéristiques du dégoût présentent donc des vitesses moyennes intermédiaires et une importante amplitude dans un temps court, tandis que celles caractéristiques du mépris présentent des gestes très concentrés et de faible amplitudes, présentant peu de répétitions.

Paramètres discriminant l'inquiétude de la peur. Les expressions du cluster inquiétude 1 se discriminent de celles du cluster peur 1 par leur durée, axe majeur (composantes X et Y) et leurs poids des premier et second axes majeurs. Les expressions du cluster peur 1 se discriminent par

rapport à celles du cluster inquiétude 1 par leur distance parcourue, indice d'expansion et leur axe majeur (composante Y).

Les expressions caractéristiques de l'inquiétude présentent donc de faibles durées, utilisant à la fois les axes X et Y , tandis que celles caractéristiques de la peur présentent des mouvements concentrés et avec de faibles distances parcourues.

Paramètres discriminant l'irritation de la rage. Les expressions du cluster irritation 1 se discriminent simultanément de celles des deux clusters de la rage par leur vitesse moyenne, indice d'expansion, axe majeur du geste (composante Y), et leurs poids des premiers et seconds axes majeurs. Les expressions du cluster irritation 2 se discriminent simultanément de celles des deux clusters de la rage par leur aspect saccadé et leur poids du second axe majeur.

Les expressions du cluster rage 1 se discriminent simultanément de celles des deux clusters de l'irritation par leur durée, distance parcourue, vitesse moyenne, aspect saccadé, indice d'expansion et leur axe majeur du geste (composante Z). Les expressions du cluster rage 2 se discriminent simultanément de celles des deux clusters de l'irritation par leur vitesse moyenne, aspect saccadé, poids de l'axe majeur et leur nombre de répétitions.

Les expressions du cluster irritation 1 présentent donc plus de paramètres discriminants de celles de la rage que le 2. Les expressions du cluster rage 1 présentent plus de paramètres discriminants de celles de l'irritation que le 2. Les expressions caractéristiques de l'irritation présentent donc des mouvements souples avec amplitude, vitesse et indice d'expansion intermédiaires, tandis que celles caractéristiques de la rage correspondent à des mouvements très rapides, saccadés et avec un indice d'expansion très élevé.

2.5.3 Avantages de la méthode proposée

L'approche proposée ci-dessus présente cinq principaux avantages en comparaison à la méthode ANOVA. Cette section expose ces avantages, liés d'une part à la possibilité d'exploiter plusieurs paramètres simultanément pour l'analyse, et d'autre part à la possibilité de prendre en compte le fait qu'une même émotion puisse être exprimée de différentes manières.

2.5.3.1 Utilisation simultanée des paramètres

Analyser plusieurs paramètres simultanément confère trois avantages :

- Identifier les différentes façons d'exprimer une même émotion.
- Recouper les informations.
- Identifier des ensembles de paramètres avec différents niveaux de pertinence.

Identification des différentes façons d'exprimer une même émotion. L'ANOVA couramment employée ne permet pas de prendre en compte la possibilité qu'une émotion puisse être exprimée de multiples manières. Ceci est un obstacle à l'extraction de paramètres kinesthésiques discriminant les expressions de différentes émotions entre elles. Par exemple, l'analyse par ANOVA de la joie

révèle que la longue durée de l'expression est un paramètre caractéristique de cette émotion. Cependant, notre méthode d'analyse suggère que cette durée est en réalité proche de l'une des deux façons utilisée par nos sujets afin d'exprimer du dégoût. Une longue durée ne permet donc pas en réalité de discriminer la joie du dégoût. Cependant, notre méthode permet de discriminer l'expression de la joie par rapport à celles des autres émotions en combinant le paramètre de la durée avec la composante en Y de l'axe majeur, ce dernier étant différent pour la joie et le dégoût.

Recoupement d'informations. L'ANOVA ne permet pas de prendre en compte plusieurs paramètres simultanément pour discriminer les expressions d'une émotion. Par exemple, les deux indices d'expansion de l'axe X et du Y ne permettent pas séparément de discriminer le deuxième cluster de l'exaltation par rapport aux autres émotions, que ce soit via l'approche ANOVA ou la notre. Cependant, notre méthode permet d'utiliser simultanément ces deux mesures afin de discriminer l'expression de l'exaltation (second cluster) de celles des autres émotions.

Identification d'ensembles de paramètres avec différents niveaux de pertinence. L'ANOVA ne permet pas d'identifier des ensembles de paramètres pertinents pour discriminer les émotions car elle ne traite qu'un seul paramètre à la fois. La méthode proposée permet de combler cette lacune (voir l'étape 4 2.5.1.4). Cependant, ces ensembles de paramètres ne sont pas pertinents de manière équivalente. Leur pertinence dépend du nombre de paramètres de l'ensemble (moins de paramètres sont requis pour discriminer deux émotions, plus l'ensemble de ces paramètres est pertinent, voir l'étape 4).

2.5.3.2 Utilisation des différentes façons d'exprimer les émotions

Prendre en considération les différents types d'expressions d'une même émotion confère deux avantages :

- Identifier les paramètres pertinents.
- Extraire des groupes d'expressions.

Identification des paramètres pertinents. L'ANOVA analyse l'ensemble des expressions d'une émotion, sans tenir compte des différentes manières possibles d'exprimer une même émotion. Ainsi, les populations comparées peuvent présenter de grands écart-types sur certaines mesures. Une approche par clusters permet de réduire ces écarts en groupant les expressions dont les paramètres ont des valeurs similaires. Les populations comparées sont donc plus pertinentes. Par exemple, la vitesse moyenne de l'ensemble des expressions de la rage est de 0.33 m.s^{-1} , avec un écart-type de 0.19. L'étape 1 a séparé en deux les expressions de la rage. Le cluster rage 1 présente une vitesse de moyenne de 0.48 m.s^{-1} , avec un écart-type sensiblement inférieur à 0.15. Le cluster rage 2 présente une vitesse moyenne de 0.21 m.s^{-1} , avec un écart-type de 0.12.

Extraction de groupes d'expressions. La méthode de clustering utilisée regroupe les expressions d'une même émotion d'après leurs similarités. Cette propriété du clustering peut se révéler utile, notamment dans le cadre d'une reconnaissance automatique de l'émotion dans une expression quelconque, par la détermination du cluster auquel elle appartient.

Ces résultats ne peuvent pas être mis en évidence avec la méthode par ANOVA.

2.6 Conclusion

2.6.1 Résumé des travaux

Ce premier chapitre avait pour objectif principal d'étudier les différences entre expressions kinesthésiques pour différentes émotions sémantiquement proches.

Nous avons commencé par collecter auprès de sujets un corpus d'expressions kinesthésiques de huit émotions. Ces huit émotions étaient classées en couple d'émotions sémantiquement proches. En utilisant la méthode par ANOVA couramment employée dans ce genre d'étude, nous avons mis en évidence des différences entre les expressions de certaines des émotions étudiées. Nous avons également comparé nos résultats à ceux de d'autres études similaires, montrant des points communs entre les expressions collectées pour certaines émotions.

Dans un second temps, nous avons mis en évidence les limites de l'ANOVA pour la discrimination d'expressions kinesthésiques d'émotions et nous sommes tournées vers deux autres méthodes : l'ACP et le clustering avec l'algorithme EM. En considérant les caractéristiques de ces méthodes et les résultats qu'elles nous ont apporté, nous avons mis en place notre propre méthode d'analyse, dont l'application nous a permis de mieux caractériser et discriminer les expressions des émotions étudiées.

2.6.2 Synthèse et perspectives

Les différentes méthodes employées dans ce chapitre ont mis en évidence les limitations des analyses des expressions kinesthésiques des émotions actées. Nous avons mis au point notre propre méthode, afin d'être capable de différencier les expressions kinesthésiques d'émotions proches.

Plusieurs directions peuvent donner suite à ces travaux. D'une part, si nous savons qu'il existe une discrimination des émotions sémantiquement proches d'un point de vue statistique, nous ignorons si les expressions que nous avons collectées permettraient à de réels utilisateurs d'identifier sans ambiguïté les émotions exprimée. Par ailleurs, les expressions collectées ici sont issues d'émotions actées, généralement plus exagérées que des expressions d'états affectifs plus naturels. Une deuxième direction à suivre serait de déterminer si la modalité kinesthésique permettrait également de discriminer des états affectifs plus spontanés. Ces deux directions seront traitées respectivement dans les chapitres 3 et 4.

RECONNAISSANCE DES ÉMOTIONS ACTÉES AVEC EXPRESSIONS FACIALES ET KINESTHÉSIQUES

Sommaire

3.1	Introduction	65
3.2	Contexte de l'étude et objectifs	65
3.2.1	Travaux existants	65
3.2.2	Objectifs	67
3.3	Étude de la reconnaissance d'émotions actées dans des expressions faciales	67
3.3.1	Hypothèses	67
3.3.2	Méthode expérimentale	67
3.3.3	Résultats	69
3.3.4	Analyse des résultats et Discussion	71
3.4	Étude de la reconnaissance d'émotions actées dans des expressions kine- sthésiques	71
3.4.1	Pré-sélection statistique	72
3.4.2	Méthode expérimentale	73
3.4.3	Résultats	74
3.5	Étude de la reconnaissance des émotions actées dans des expressions mul- timodales	77
3.5.1	Hypothèses	78
3.5.2	Méthode expérimentale	79
3.5.3	Résultats et Analyses	83
3.6	Conclusion	91
3.6.1	Résumé des travaux	91
3.6.2	Synthèse et perspectives	92

3.1 Introduction

Le chapitre précédent a visé à étudier l'expression kinesthésique des émotions actées. Nous y avons abordé la manière dont les humains exprimaient un ensemble choisi d'émotions. Des différences entre les expressions de ces émotions ont été mis en évidence avec une méthode d'analyse que nous avons proposée. Ces différences se sont révélées cohérentes avec celles observées dans d'autres études avec des populations différentes. Ces résultats ne suffisent cependant pas à affirmer que la modalité kinesthésique permet de communiquer des émotions. Une communication réussit implique non seulement l'expression, mais également une reconnaissance correcte des émotions par notre interlocuteur. Ce chapitre aborde donc la reconnaissance et la perception d'émotions exprimées avec la modalité kinesthésique.

Une des applications possibles de la communication des émotions avec des expressions kinesthésiques est l'amélioration de la perception et des taux de reconnaissance des émotions exprimées par d'autres modalités. Nous proposons ici de coupler nos expressions kinesthésiques avec des expressions faciales. De toutes les modalités, l'expression faciale est certainement celle qui a reçue le plus d'intérêt (Ekman et Friesen (1975); Scherer et Grandjean (2007); Courgeon et al. (2009a)). Toutefois, comme mis en évidence au chapitre 1 dans la section 1.2.2.1, les expressions faciales ne permettent pas une reconnaissance parfaite des émotions, en particulier lorsque ces dernières sont sémantiquement proches. Ce chapitre aborde la perception des émotions étudiées au chapitre 2 exprimées dans un couplage facial-kinesthésique, et vise à déterminer le rôle de chacune de ces deux modalités dans cette perception. Nous aborderons également le ressenti des sujets sur l'intégration d'un retour kinesthésique à des expressions faciales.

Ce chapitre s'organise de la façon suivante. La section suivante décrit les travaux récents concernant l'étude de l'expression multimodale des émotions. La section 3.3 présentera une première expérimentation sur la reconnaissance d'émotions proches exprimées par des expressions faciales d'un avatar. Nous extrairons ensuite en section 3.4 les expressions kinesthésiques du corpus créé au chapitre précédent les plus pertinentes pour communiquer les émotions de notre ensemble d'étude grâce à une étude statistique couplée à une étude perceptive. Les résultats de ces deux études nous permettront de réaliser une étude multimodale qui sera décrite en section 3.5, traitant à la fois des taux de reconnaissance et de la perception d'émotions. Nous nous pencherons également sur le ressenti utilisateur pour ce couplage. Enfin, la section 3.6 conclura ce troisième chapitre.

3.2 Contexte de l'étude et objectifs

3.2.1 Travaux existants

3.2.1.1 L'expression multimodale de l'émotion

Bien que nos travaux se focalisent sur la modalité kinesthésique pour exprimer les émotions, ces dernières s'expriment selon différentes modalités, comme l'expression faciale (Ekman et Friesen (1975); Ahn et al. (2009)), la gestuelle (Wallbott (1998); Dael et al. (2012)) ou la prosodie (Nwe et al. (2003); Hofer (2004)).

En milieu naturel, la communication des émotions s'effectue selon une synchronisation de ces modalités (Scherer (2000)). C'est pourquoi de nos jours, de plus en plus d'études combinent plusieurs de ces modalités afin de communiquer des émotions plus efficacement (Scherer (2005)).

L'utilisation de la multimodalité permet d'apporter des indices complémentaires. Courgeon et al. (2011) étudièrent l'influence de l'expression faciale et gestuelle d'une émotion sur la perception de celle-ci. Leurs résultats ont montré des différences dans la reconnaissance des émotions selon la modalité. Lorsque les expressions des deux modalités étaient présentées simultanément, les sujets semblaient se fier plus à l'expression faciale pour évaluer la dimension du plaisir de l'émotion, tandis qu'ils se fiaient davantage à la posture pour l'activation.

La multimodalité ne permet pas seulement d'influencer la perception des émotions, mais aussi d'autres aspects plus subjectifs comme la sensation de présence, comme montré dans l'étude de Tan Tan et al. (2011) dans laquelle des sujets devaient retrouver divers objets dans une pièce à l'aide d'un avatar virtuel. Lorsque l'avatar ne se contentait pas de pointer vers les objets mais aussi arborait des postures d'approbation ou de désapprobation, les sujets prirent moins de temps à effectuer des tâches complexes.

3.2.1.2 L'expression haptique de l'émotion couplée à une autre modalité

Bien que le tactile et le kinesthésique soient deux modalités permettant de communiquer des émotions, elles reçoivent moins d'intérêt que d'autres. Basori et al. (2010b,a) couplèrent un avatar 3D pouvant exprimer la joie ou la colère avec un joystick doté d'un vibreur. Plus la magnitude des vibrations était élevée, plus les sujets associaient l'émotion à de la colère.

Bonnet et al. (2011) ont combiné des expressions kinesthésiques inspirées d'études en psychologie avec des expressions faciales d'un grand nombre d'émotions. Leur étude a montré un accroissement des taux de reconnaissance pour certaines émotions en comparaison avec les expressions faciales présentées seules.

Bickmore et al. (2010) ont demandé à des sujets de poser la main dans un gant simulant la main d'un avatar pouvant leur serrer la main à l'aide d'un système d'air. Le visage d'un humain virtuel, pouvant exprimer la joie, la neutralité et la tristesse, était visuellement relié au gant par l'intermédiaire d'un mannequin. Lorsque le gant était actif en plus de l'avatar et serrait leur main, les sujets percevaient de l'empathie, de la sympathie et de la volonté de rassurer provenant de l'agent virtuel, quelque soit le genre de la personne.

Les expressions faciales et haptiques semblent s'influencer mutuellement. Klatzky et al. (2011) ont étudié la reconnaissance des émotions dans un masque représentant une expression faciale que des sujets pouvaient toucher. Pendant qu'ils percevaient le masque par la modalité haptique, on leur montrait des expressions faciales sur un écran. Klatzky et al. ont relevé que la perception des émotions semblaient être influencée par ce que les sujets voyaient. Gatti et al. (2013) ont mis en évidence qu'à l'inverse, un retour kinesthésique pouvait modifier la perception de l'activation d'une émotion exprimée par le visage.

3.2.2 Objectifs

Les travaux présentés ci-dessus mettent en évidence l'intérêt d'exploiter plusieurs modalités pour communiquer efficacement des émotions. L'aspect récent des travaux sur l'utilisation de la modalité kinesthésique pour communiquer des émotions justifie que cette modalité n'ait encore été que peu étudiée en couplage avec d'autres modalités. Le rôle de la modalité kinesthésique dans la reconnaissance et la perception des émotions reste donc aujourd'hui méconnu.

L'objectif de ce chapitre est d'améliorer la discrimination d'émotions sémantiquement proches. L'approche proposée est d'étudier l'influence du couplage expressions faciales-kinesthésiques sur la reconnaissance et la perception des émotions. Nous chercherons en particulier à étudier de quelle façon la modalité kinesthésique est intégrée dans la reconnaissance et l'évaluation de l'émotion. Nous verrons également comment son intégration est perçue subjectivement par les utilisateurs.

Pour répondre à ces objectifs, nous exploiterons des expressions faciales et kinesthésiques issues de deux corpus. Les expressions faciales seront reproduites d'après le corpus MindReading en utilisant le framework d'agent virtuels Multimodal Affective and Reactive Characters (MARC) (Golan et al. (2006); Courgeon et al. (2008)). Les expressions kinesthésiques seront tirées du corpus d'expressions kinesthésiques collecté au chapitre précédent. L'analyse que nous avons faite de ce corpus nous permettra de sélectionner dans ce corpus des expressions devant permettre de discriminer efficacement les émotions étudiées.

3.3 Étude de la reconnaissance d'émotions actées dans des expressions faciales

L'objectif de cette étude est d'étudier les taux de reconnaissances des émotions exprimées par le visage d'un avatar.

3.3.1 Hypothèses

Les émotions étudiées étant sémantiquement proches, nous posons l'hypothèse qu'il est difficile pour des individus de les discriminer avec des expressions faciales d'un avatar.

- H1** Certaines émotions sont difficiles à discriminer des émotions qui leur sont sémantiquement proches.

3.3.2 Méthode expérimentale

3.3.2.1 Sujets

23 sujets, 33 ans d'âge moyen ($SD = 11$, $min = 22$, $max = 59$) ont participé à cette expérimentation. Nous n'analyserons pas les effets du genre ou de l'éducation sur les résultats à cause de la grande majorité des hommes (19) et de ceux ayant reçu une éducation européenne (21).

3.3.2.2 Plateforme expérimentale

La plateforme expérimentale de cette étude est composée d'un ordinateur. Cet ordinateur gère deux composantes :

- L'affichage des expressions faciales via le Framework MARC.
- Une interface graphique servant à donner les instructions au sujet et à collecter ses réponses.

Cette plateforme expérimentale est autonome et ne requiert pas une intervention de l'expérimentateur en cours d'expérience. Le sujet est donc seul dans la salle, ce qui permet d'éviter que ses réponses ne soient influencées par la présence de quelqu'un.

3.3.2.3 Variables

Cette étude utilise deux types de variables. Premièrement, une variable indépendante correspondant aux émotions étudiées. Deuxièmement, l'émotion reconnue par le sujet dans l'expression faciale présentée. Ceci nous permettra de déterminer les taux de reconnaissance corrects de chaque émotion.

Variable indépendante La variable indépendante **Vi1** de notre étude concerne l'ensemble des émotions que nous étudions. Nous souhaitons étudier les limites des expressions faciales d'un avatar virtuel pour la discrimination d'émotions sémantiquement proches par des utilisateurs. Nous reprenons ici les huit émotions dont nous avons collecté l'expression kinesthésique au chapitre précédent : la joie, l'exaltation, le dégoût, le mépris, l'inquiétude, la peur, l'irritation et la rage. De plus, garder cet ensemble permettra par la suite d'étudier l'amélioration de la perception de ces émotions par un couplage des expressions faciales et kinesthésiques.

Les expressions faciales des émotions étudiées ont été extraites du logiciel MindReading présenté dans [Golan et al. \(2006\)](#), fournissant un corpus d'expressions faciales réalisées par des acteurs pour un grand nombre d'émotions. Ces expressions ont ensuite été reproduites via le framework d'agents virtuels MARC, présenté dans [M. Courgeon, C. Jacquemin \(2008\)](#). Ce framework a été utilisé dans plusieurs études, dont celles de [Courgeon et al. \(2009a\)](#); [Clay et al. \(2012\)](#) pour étudier la communication des émotions avec des expressions gestuelles et faciales. La figure 3.1 illustre les expressions réalisées avec ce framework pour les huit émotions que nous étudions.

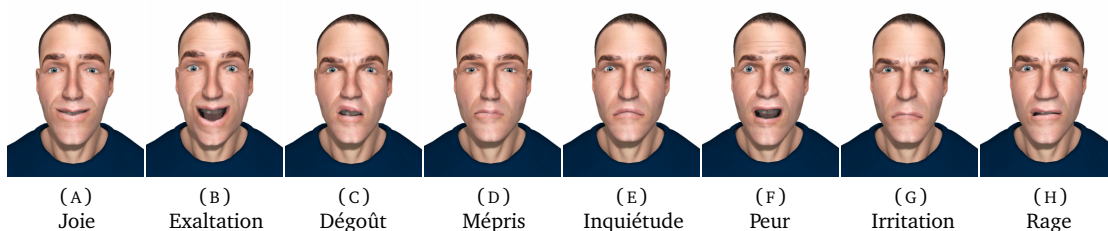


FIGURE 3.1 : Expressions faciales réalisées avec le framework MARC à partir d'images du logiciel MindReading ([Golan et al. \(2006\)](#)).

Variable dépendante La variable dépendante de cette étude concerne l'émotion reconnue par le sujet pour chaque expression faciale et vise à évaluer H1. Cette variable est collectée pour chacune des expressions faciales présentées.

Ms1 Émotion reconnue. Cette variable prend une valeur unique parmi {joie, exaltation, dégoût, mépris, inquiétude, peur, irritation, rage} et est collectée pour chacune des expressions proposées.

3.3.2.4 Procédure expérimentale

Présentation de l'expérimentation au sujet. Au début de l'expérimentation, le sujet s'assoit sur la chaise. On l'informe que l'étude vise à étudier la reconnaissance des émotions à partir d'expressions faciales issues d'un avatar virtuel. On lui explique que des expressions vont lui être montrées et qu'il devra reporter pour chacune indiquer quelle émotion il a reconnu dans cette expression parmi une liste d'émotions. Il remplit un formulaire concernant son âge, genre et éducation culturelle (voir annexe A.1).

Entraînement. Au début de l'entraînement, la moitié gauche de l'écran est blanche. La moitié droite de l'écran est constituée d'un bouton permettant de jouer une expression faciale et d'un formulaire de réponse. La figure 3.2 illustre l'écran de l'ordinateur lors de l'expression d'une émotion. Le formulaire est illustré en grande taille en annexe A.3.

Lorsque le sujet appuie sur le bouton permettant de jouer une expression faciale, une expression faciale statique d'avatar issue de MARC (surprise) lui est présentée durant deux secondes. Le sujet peut rejouer l'expression autant de fois qu'il le souhaite, mais au moins une fois afin de pouvoir répondre.

Dans le formulaire, le nom de chaque émotion est suivi d'un scénario où cette émotion peut survenir. Ces scénarios sont inspirés de ceux de Bänziger et al. (2012); Golan et al. (2006). Ceci permet au sujet de mieux appréhender les subtiles différences entre les émotions sémantiquement proches (Wallbott (1998)). Il coche ensuite une des émotions avant de terminer l'entraînement.

Complétion et fin de l'expérimentation. L'expérimentateur sort de la salle pour ne pas influencer le sujet. Huit expressions faciales sont alors présentées et évaluées les unes à la suite des autres par le sujet. L'ordre des expressions faciales, ainsi que celui des labels des émotions dans le formulaire de réponse, sont tirés aléatoirement pour chaque sujet. Une fois la dernière expression évaluée, un message remercie le sujet de sa participation.

3.3.3 Résultats

La matrice de confusion présentée dans la table 3.1 indique en pourcentage les émotions reconnues par les sujets dans chaque expression. Une émotion est considérée comme reconnue dans une expression lorsque ce pourcentage dépasse les 12.5 % (i.e. plus que le seuil de hasard : 1/8 émotions). Nous appelons confusion critique le fait qu'une émotion est davantage ou également

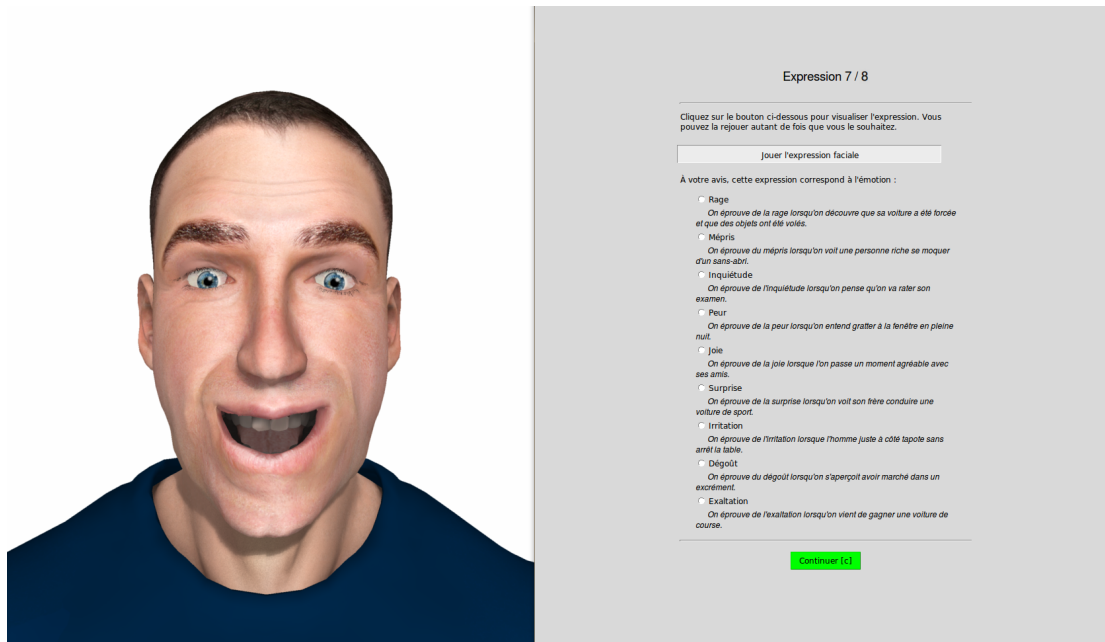


FIGURE 3.2 : Écran pour les sujets. Une expression faciale issue de MARC est montrée au sujet sur la partie gauche de l'écran. Le sujet l'évalue ensuite grâce au questionnaire sur la partie droite de l'écran. Une image plus grande du formulaire est illustrée en annexe A.3

reconnue dans une expression que l'émotion que cette expression est censée exprimer. Les huit émotions exprimées ont été perçues comme décrit ci-dessous :

Joie. Cette émotion a été reconnue par 100 % des sujets et ne présente donc aucune ambiguïté avec l'exaltation.

Exaltation. Cette émotion a été reconnue par 78 % des sujets et présente une ambiguïté avec la joie (22 %).

Dégoût. Cette émotion a été reconnue par 57 % des sujets et a été confondue avec le mépris (13 %). Elle a aussi été confondue avec d'autres émotions : l'inquiétude et l'irritation (respectivement 13 % et 17 %).

Mépris. Cette émotion a été reconnue par (49 %) des sujets et a été confondue avec le dégoût (24 %). Elle a aussi été confondue avec l'inquiétude (23 %).

Inquiétude. Cette émotion a été reconnue par (32 %) des sujets et n'a pas été confondue avec la peur. En revanche, elle a été confondue avec le dégoût (28 %) et présente une confusion critique avec le mépris (32 %).

Peur. Cette émotion a été reconnue par 74 % des sujets et ne présente aucune ambiguïté avec l'inquiétude.

Irritation. Cette émotion a été reconnue par 26 % des sujets et présente une confusion critique avec la rage. Elle présente également une confusion critique avec le mépris (26 %).

Rage. Cette émotion a été seulement reconnue par 9 % des sujets et présente une confusion critique avec l'irritation 31 %. Elle présente aussi une confusion critique avec le dégoût et la peur (respectivement 39 % et 13 %).

	Joie	Exaltation	Dégoût	Mépris	Inquiétude	Peur	Irritation	Rage
Joie	100	22	0	0	0	4	0	0
Exa	0	78	0	0	0	0	0	0
Dég	0	0	57	24	28	9	5	39
Mép	0	0	13	49	32	0	26	4
Inq	0	0	13	23	32	9	12	4
Peur	0	0	0	0	4	74	5	13
Irr	0	0	17	4	4	0	26	31
Rage	0	0	0	0	0	4	26	9
Total	100	100	100	100	100	100	100	100

TABLE 3.1 : Taux de reconnaissance en pourcentage des émotions. Les colonnes correspondent à l'émotion exprimée, les lignes à l'émotion reconnue par les sujets. Les expressions des émotions d'un même couple sont en bleu clair. Les nombres en blanc sur fond noires correspondent aux confusions critiques.

Ces résultats de reconnaissance des émotions dans les expressions faciales valident H1, en particulier pour les couples d'émotions dégoût/mépris et irritation/rage.

3.3.4 Analyse des résultats et Discussion

Sur l'ensemble des émotions étudiées, les deux présentant les meilleurs taux de reconnaissances sont la joie et l'exaltation. Ce sont les deux seules émotions positives de notre étude, comptant 2 émotions positives contre 6 émotions négatives. Les études de [Bickmore et al. \(2010\)](#); [Courgeon et al. \(2011\)](#) portant sur les expressions faciales suggèrent que cette modalité conduit particulièrement la dimension du plaisir. Ceci peut expliquer pourquoi les émotions négatives, plus nombreuses dans notre étude, peuvent se confondre plus facilement entre elles.

Nous observons par ailleurs des confusions critiques dans les expressions de trois émotions : l'inquiétude, l'irritation et la rage. L'expression de la rage est la moins bien reconnue de toutes, perçue davantage comme exprimant du dégoût, de la peur et de l'irritation que de la rage. Hors-mis le nombre d'expressions d'émotions négatives présentées, deux raisons peuvent expliquer cette confusion pour la rage. Premièrement, les expressions proposées sont statiques. Elles ne permettent donc pas de transmettre des informations liées au mouvement, ce qui pourrait expliquer que la rage soit confondue avec des émotions présentant une activation plus faible. Deuxièmement, les utilisateurs exploitent de façon plus importante d'autres indices que l'expression faciale pour percevoir l'activation d'une émotion, comme l'expression gestuelle ([Courgeon et al. \(2011\)](#)).

3.4 Étude de la reconnaissance d'émotions actées dans des expressions kinesthésiques

L'objectif de cette étude est d'extraire du corpus d'expression collecté au chapitre 2 une expression communiquant le plus efficacement possible chacune des émotions étudiées. Dans l'idéal, choisir la meilleure expression d'un corpus pour communiquer des émotions s'effectuerait par un test perceptif avec des sujets sur l'ensemble des expressions de ce corpus. À raison de trente secondes

pour évaluer une expression, ceci équivaldrait sur notre corpus à une étude d'une durée totale de 1h45 sans pause, ce qui serait pénible pour des sujets.

D'un autre côté, une approche purement statistique pourrait extraire une expression typique de chaque émotion du corpus, sans passer par une étude perceptive avec de réels sujets. Cependant, les émotions exprimées dans ces expressions typiques pourraient ne pas être reconnues par des sujets réels. Afin de résoudre les difficultés liées au temps de passation et de la perception des émotions, nous proposons de réaliser cette étude en deux temps :

1. Une pré-sélection statistique dans un premier temps, qui sélectionnera un ensemble réduit d'expressions par rapport à notre corpus. Cette sélection vise à garder les expressions les plus représentatives de chaque émotion.
2. Une étude perceptive dans un second temps, qui évaluera l'efficacité des expressions sélectionnées pour exprimer des émotion. Cette étude exploitera des sujets réels pour évaluer cette efficacité.

La section qui suit traite de la pré-sélection statistique, tandis que la section d'après traite de l'étude perceptive.

3.4.1 Pré-sélection statistique

L'objectif de cette pré-sélection est de réduire le temps de passation de l'étude perceptive, originellement estimé à 1h45 à une vingtaine de minutes. Il faut donc réduire le nombre d'expressions kinesthésiques à évaluer par les sujets. Nous limitons le nombre d'expressions à leur présenter à quatre par émotion (soit un total de 32 retenues pour l'étude perceptive avec sujets), ce qui permettrait d'avoir une durée totale d'expérimentation (incluant l'entraînement) à 20 minutes.

L'idée globale de la méthode de pré-sélection consiste à calculer, pour chaque émotion séparément, les expressions les plus proches du barycentre des expressions de cette émotion dans l'espace des paramètres. Ceci dit, l'étude du corpus réalisée au chapitre précédent en 2.5 a montré que certaines émotions pouvaient s'exprimer de différentes manières. Afin de pallier à ce problème, nous appliquons l'idée de notre méthode de pré-sélection non pas à l'ensemble des expressions d'une même émotion, mais sur chaque cluster mis en évidence au chapitre précédent en 2.5.1.1.

Afin de sélectionner quatre expressions par émotion, nous différencions ainsi deux cas pour chaque émotion étudiée :

- l'algorithme Espérance-Maximisation (EM) n'a retourné qu'un seul cluster pour cette émotion : nous prenons les quatre expressions présentant la distance Euclidienne dans l'espace des paramètres la plus petite au barycentre de ce cluster.
- l'algorithme EM a retourné deux clusters pour cette émotion : nous prenons les deux expressions présentant la distance Euclidienne dans l'espace des paramètres la plus petite au barycentre pour chacun de ces deux clusters.

Cette méthode permet de pré-sélectionner $4 \times 8 = 32$ expressions kinesthésiques de notre corpus, les plus représentatives de chaque émotion.

3.4.2 Méthode expérimentale

3.4.2.1 Sujets

25 sujets, 29 ans d'âge moyen ($SD = 9$, $min = 20$, $max = 59$) ont participé à cette expérimentation. Nous n'analyserons pas les effets du genre, de la main dominante ou de l'éducation sur les résultats à cause de la grande majorité des hommes (19), des droitiers (23) et de ceux ayant reçu une éducation européenne (24).

3.4.2.2 Plateforme expérimentale

La plateforme expérimentale est quasi-identique à celle décrite au chapitre précédent en 2.3. La principale différence réside dans l'utilisation du dispositif kinesthésique. Dans l'étude précédente, nous utilisions le dispositif pour collecter des expressions, tandis que nous l'utilisons ici pour restituer des expressions.

3.4.2.3 Variables

Cette étude utilise deux types de variables. Premièrement, une variable indépendante correspondant aux émotions étudiées. Deuxièmement, les émotions perçues dans les expressions présentées. Ceci nous permettra de déterminer les taux de reconnaissance corrects de chaque émotion.

Variable indépendante La variable indépendante **Vi1** de notre étude concerne les émotions communiquées dans les expressions présentées aux sujets (8 émotions $\times$ 4 expressions pour chacune = 32 expressions présentées). Ce choix d'émotions est justifié au chapitre précédent en 2.3.2.3.

Variables dépendantes Les variables dépendantes de cette étude concerne les émotions reconnues et leur perception sur l'espace Plaisir-Activation-Dominance (PAD) par le sujet pour chaque expression kinesthésique présentée.

Ms1 Émotions reconnues pour chaque expression. Le sujet peut cocher une à trois émotions parmi la liste des huit émotions étudiées. Cette étude visant à étudier les ambiguïtés de reconnaissance, pouvoir cocher plusieurs émotions pour le sujet est important pour détecter la présence d'ambiguïté dans une expression.

Ms2 Évaluation PAD. Valeurs de plaisir-activation-dominance perçu dans l'expression présentée. Le sujet reporte son évaluation via trois échelle de Likert à 5 points, une pour chaque axe : de très négative à très positive pour le plaisir, de très passive à très active pour l'activation, et de pas du tout dominante à très dominante pour la dominance.

3.4.2.4 Procédure expérimentale

Présentation de l'expérimentation au sujet. Au début de l'expérimentation, le sujet s'assoit sur la chaise. On l'informe que l'expérimentation vise à étudier la reconnaissance des émotions dans des expressions kinesthésiques à l'aide d'un dispositif à retour d'effort. On lui explique qu'une série d'expressions kinesthésiques va lui être présentée et qu'il devra reporter les émotions qu'il a perçu dans chaque expression. Il remplit un formulaire demandant son âge, genre et éducation culturelle (voir annexe A.1).

Entraînement. Au début de l'entraînement, la feuille A4 illustrée dans la figure 3.3 est remise au sujet. Cette feuille indique le nom de chaque émotion possible, à laquelle suit la proposition d'un scénario où cette émotion peut survenir. Ces scénarios sont inspirés de ceux de [Bänziger et al. \(2012\)](#); [Golan et al. \(2006\)](#) et sont les mêmes que ceux de l'expérimentation du chapitre précédent. Ceci permet au sujet de mieux appréhender les différences subtiles entre les émotions proches [Wallbott \(1998\)](#). Cette feuille propose aussi des noms d'émotions associés à chaque extrémité de l'espace PAD. Ceci permet au sujet de mieux comprendre ce que représente chacune des dimensions du PAD.

Durant l'entraînement, le sujet apprend à utiliser l'interface graphique de l'expérimentation, permettant de présenter les expressions kinesthésiques et de les évaluer. Lorsque le sujet appuie sur un bouton, une expression kinesthésique de l'ensemble de départ lui est restituée. Le sujet ne peut jouer qu'une seule fois chaque expression, et l'application bascule automatiquement sur le formulaire de réponse lorsqu'une expression est jouée. Le formulaire de réponse est décrit en annexe A.4 et permet au sujet de reporter Ms1 les émotions reconnues et Ms2 l'évaluation PAD dans l'expression courante.

Complétion et fin de l'expérimentation. A la fin de l'entraînement, l'expérimentateur sort de la salle pour ne pas influencer le sujet. Trente-deux expressions kinesthésiques sont alors présentées dans un ordre aléatoire et évaluées séquentiellement par le sujet. Une fois la dernière expression évaluée, un message remercie le sujet de sa participation.

3.4.3 Résultats

À partir des émotions perçues par les sujets, nous déterminons les expressions kinesthésiques les plus pertinentes pour communiquer sans ambiguïté chacune des émotions étudiées. Cette section présente le critère utilisé pour sélectionner ces expressions.

Commençons par définir la fonction $reco_{exp}$ indiquant si un sujet s a perçue l'émotion e dans une expression kinesthésique exp donnée :

$$reco_{exp}(s, e) = \begin{cases} 1 & \text{si le sujet } s \text{ a perçue l'émotion } e \text{ dans l'expression } exp \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Liste des émotions de cette expérience

Émotion	Contexte type où survient cette émotion
Joie	Vous éprouvez de la joie lorsque vous passez un moment agréable avec vos amis.
Exaltation	Vous éprouvez de l'exaltation lorsque vous venez de gagner une voiture de course.
Dégoût	Vous éprouvez du dégoût lorsque vous vous apercevez avoir marché dans un excrément.
Mépris	Vous éprouvez du mépris lorsque vous voyez une personne riche se moquer d'un sans-abri.
Inquiétude	Vous éprouvez de l'inquiétude lorsque vous pensez que vous allez rater votre examen.
Peur	Vous éprouvez de la peur lorsque vous entendez gratter à la fenêtre en pleine nuit.
Irritation	Vous éprouvez de l'irritation lorsque l'homme à côté de vous tapote sans arrêt la table.
Rage	Vous éprouvez de la rage lorsque vous découvrez que votre voiture a été forcée et que des objets ont été volés.

Aide pour la notation des émotions

L'émotion semble	Correspond par exemple à
Très positive	Se sentir aimé, inspiré.
Très négative	Se sentir haineux, triste.
Très active	Se sentir triomphant, excité.
Très passive	Se sentir relaxé, s'ennuyer.
Très dominante	Se sentir puissant, contrôlant la situation.
Pas du tout dominante	Se sentir terrifié, timide.

FIGURE 3.3 : Document donné au sujet au début de l'expérimentation. Ce document vise à aider le sujet à comprendre le sens des émotions de l'étude et les axes de l'espace PAD.

Sur la base de cette fonction, nous définissons une fonction $score_1$, exprimant le nombre de sujets qui ont reconnu dans l'expression exp l'émotion exprimée e_{exp} :

$$score_1(exp) = \frac{\sum_s reco_{exp}(s, e_{exp})}{\#s} \quad (3.1)$$

Cette fonction de score ne prend pas en compte le fait qu'un sujet peut avoir perçu plusieurs émotions pour une même expression. Ceci devrait cependant être pris en compte car nous souhaitons avoir des expressions les moins ambiguës possibles. Ainsi, nous définissons $score_2$ qui réduit le score en fonction du nombre d'émotions qui ont été perçues dans l'expression :

$$score_2(exp) = \frac{\sum_s reco_{exp}(s, e_{exp})}{\sum_s \sum_e reco_{exp}(s, e)} \quad (3.2)$$

Ce nouveau score permet de prendre en compte le nombre d'émotions qui ont été perçues dans une même expression. Il ne tient en revanche pas compte de la nature des émotions perçues. Ainsi, une expression kinesthésique exprimant de la joie aura le même score si elle affiche une ambiguïté avec de l'exaltation ou du dégoût. Cependant, notre objectif étant d'aider à discriminer des émotions proches, nous devrions prendre en compte la distance PAD entre l'émotion réellement exprimée et les émotions reconnues.

Nous définissons finalement $score_3$:

$$score_3(exp) = \frac{\sum_s reco_{exp}(s, exp_e)}{\underbrace{\sum_s reco_{exp}(s, exp_e)}_{\text{Partie I}} + \underbrace{\sum_s \sum_{e \neq exp_e} reco_{exp}(s, e) \times (d_{PADmax} - d_{PAD}(e, exp_e))}_{\text{Partie II}}} \quad (3.3)$$

Avec :

- d_{PADmax} la distance euclidienne entre les deux émotions étudiées les plus éloignées sur l'espace PAD (i.e joie et peur).
- $d_{PAD}(e, e_{exp})$ la distance euclidienne entre l'émotion e reconnue dans l'expression faciale exprimant e_{exp} .

Ici, le dénominateur a été séparé en deux parties (Partie I et Partie II), selon que l'émotion perçue est respectivement l'émotion réellement exprimée ou non. Partie I correspond au nombre de personnes qui ont perçu l'émotion exprimée. Partie II correspond au nombre d'émotions qui ont été perçues, mais qui ne sont pas celle exprimée. Ces émotions sont pondérées par leur proximité à l'émotion exprimée : plus elles sont proches sur l'espace PAD, plus le poids est élevé. Ceci vise à pénaliser les expressions dans lesquelles sont perçues des émotions présentant une forte proximité avec l'émotion exprimée.

Ce score a été calculé pour l'ensemble des $8 \times 4 = 32$ expressions kinesthésiques présentées aux sujets. La figure 3.4 reporte les résultats. L'expression kinesthésique ayant le plus haut score pour chaque émotion exprimée est représentée graphiquement dans le plan $X \circ Y$ sur la figure 3.5. Les paramètres principaux de ces expressions sont reportés dans la table 3.2.

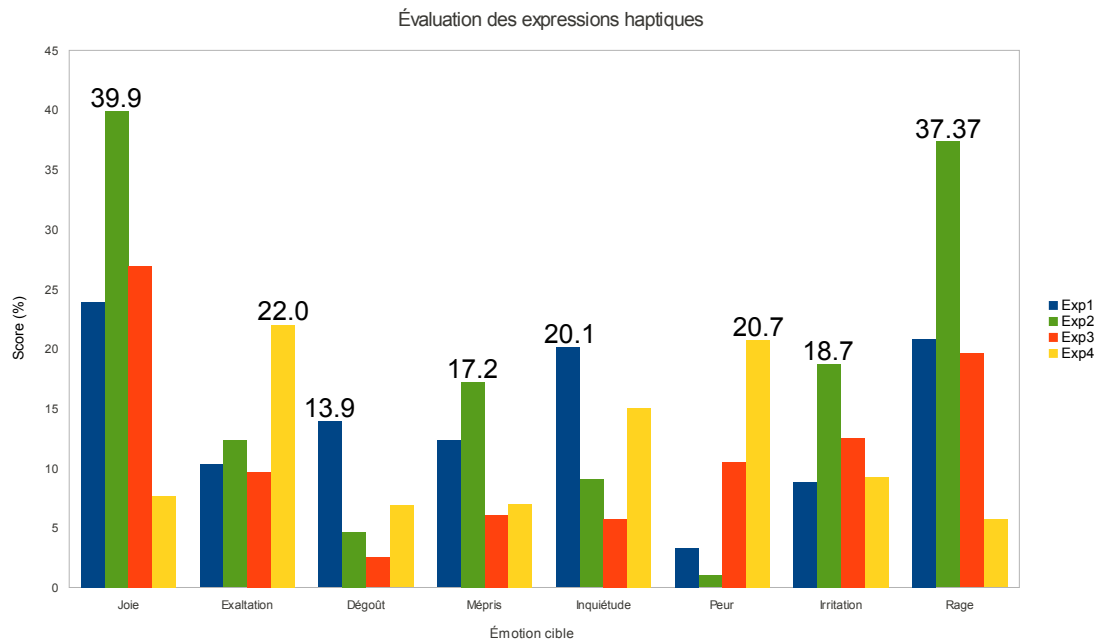


FIGURE 3.4: Valeur de $score_3$ pour chacune des expressions de l'étude. La figure reporte (en %) le score le plus élevé pour chacune des émotions.

Paramètre	Joie	Exa	Dég	Mép	Inq	Peur	Irr	Rage
Durée (s)	5.5	3.0	5.75	6.25	6.0	6.5	6.0	5.1
Distance (m)	1.6	1.7	0.35	0.0015	0.98	1.2	0.36	3.1
Vitesse moyenne ($m.s^{-1}$)	0.30	0.24	0.062	$2.5e^{-4}$	0.17	0.20	0.061	0.62
Aspect saccadé ($m.s^{-2}$)	3.1	3.2	2.1	0.26	3.3	3.0	3.0	7.3
Indice d'expansion (m)	0.075	0.045	0.050	0.0014	0.065	0.038	0.012	0.052
Amplitude (m)	0.28	0.19	0.16	$6.0e^{-4}$	0.24	0.20	0.060	0.28
Axe majeur (axe X)	0.96	0.21	0.49	0.66	0.13	0.24	0.55	0.66
Axe majeur (axe Y)	0.23	0.85	0.73	0.73	0.75	0.96	0.24	0.11
Axe majeur (axe Z)	0.075	0.48	0.48	0.16	0.65	0.12	0.81	0.76
Poids Axe majeur	0.58	0.70	0.60	1.0	0.50	0.80	0.77	0.50
Poids snd Axe majeur	0.30	0.17	0.37	0.0010	0.28	0.13	0.13	0.31
Répétitions	2	7	2	2	2	0	3	6

TABLE 3.2: Paramètres des expressions sélectionnées.

3.5 Étude de la reconnaissance des émotions actées dans des expressions multimodales

Les deux dernières études ont mis en évidence les limites des expressions faciales issues d'un avatar virtuel pour discriminer certaines émotions sémantiquement proches et nous ont permis de sélectionner depuis notre corpus des expressions kinesthésiques pertinentes pour discriminer ces mêmes émotions.

En reprenant ces expressions faciales et kinesthésiques, l'objectif de cette étude est d'améliorer la reconnaissance des émotions par le couplage expressions faciales/kinesthésiques.

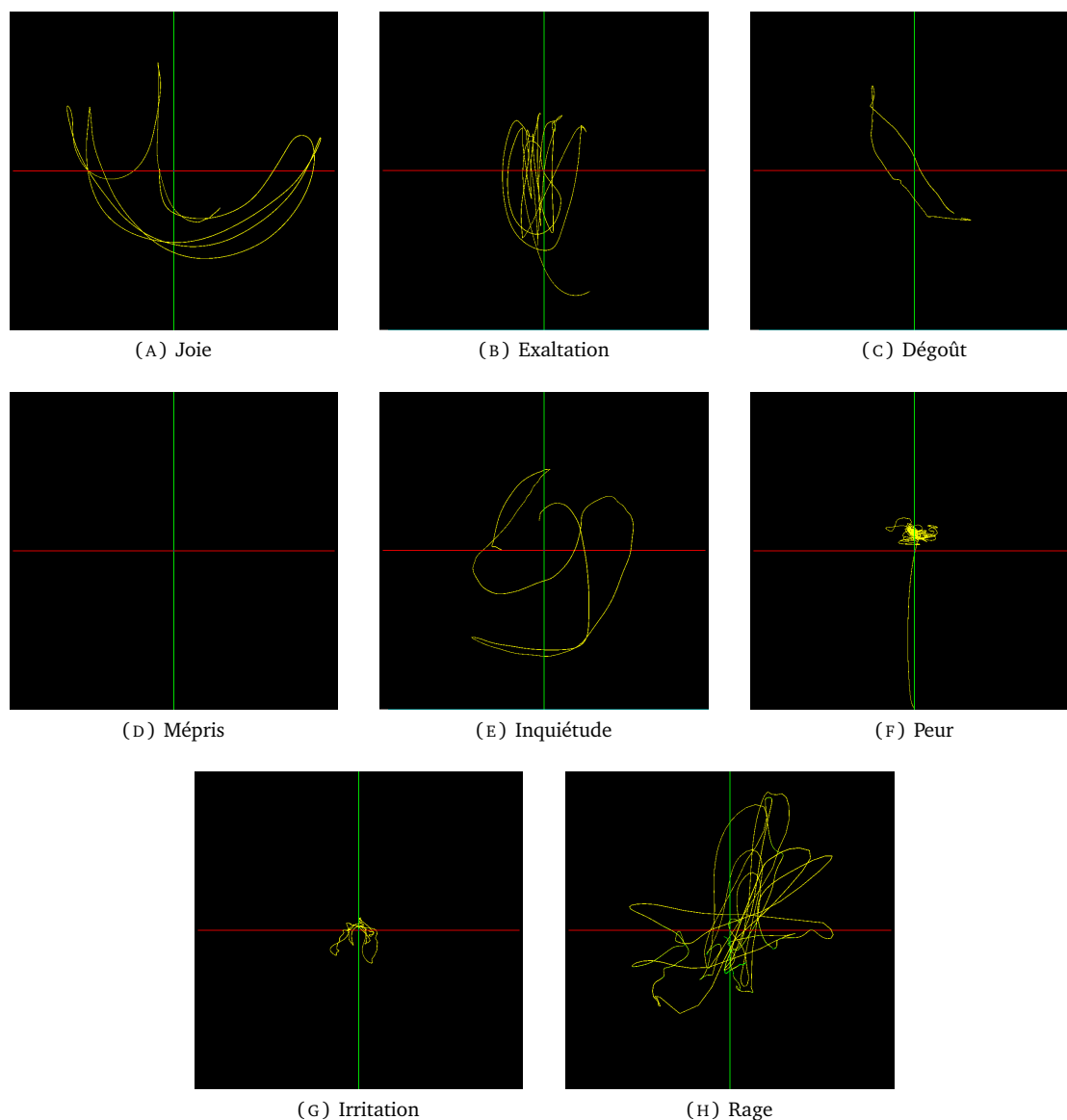


FIGURE 3.5 : Expression kinesthésique ayant le plus haut score pour chaque émotion exprimée, représentée dans le plan $X \circ Y$. Dans le cas du mépris, l'expression retenue correspondait à une absence totale de mouvement.

Nous étudierons également l'impact de ce couplage sur d'autres facteurs plus subjectifs, comme la sensation de présence ou l'expressivité perçue du rendu.

Dans la suite, le terme expression multimodale d'une émotion se réfèrera aux expressions faciales et kinesthésiques de cette émotion présentées simultanément au sujet.

3.5.1 Hypothèses

Hypothèses sur les taux de reconnaissance En considérant notre objectif d'améliorer les taux de reconnaissance des émotions étudiées par le couplage des expressions faciales et kinesthésiques, nous posons les deux hypothèses suivantes :

- H1** Les taux de reconnaissance sur l'ensemble des émotions sont meilleurs avec une expression multimodale qu'avec une expression faciale ou kinesthésique présentée seule.
- H2** Les taux de reconnaissance de chacune des émotions sont meilleurs avec une expression multimodale qu'avec une expression faciale ou kinesthésique présentée seule.

Hypothèses sur la perception des émotions En supposant que le couplage facial/kinesthésique améliore les taux de reconnaissance, nous admettons intrinsèquement que ce couplage modifie la perception de l'émotion par rapport aux expressions faciales ou kinesthésiques présentées seules. En considérant les études de la littérature comme celles de [Bickmore et al. \(2010\)](#), nous émettons l'hypothèse que les sujets évaluent les différentes dimensions PAD des émotions avec différentes modalités. Nous posons les trois hypothèses suivantes :

- H3** L'évaluation des dimensions de l'émotion lors du couplage faciale-kinesthésique tombe à l'intérieur des évaluations obtenues avec chacune des deux modalités (faciale ou kinesthésique) utilisée seule.
- H4** L'évaluation des différentes dimensions de l'émotion exprimée par le couplage faciale-kinesthésique favorise une des deux modalités d'expression. Cette hypothèse se fonde sur les travaux de [Bickmore et al. \(2010\)](#) :
 - H4-a** Avec une expression multimodale, les sujets perçoivent la dimension du plaisir selon ce qu'il perçoivent dans l'expression faciale.
 - H4-b** Avec une expression multimodale, les sujets perçoivent la dimension de l'activation selon ce qu'il perçoivent dans l'expression kinesthésique.

Hypothèses sur les ressentis subjectifs L'ajout de la modalité kinesthésique peut influencer d'autres facteurs que l'émotion perçue. Ces facteurs, plus subjectifs, sont la sensation de présence, l'expressivité perçue et la préférence de la modalité d'expression. Afin de tester l'influence du couplage de l'expression kinesthésique à l'expression faciale, nous posons les quatre hypothèses suivantes :

- H5** Les sujets trouvent que les expressions multimodales améliorent la sensation de présence par rapport aux expressions monomodales.
- H6** Les sujets trouvent les expressions multimodales plus expressives que les expressions monomodales.
- H7** Les sujets préfèrent les expressions multimodales aux expressions monomodales.
- H8** Les sujets trouvent le dispositif kinesthésique utile pour la perception ou la communication d'émotions.

3.5.2 Méthode expérimentale

3.5.2.1 Sujets

41 sujets, 27 ans d'âge moyen ($SD = 9$, $min = 20$, $max = 62$) ont participé à cette expérimentation. Nous n'analyserons pas les effets du genre, de la main dominante ou de l'éducation sur les résultats

à cause de la grande majorité des hommes (31), des droitiers (36) et de ceux ayant reçu une éducation européenne (23).

3.5.2.2 Plateforme expérimentale

La plateforme expérimentale utilisée combine les plateformes des deux études précédentes, qui rendaient respectivement des expressions faciales pour la première et kinesthésique pour la seconde.

Cette plateforme utilise deux ordinateurs selon une architecture client-serveur (voir figure 3.6). L'ordinateur client gère le déroulement de l'expérimentation. Il fait le lien entre les instructions affichées à l'écran pour les sujets, les entrées souris/clavier, gère l'affichage des expressions faciales issues de MARC et commande la restitution de données par le Geomagic Touch X. L'ordinateur serveur traite les requêtes envoyées par le client. Les données kinesthésiques sont stockées en local sur le serveur afin d'éviter de les charger depuis le client, la connexion entre les deux ordinateurs s'effectuant via une connexion UDP locale, avec un retard de 32 ms. Cette configuration assure une stabilité optimale pour le rendu haptique.

Lorsque le sujet appuie sur la touche espace du clavier, une expression (faciale, kinesthésique ou les deux simultanément) est restituée au bout de deux secondes. Ce délai correspond au temps que met le dispositif kinesthésique pour se positionner au point de départ de l'expression et permet de synchroniser les deux modalités.



FIGURE 3.6 : Plateforme expérimentale couplant expressions faciales et kinesthésiques.

3.5.2.3 Variables

Cette étude utilise deux types de variables. Premièrement, la modalité d'expression de l'émotion : faciale, kinesthésique ou les deux. Deuxièmement, les émotions perçues dans les expressions présentées. Ceci nous permettra de déterminer l'impact du couplage des expressions faciales et kinesthésiques sur la perception des émotions.

Variable indépendante Cette étude vise à étudier l'influence du type d'expression des émotions (faciale, kinesthésique ou les deux) sur les taux de reconnaissance et la perception des émotions. La modalité d'expression sera donc la variable indépendante **Vi1** de notre étude :

Expression faciale seule : seule une expression identifiée de l'étude 2.3 est présentée au sujet.

Expression kinesthésique seule : seule une expression kinesthésique identifiée de l'étude 2.3 est présentée au sujet.

Expression multimodale faciale-kinesthésique : deux expressions faciales et kinesthésiques congruentes sont présentées au sujet.

Chaque sujet passe séquentiellement chaque type d'expression. L'ordre est tiré aléatoirement pour chaque sujet afin d'éviter de favoriser une modalité par rapport à une autre en la présentant toujours après, conduisant à d'éventuels effets d'apprentissage.

Variables dépendantes Afin d'évaluer nos hypothèses, nous collectons les mesures subjectives suivantes.

Ms1 Émotion reconnue pour chaque expression. Le sujet peut cocher autant d'émotions qu'il le souhaite parmi la liste des huit émotions étudiées proposées. Cette étude visant à étudier les ambiguïtés de reconnaissance, pouvoir cocher plusieurs émotions pour le sujet est important.

Ms2 Évaluation PAD Valeurs de plaisir-activation-dominance perçu dans l'expression présentée. Le sujet report son évaluation via trois échelle de Likert à 5 points, une pour chaque axe : très négative à très positive pour la plaisir, très passive à très active pour l'activation, et pas du tout dominante à très dominante pour la dominance.

Ces deux mesures sont collectées pour chaque expression (faciale, kinesthésique ou multimodale) présentée au sujet.

Afin de mesurer l'intérêt de la multimodalité faciale-kinesthésique, nous collectons également certains aspects du ressenti du sujet. Le premier aspect concerne la sensation de présence, évaluée selon la méthode de [Tan et al. \(2011\)](#). Cette méthode propose quatre affirmations au sujet, auxquelles il doit répondre via une échelle de Likert à 5 points, allant de fortement en désaccord (note de 1) à fortement d'accord (note de 5). Ces affirmations sont proposées à trois reprises lors de l'expérimentation, une fois à la fin des présentations des expressions de chaque modalité.

Ms3-a Présence 1 J'ai ressenti la présence d'une autre personne que moi dans la pièce.

Ms3-b Présence 2 J'ai ressenti que l'autre personne était consciente de ma présence.

Ms3-c Présence 3 La pensée que l'autre personne n'était pas réelle m'a souvent traversée l'esprit.

Ms3-d Présence 4 La personne m'est apparue douée de sensations (consciente et vivante).

En plus de ces questions, le sujet évalue [Ms4 l'expressivité] du rendu. La version graphique montrée au sujet est illustrée en annexe A.6.

A la fin de l'expérimentation, nous collectons deux dernières évaluations. La première porte sur les préférences du sujet en terme de modalité d'expression. La seconde porte sur son avis sur le dispositif employé. Ces deux évaluations permettent d'évaluer l'intérêt d'une potentielle utilisation grand public d'outils de communication basées sur la stimulation kinesthésique.

Ms5 Préférence Quel mode de rendu avez-vous le plus préféré ? Le sujet choisit une seule réponse parmi ces trois :

- personnage virtuel seul
- retour d'effort seul
- personnage avec retour d'effort

Ms6 Utilité Pensez-vous le dispositif haptique utile pour la communication / perception d'émotions ? Le sujet choisit entre oui et non.

3.5.2.4 Procédure expérimentale

Présentation de l'expérimentation au sujet. Au début de l'expérimentation, le sujet s'assoit sur la chaise. Il remplit sur l'ordinateur un court questionnaire demandant son âge, genre, main dominante, s'il a déjà utilisé un bras haptique et son éducation culturelle (voir annexe A.1 pour les détails du questionnaire). Il existe en effet des différences entre genres et cultures pouvant influencer sur les résultats (Nguyen et al. (1975); Masuda et al. (2008)), bien que nous ne les aborderons pas ici. L'expérimentateur positionne ensuite le Geomagic Touch X en face de la main dominante du sujet. L'interface graphique fournit des explications textuelles au sujet du déroulement de l'expérimentation. Le Geomagic Touch X est présenté au sujet auquel la façon de le tenir est précisée (comme lors d'une poignée de main, voir la figure 2.3) du chapitre précédent. Afin de motiver les sujets à répondre au mieux, ils sont informés qu'ils verront leur propre score en fin d'expérience.

Entraînement. Au début de l'entraînement, la même feuille que celle décrite dans l'expérimentation précédente est remise au sujet (voir figure 3.3). Cette feuille indique le nom de chaque émotion possible, à laquelle suit la proposition d'un scénario où cette émotion peut survenir. Ces scénarios sont inspirés de ceux de Bänziger et al. (2012); Golan et al. (2006) et sont les mêmes que ceux de l'expérimentation du chapitre précédent. Ceci permet au sujet de mieux appréhender les différences subtiles entre les émotions proches Wallbott (1998). Cette feuille propose aussi des noms d'émotions associés à chaque extrémité de l'espace PAD. Ceci permet au sujet de mieux comprendre ce que représente chacune des dimensions du PAD.

Durant l'entraînement (répété au début de chaque modalité d'expression), le sujet apprend à utiliser l'interface graphique de l'expérimentation, permettant de présenter les expressions et les noter. Lorsque le sujet appuie sur un bouton, une expression lui est restituée. Le sujet ne peut jouer qu'une seule fois chaque expression, et l'application bascule automatiquement sur le formulaire de réponse lorsqu'une expression est jouée. Le formulaire de réponse est illustré en annexe A.4 et permet au sujet de reporter Ms1 et Ms2.

Complétion et fin de l'expérimentation. A la fin de l'entraînement, l'expérimentateur sort de la salle pour ne pas influencer le sujet. L'ordre de présentation des différentes modalités d'expressions est aléatoire. Au cours de la présentation des expressions d'une modalité donnée, les expressions des huit émotions sont présentées dans un ordre aléatoire et évaluées séquentiellement par le sujet. Une fois que le sujet a évalué les huit expressions pour une modalité, il répond aux questions relatives à l'expressivité et la sensation de présence (voir figure annexe A.6). A la fin de l'expérimentation, le sujet répond aux questions portant sur ses préférences personnelles, présentées en annexe A.7.

Une fois l'expérimentation terminée, le sujet peut voir ses scores de reconnaissance et un message remercie le sujet de sa participation.



FIGURE 3.7: Procédure expérimentale pour l'évaluation de la reconnaissance et de la perception d'expressions multimodales d'émotions.

3.5.3 Résultats et Analyses

3.5.3.1 Reconnaissance des émotions

Pour chacun des types d'expression (faciale, kinesthésique, ou les deux simultanées), nous calculons les taux de reconnaissances des émotions en se basant sur Ms1. Nous utilisons pour ce taux la formule suivante :

$$reco_{exp}(s, e) = \begin{cases} \frac{1}{\sum_e reco_{exp}(s, e)} & \text{si le sujet } s \text{ a reconnue l'émotion } e \text{ dans l'expression } exp \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

Le dénominateur pénalise les expressions dans lesquelles plusieurs émotions sont reconnues. Ces expressions ne permettent pas de discriminer entre plusieurs émotions.

Taux de reconnaissance des émotions selon la modalité d'expression Ce paragraphe traite de l'influence de notre variable indépendance Vi1, la modalité d'expression, sur les taux de reconnaissances corrects des émotions. Les taux de reconnaissances de l'ensemble des émotions étudiées ont été mixés et classés selon la modalité d'expression. La figure 3.8 montre les résultats pour les trois modalités. Ces résultats ne suivant pas une loi normale, nous avons utilisé un test des rangs signés de Wilcoxon afin d'étudier l'influence de la modalité sur le taux de reconnaissance.

Ce test a mis en évidence de meilleurs taux de reconnaissance pour l'expression multimodale des émotions (60 %) par rapport à ceux de l'expression faciale (49 %, $p \ll 0.01$, $V = 96$) et kinesthésique (39 %, $p \ll 0.01$, $V = 74.5$). Par ailleurs, l'expression faciale semble plus efficace que la modalité kinesthésique ($p \ll 0.01$, $V = 552$). Ces résultats valident donc notre hypothèse H1.

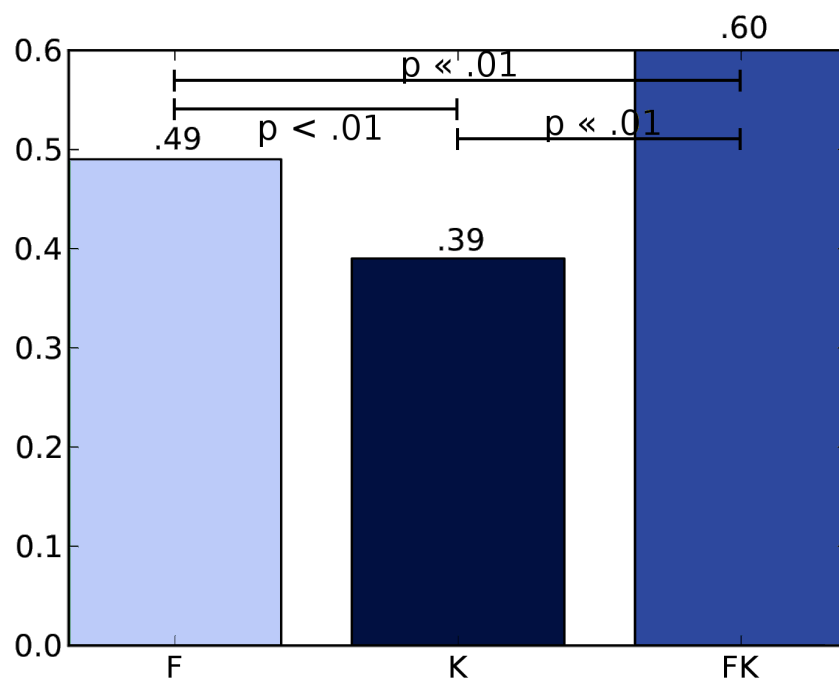


FIGURE 3.8 : Taux de reconnaissance des émotions selon la modalité d'expression. L'expression multimodale (FK) présente les meilleurs résultats, suivie de l'expression faciale (F) puis l'expression kinesthésique (K).

Taux de reconnaissance selon les émotions Cette section traite des taux de reconnaissance pour chaque émotion selon le type d'expression : faciale ou kinesthésique. Un test de Friedman a révélé une influence de la modalité d'expression sur les taux de reconnaissance ($p = 0.028$, $\chi^2 = 7.16$, $df = 2$). En étudiant chaque émotion séparément, nous pouvons distinguer trois cas (voir figure 3.9) :

Les taux de reconnaissance sont similaires entre l'expression faciale et l'expression kinesthésique. Ceci concerne les émotions de joie, mépris, inquiétude et irritation.

Les taux de reconnaissance sont supérieurs avec l'expression faciale qu'avec l'expression kinesthésique. Ceci concerne l'exaltation ($p \ll 0.01$, $V = 56$), la dégoût $p \ll 0.01$, $V = 22$ et la peur $p \ll 0.01$, $V = 31.5$. Aucune différence n'est observée pour entre les expressions faciale et faciale-kinesthésique. Dans ce cas, on peut déduire que la majorité de la reconnaissance s'effectue grâce à l'expression faciale.

Les taux de reconnaissance sont inférieurs avec l'expression faciale qu'avec l'expression kinesthésique. Ceci concerne la rage ($p \ll 0.01$, $V = 364$). Aucune différence n'est observée entre l'expression kinesthésique et le couplage faciale-kinesthésique. Dans ce cas, on peut déduire que la majorité de la reconnaissance s'effectue grâce à la l'expression kinesthésique.

Ces résultats infirment H2, qui supposaient que les taux de reconnaissance seraient améliorés avec des expressions multimodales. Cependant, les résultats ont montrés que les taux de reconnaissances en multimodale étaient similaires à ceux de la monomodalité présentant les taux de reconnaissances les plus élevés. Les deux modalités prennent donc bien part à l'évaluation. La section suivante des résultats cherche à expliquer comment chacune des modalités est intégrée pour l'évaluation de l'émotion dans le cadre d'un couplage expression faciale-kinesthésique.

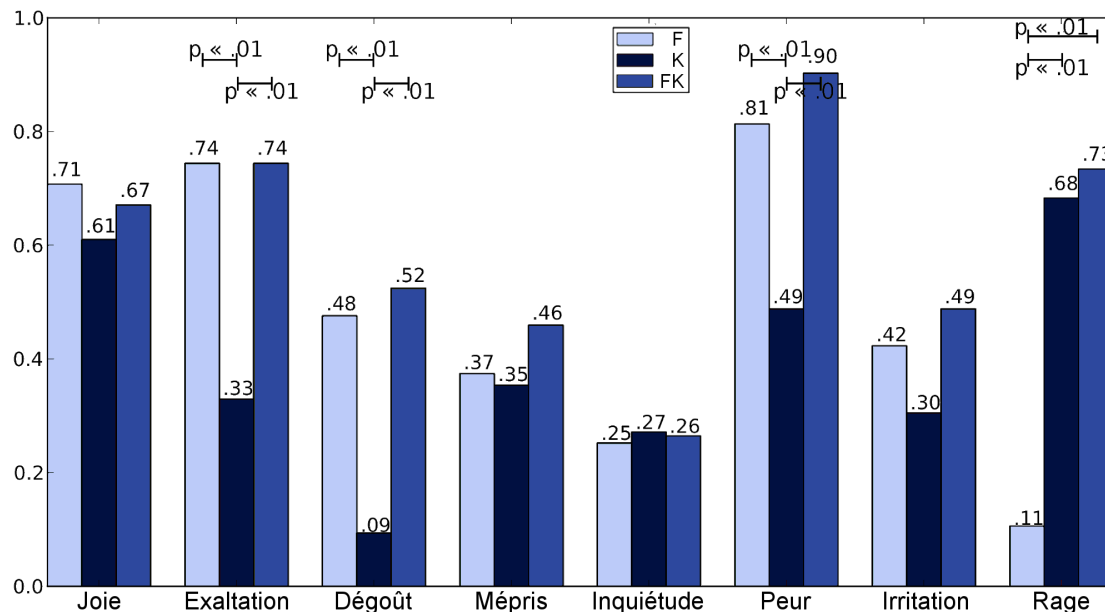


FIGURE 3.9 : Taux de reconnaissance par émotion. selon la modalité d'expression. La multimodalité affiche des taux de reconnaissances similaires à ceux de la modalité la plus efficace.

3.5.3.2 Analyse de la reconnaissance des émotions avec la modalité kinesthésique

Le chapitre précédent a déjà mis en avant les ressemblances dans l'expression des émotions entre notre étude et celle de [Bailenson et al. \(2007\)](#). Dans cette section, nous comparons les résultats en termes de reconnaissance des émotions. [Bailenson et al.](#) ont mené une étude similaire à celle que nous avons présentée ici pour la reconnaissance d'émotions dans des expressions kinesthésiques, avec quelques différences notables :

Dispositif de restitution utilisé. [Bailenson et al.](#) ont utilisé pour la restitution d'expressions kinesthésiques un Immersion Impulse Engine 2000, qui est un dispositif de restitution 2D.

Possibilité de cocher plusieurs émotions. Dans l'étude de Bailenson, les sujets ne pouvaient cocher qu'une seule émotion, alors que dans celle présentée ici ils pouvaient en cocher autant qu'ils le souhaitent. Cette différence est cependant à relativiser car les sujets ont en moyenne coché 1.12 émotions quand l'émotion était reconnue avec succès, suggérant peu de confusion avec les autres émotions.

Proximité des émotions étudiées. L'ensemble des émotions étudié ne sont pas les mêmes. De ce fait, des ambiguïtés entre certaines émotions peuvent être spécifiques à l'une des deux études.

En fonction de ces différences, nous nous arrêtons sur les taux de reconnaissances des trois émotions en commun aux deux études : joie, dégoût et peur.

Joie. Nous observons un score de reconnaissance moyen de 63 % pour la joie, contre 37.5 % pour Bailenson et al.. Les paramètres cinématiques des expressions collectés sont assez similaires, en particulier l'axe de la profondeur a été peu utilisé pour cette émotion, nous ramenant au cas d'une expression 2D. Une explication possible à cette différence pourrait être la confusion entre les joie et l'intérêt dans l'étude de Bailenson et al.. Ces émotions ont été par ailleurs exprimées sur le même axe dans son étude, tandis que la joie et l'exaltation utilisèrent des axes différents dans la notre.

Dégoût. Nous observons un score de reconnaissance moyen de 12 % pour le dégoût, contre 31.5 % pour Bailenson et al.. Les paramètres cinématiques des expressions collectés sont assez similaires. Dans notre étude, on observe cependant de la confusion entre le dégoût et le mépris, émotion absente de l'étude de Bailenson et al. (2007). En effet, dans le chapitre précédent en 2.3.3.1, nous n'avions pas trouvés de réelles différences dans les expressions de ces deux émotions.

Peur. Nous observons un score de reconnaissance moyen de 56 % pour la peur, contre 37.5 % pour Bailenson et al.. Les paramètres cinématiques des expressions collectés sont assez similaires. Dans l'étude de Bailenson, cette émotion a été confondue avec la tristesse et le dégoût. L'utilisation de la profondeur dans notre étude pour la peur pourrait expliquer ce résultat.

3.5.3.3 Perception des émotions

Comparaison entre monomodalité et multimodalité Le tableau 3.3 illustre le résultat de perception dans l'espace PAD des émotions dans chacune des expressions présentées aux sujets. La majorité des valeurs reportées avec des expressions multimodales présentent des scores intermédiaires entre celles des expressions faciales et celles des expressions kinesthésiques. Dans cette section, nous comparons les évaluations d'expressions multimodales à celles des expressions monomodales.

Les émotions étant évaluées par les sujets dans l'espace PAD, nous définissons la fonction de distance Euclidienne d'évaluation (*dist*) entre deux expressions, définies comme suit :

$$dist_e(Exp_1, Exp_2) = \sqrt{(Exp_{1P} - Exp_{2P})^2 + (Exp_{1A} - Exp_{2A})^2 + (Exp_{1D} - Exp_{2D})^2}$$

où e est une émotion donnée, Exp_{Fi} l'évaluation perceptive moyenne de cette émotion selon un type d'expression (faciale, kinesthésique ou multimodale). Nous pouvons ainsi définir :

- $dist_e(F/K)$ la distance entre la perception de l'émotion e dans l'espace PAD, selon qu'elle soit exprimée par une expression faciale ou kinesthésique.
- $dist_e(F/FK)$ la distance entre la perception de l'émotion e dans l'espace PAD, selon qu'elle soit exprimée par une expression faciale ou multimodale.
- $dist_e(K/K)$ la distance entre la perception de l'émotion e dans l'espace PAD, selon qu'elle soit exprimée par une expression kinesthésique ou multimodale.

La figure 3.10a illustre $dist_{Joie}(F/K)$, $dist_{Joie}(F/FK)$ et $dist_{Joie}(K/FK)$ dans l'espace PAD. La figure 3.10b illustre les distances calculées pour l'ensemble des émotions. Sur la base de ces distances, un test des rangs signés de Wilcoxon a été effectué pour comparer les distances $dist_e(F, K)$, $dist_e(F, FK)$ et $dist_e(K, FK)$ sur l'ensemble des émotions étudiées.

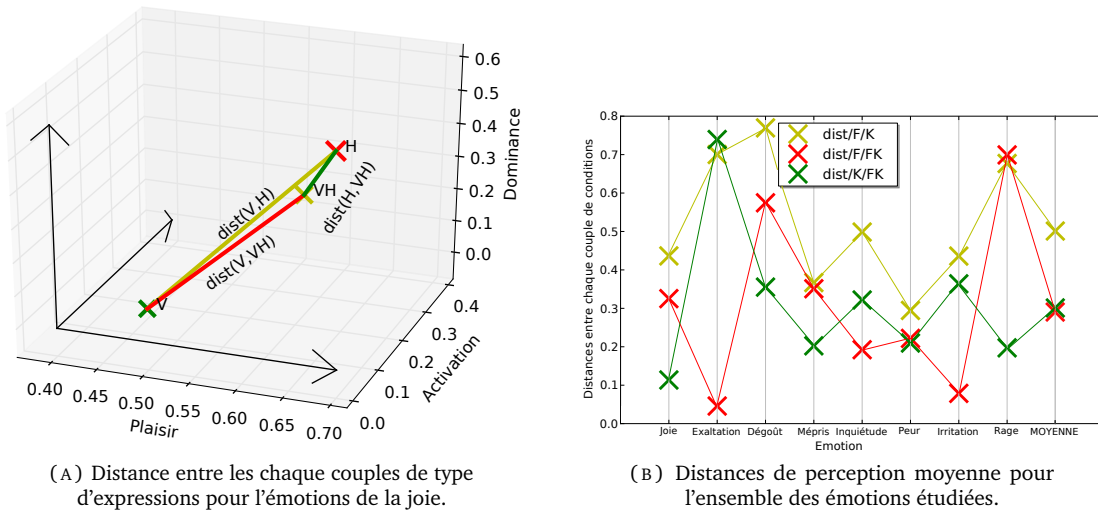


FIGURE 3.10: Distances entre les perceptions moyennes des émotions selon la modalité d'expression. La distance entre la perception en modalité faciale et en modalité kinesthésiques (courbes jaunes) est la plus importantes ($dist(F, K) = 0.50$ en moyenne, contre $dist(F, FK) = 0.30$ et $dist(K, FK) = 0.31$).

Afin de vérifier que les perceptions PAD des émotions exprimées de façon multimodales présentent des résultats intermédiaires par rapport à ceux obtenus avec des expressions monomodales, nous vérifions que les critères suivants, suffisants mais non nécessaires, sont satisfaits :

- $dist(F, K) \ll dist(F, FK)$
- $dist(F, K) \ll dist(K, FK)$
- $dist(F, FK) \simeq dist(K, FK)$

Ces critères suggèrent que les évaluations des expressions faciales et kinesthésiques apporte des perceptions différentes des émotions exprimées, tandis que les expressions faciales et kinesthésiques sont toutes les deux à distance similaires de la perception des expressions multimodales. Si ces trois critères sont vérifiés, nous pourrions en déduire que les valeurs de perception des émotions avec expressions multimodales tombent entre celles des expressions monomodales.

Les résultats du test des rangs signés de Wilcoxon montrent que sur l'ensemble des émotions nous observons :

Émotion	F _P	F _A	F _D	K _P	K _A	K _D	FK _P	FK _A	FK _D
Joie	.48	.04	.06	.62	.39	.28	.60	.29	.23
σ	.45	.56	.48	.44	.43	.46	.48	.49	.51
Exaltation	.79	.78	.57	.15	.56	.39	.83	.77	.59
σ	.44	.31	.51	.68	.39	.49	.41	.40	.52
Dégoût	-.65	.24	.25	-.28	-.28	-.18	-.62	-.19	-.13
σ	.39	.47	.47	.41	.53	.47	.38	.44	.54
Mépris	-.48	-.30	-.06	-.40	-.51	-.35	-.40	-.62	-.18
σ	.41	.50	.52	.43	.60	.63	.42	.53	.63
Inquiétude	-.55	-.17	-.10	-.16	.13	-.02	-.43	-.02	-.11
σ	.41	.55	.51	.46	.43	.48	.46	.49	.52
Peur	-.61	.43	-.32	-.49	.61	-.12	-.59	.65	-.30
σ	.51	.59	.69	.65	.55	.86	.57	.48	.85
Irritation	-.72	.30	.23	-.51	.26	-.15	-.66	.29	.18
σ	.38	.48	.51	.43	.35	.54	.50	.40	.54
Rage	-.68	.30	.13	-.65	.83	.55	-.80	.91	.45
σ	.38	.35	.53	.61	.26	.60	.53	.19	.69

TABLE 3.3 : Moyenne et écart-type des évaluations PAD par les sujets. Ces résultats sont calculés pour chaque émotion, type d'expression et dimension séparément. Les cellules grises des cases liées à aux expressions multimodales représentent les valeurs intermédiaires aux évaluations des émotions dans les expressions monomodales (71% des cas).

- Une différence significative entre $dist_e(F, K)$ et $dist_e(F, FK)$: $p = 0.0499$, $W = 51$.. Par ailleurs, la figure 3.10b montre que $dist_e(F, K)$ présente une valeur plus grande que $dist_e(F, FK)$ (respectivement 0.50 et 0.30).
- Une différence significative entre $dist_e(F, K)$ et $dist_e(K, FK)$: $p = 0.0499$, $W = 51$.. Par ailleurs, la figure 3.10b montre que $dist_e(F, K)$ présente une valeur plus grande que $dist_e(K, FK)$ (respectivement 0.50 et 0.31).
- Aucune différence significative entre $dist_e(F, FK)$ et $dist_e(K, FK)$ ($p = 0.72$, $W = 28$).

Ces trois critères sont statistiquement satisfaits. Par ailleurs, 71 % des évaluations PAD des expressions multimodales présentent des valeurs entre les deux des évaluations des expressions monomodales (seuil de hasard : 33 %). Ces résultats valident donc notre hypothèse H3.

Modalité dominante pour chaque dimension Cette section vise à déterminer, pour chaque émotion, quel indice (facial ou kinesthésique) les sujets ont utilisé pour évaluer les dimensions de l'émotion.

La table 3.4 montre pour chacune des émotions et des dimensions du PAD, s'il y a une différence entre l'évaluation monomodale (expression faciale ou kinesthésique) et l'évaluation multimodale.

Pour chaque émotion étudiée, nous définissons la dominance d'une modalité d'expression mod_i (faciale ou kinesthésique) sur la modalité $mod_{\bar{i}}$ complémentaire à mod_i pour une dimension d du PAD si :

- Il n'y pas de différence significative entre l'évaluation de la dimension d de l'émotion exprimée par la modalité mod_i et l'évaluation de cette même dimension avec une expression multimodale faciale-kinesthésique.

Emotion	F _P	K _P	F _A	K _A	F _D	K _D
Joie	-	-	0.043	-	-	-
Exaltation	-	«0.01	-	«0.01	-	-
Dégoût	-	«0.01	«0.01	-	«0.01	-
Mépris	-	-	«0.01	-	-	-
Inquiétude	-	«0.01	-	-	-	-
Peur	-	-	-	-	-	-
Irritation	-	0.046	-	-	-	0.01
Rage	«0.01	-	«0.01	-	«0.01	-

TABLE 3.4: Comparaison des perceptions monomodales faciales/kinesthésiques et faciales-kinesthésiques. La p -value obtenue par le test des rangs signés de Wilcoxon est indiquée en cas de différence significative. Lorsqu'une modalité est dominante pour une émotion sur une dimension, la case correspondante est grisée.

- Il y a une différence significative entre l'évaluation de la dimension d de l'émotion exprimée par la modalité mod_i et l'évaluation de cette même dimension avec une expression multimodale faciale-kinesthésique.

Lorsque ces deux conditions sont réunies, on peut conclure que l'évaluation attribuée dans l'expression multimodale de la dimension dépend davantage de cette modalité que de l'autre.

D'après Ms2, pour quatre émotions sur huit (exaltation, dégoût, inquiétude et irritation) la modalité faciale domine la modalité kinesthésique pour l'évaluation de la dimension du plaisir. Ce résultat est en accord avec H4-a. Pour quatre émotions sur huit (joie, dégoût, mépris, rage) la modalité kinesthésique domine la modalité faciale pour l'évaluation de la dimension de l'activation. Ce résultat est en accord avec H4-b. H4 est donc validée dans la moitié des cas, ce qui est une bonne tendance vu que deux conditions doivent être simultanément vérifiées pour qu'une modalité soit jugée dominante par rapport à l'autre pour une émotion donnée. Aucune modalité ne semble dominer l'autre modalité pour l'évaluation de la dimension de la dominance.

Relations entre taux de reconnaissance et dimensions La section précédente a montré que les sujets se basaient sur des modalités d'expressions différentes pour la perception de chaque dimension du PAD. Cette section discute de l'impact de ce choix implicite par les sujets (expression faciale pour le plaisir, kinesthésique pour l'activation) sur les taux de reconnaissance des émotions.

La figure 3.11a montre les taux de reconnaissance obtenus à partir de Ms1 avec des expressions faciales en fonction de la magnitude du plaisir. De façon similaire, la figure 3.11b montre les taux de reconnaissance avec des expressions kinesthésiques en fonction de la magnitude de l'activation.

Un test de corrélation de Spearman révèle une bonne corrélation entre le taux de reconnaissances obtenus avec les expressions faciales et la magnitude du plaisir ($p = 0.046$, $\rho = 0.74$). De façon similaire, ce test révèle une bonne corrélation tendancielle entre le taux de reconnaissances obtenus avec les expressions kinesthésiques et la magnitude de l'activation ($p = 0.062$, $\rho = 0.68$). Ainsi, les taux de reconnaissance semblent être liés à la magnitude d'une dimension du PAD (plaisir pour l'expression faciale, activation pour l'expression haptique). Aucune corrélation n'a été trouvée pour la dimension de la dominance.

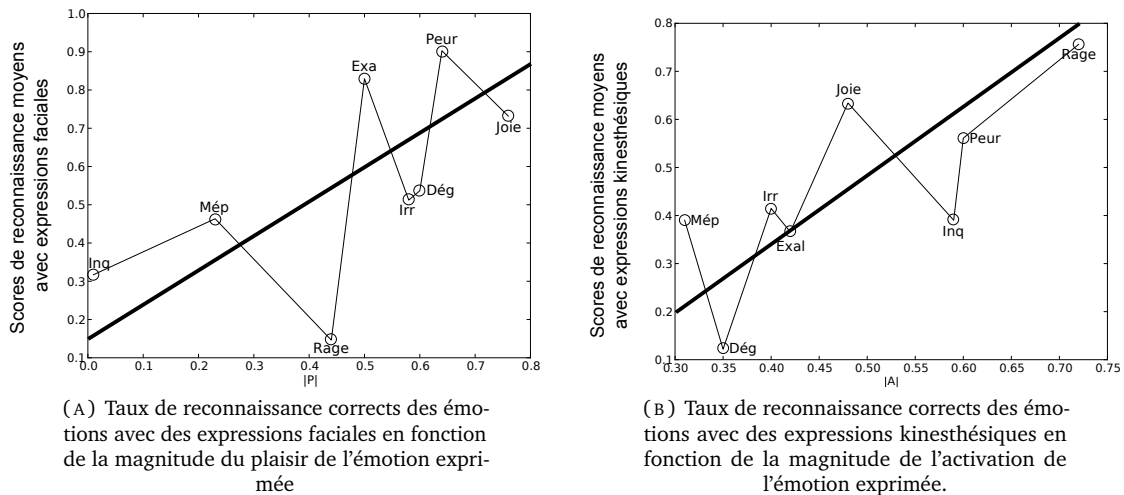


FIGURE 3.11 : Taux de reconnaissance en fonction des dimensions des émotions.

3.5.3.4 Analyse de la perception des expressions faciales et kinesthésiques

Les résultats sur la perception des émotions dans les différents types d'expressions ont montré que les expressions multimodales recevaient des scores de perception PAD qui tombent à l'intérieur de ceux des expressions faciales et ceux des expressions kinesthésiques (hypothèse H4). Ce résultat suggère que lorsqu'une expression faciale d'une émotion donnée reçoit une certaine évaluation PAD, et qu'une expression kinesthésique de la même émotion reçoit une autre évaluation, alors le couplage des deux reçoit une évaluation située entre les deux. Ceci suggère que l'expression faciale-kinesthésique peut changer la perception de l'émotion par rapport aux deux expressions faciales et kinesthésiques présentées seules.

Plus précisément, la validation de l'hypothèse H5 montre que les sujets exploitent différemment les deux modalités étudiées. Afin d'évaluer la dimension du plaisir, les sujets se basent davantage sur l'expression faciale, tandis que pour évaluer l'activation ils se basent plutôt sur l'expression kinesthésique. Ces résultats sont en accord avec les travaux de [Bickmore et al. \(2010\)](#) et suggèrent que les sujets ont intégré simultanément, mais différemment, les indices provenant des expressions faciales et kinesthésiques. Ces résultats ont également été observés pour d'autres modalités : [Masuda et al. \(2008\)](#) montrèrent que les utilisateurs utilisent des indices différents pour percevoir des émotions dans des expressions faciales ou orales. L'étude de [Bickmore et al.](#) et la notre suggèrent donc que la modalité kinesthésique est également prise en compte pour évaluer les émotions exprimées.

Le dernier résultat mis en évidence section 3.5.3.3) montre un lien entre les taux de reconnaissance avec les expressions faciales et l'amplitude du plaisir. De façon similaire, on observe un lien entre les taux de reconnaissance avec les expressions kinesthésique et l'amplitude de l'activation. Ainsi, la modalité kinesthésique pourrait se montrer efficace pour discriminer des expressions de plaisir proche, mais d'amplitude différentes.

3.5.3.5 Résultats subjectifs

Cette section présente les résultats des ressentis subjectifs des sujets, illustrés en figure 3.12.

Sensation de présence Un test des rangs signés de Wilcoxon n'a montré aucune différence de la condition pour les mesures Ms3-b et Ms3-d. Ceci n'est pas surprenant dans notre cas, car ces questions concernent le fait que le sujet sentait que l'autre personne était consciente et réagissait à ses actions. Or, les expressions étaient prédéfinies et ne pouvaient réagir au sujet.

Concernant Ms3-a la sensation de présence d'une autre personne, la note reportée par les sujets était significativement plus élevée pour des expressions multimodales (2.6) que faciales (1.73) ou kinesthésiques (2.17) ($p \ll 0.05$). Par ailleurs, les expressions kinesthésiques seules reçurent un score plus élevé que les expressions faciales seules ($p \ll 0.05$). Ceci suggère que le contact et l'aspect dynamique des expressions kinesthésiques ont augmenté la sensation de présence.

Concernant Ms3-c la pensée que l'autre personne n'était pas réelle, les sujets ont moins souvent reporté cette sensation avec des expressions kinesthésiques que faciales (respectivement 1.73 et 2.17, $p \ll 0.05$). Aucune différence significative n'a été mise en évidence pour la multimodalité. Ceci suggère que le contact physique améliore le réalisme, tandis que les expressions faciales statiques le diminue.

Les résultats de ces quatre mesures subjectives valident donc notre hypothèse H5.

Expressivité Concernant Ms4, la note reportée par les sujets était significativement plus élevée pour des expressions multimodales (4.34) que faciales (3.93) ou kinesthésiques (2.19) ($p \ll 0.05$). Par ailleurs, les expressions faciales seules reçurent un score plus élevé que les expressions kinesthésiques seules ($p \ll 0.01$). Ce résultat valide donc notre hypothèse H6.

Préférence Les sujets ont reporté pour Ms5 préférer les expressions multimodales aux expressions monomodales ($p \ll 0.01$, faciale-kinesthésique : 73%, kinesthésique : 15%, faciale : 12%). Ce résultat valide donc notre hypothèse H7.

Utilité du dispositif 95% des sujets ont reporté pour Ms5 avoir trouvé le dispositif utile et adapté à la communication des émotions. Ce résultat valide donc notre hypothèse H8.

3.6 Conclusion

3.6.1 Résumé des travaux

Les études de ce chapitre avaient pour objectif d'étudier la perception d'expressions faciales-kinesthésiques exprimant des émotions proches. Nous avons commencé par mettre en avant la présence d'ambiguïtés dans les expressions faciales que nous avons réalisées à l'aide du framework MARC. Dans un deuxième temps, nous avons repris le corpus d'expressions kinesthésiques

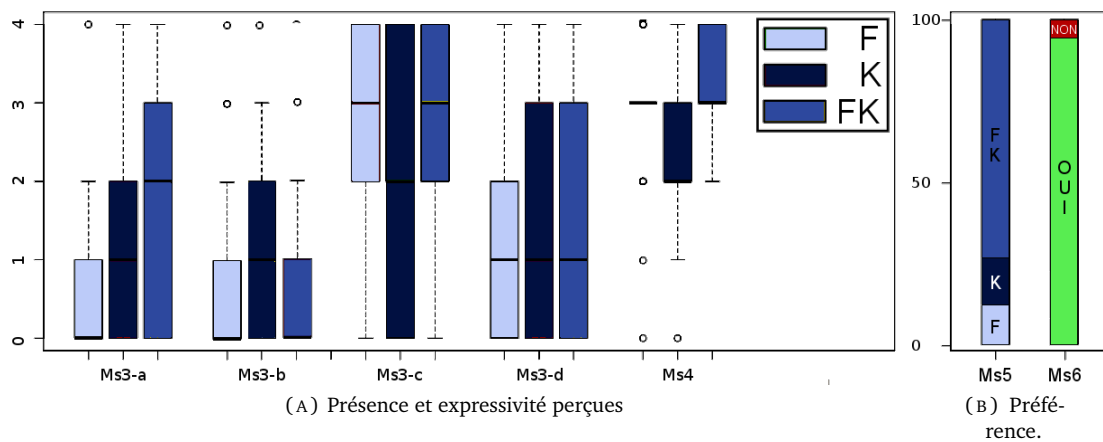


FIGURE 3.12: Avis subjectifs sur le couplage facial-kinesthésique. Les sujets ont reporté une plus grande sensation présence dans le cas des expressions multimodales. Ils ont aussi préféré et trouvé l'expression multimodale plus expressive.

collecté au chapitre précédent afin de sélectionner une expression permettant de communiquer le plus efficacement possible chacune des émotions étudiées. Cette approche de sélection incluait une analyse statistique ainsi qu'une étude perceptive. Les expressions de ces deux études ont été reprises afin de mener une troisième étude portant sur la reconnaissance et la perception multimodale des émotions.

Cette dernière étude a montré que les expressions multimodales faciales-kinesthésiques reçoivent une perception intermédiaire pour les sujets à celles des expressions monomodales. Les sujets tendent à intégrer les deux modalités pour percevoir et reconnaître une émotion. Les deux modalités semblent pourtant jouer un rôle différent dans la perception des émotions, l'expression faciale (respectivement kinesthésique) étant principalement utilisée pour évaluer la dimension du plaisir (respectivement de l'activation) de l'émotion. Les taux de reconnaissances sont également impactés par la modalité utilisée et les émotions exprimées. La multimodalité semble enfin apporter des avantages subjectifs, comme une sensation de présence et une expressivité perçues plus importantes.

3.6.2 Synthèse et perspectives

Ce chapitre a permis de mieux comprendre les critères sur lesquels les utilisateurs se basent pour percevoir et reconnaître des émotions. Ces résultats devraient permettre une meilleure intégration de la modalité kinesthésique dans la communication Interaction Homme-Machine (IHM) des émotions.

Cependant, bien que les expressions multimodales présentées étaient congruentes, les corpus dont elles provenaient étaient de sources différentes (expressions d'acteurs modélisées en 3D pour les expressions faciales, expressions de notre propre corpus pour les expressions kinesthésiques). Ceci a pu limiter l'efficacité de la reconnaissance de certaines émotions exprimées de manière multimodale.

La plus importante limitation de nos travaux, ainsi que ceux de la grande majorité des études, est le fait que nous avons travaillé sur des expressions d'émotions actées. Celles-ci ne sont pas forcément représentatives de celles provenant d'émotions à caractère plus spontané. Le prochain chapitre visera à déterminer la possibilité d'exprimer et de percevoir un état affectif spontané par la modalité kinesthésique dans un contexte IHM.

EXPRESSION ET PERCEPTION KINESTHÉSIQUE D'UN STRESS SPONTANÉ

Sommaire

4.1	Introduction	95
4.2	Contexte de l'étude et objectifs	95
4.2.1	Travaux existants	95
4.2.2	Objectifs	97
4.3	Étude de protocoles pour la collecte d'expressions kinesthésiques d'états affectifs spontanés	98
4.3.1	Contraintes de la modalité haptique	98
4.3.2	Exploration de protocoles expérimentaux	99
4.3.3	Tâche sélectionnée : conduite	104
4.4	Étude de l'expression haptique d'un état de stress spontané	105
4.4.1	Hypothèses	105
4.4.2	Méthode expérimentale	106
4.4.3	Résultats	111
4.4.4	Analyse et Discussion	113
4.5	Étude de la perception haptique de la composante cinématique d'expressions de stress	115
4.5.1	Hypothèses	115
4.5.2	Méthode expérimentale	116
4.5.3	Résultats	119
4.5.4	Analyse et Discussion	120
4.6	Étude de la perception haptique de la composante en intensité de force d'expressions de stress	121
4.6.1	Hypothèses	121
4.6.2	Méthode expérimentale	121
4.6.3	Résultats	124
4.6.4	Analyse et Discussion	126
4.7	Conclusion	126

4.7.1	Résumé des travaux	126
4.7.2	Synthèse et perspectives	126

4.1 Introduction

Les chapitres précédents ont mis en évidence l'efficacité de la modalité kinesthésique pour communiquer certaines émotions actées, c'est à dire jouées par des individus. Des études portant sur d'autres modalités ont montré des différences notables dans l'expression et la perception d'affects, selon que ces affects soient actés ou davantage spontanés. Dans ce dernier chapitre, nous étudierons l'expression et la perception kinesthésique d'un état affectif naturel et spontané.

De récents travaux suggèrent aujourd'hui que certains états affectifs s'expriment spontanément par la modalité kinesthésique. Cependant, la perception kinesthésique de ces états spontanés par des humains reste inexplorée. Ce dernier chapitre sera pour nous l'occasion d'ouvrir la voie à la communication haptique en Interaction Homme-Machine (IHM) d'affects spontanés. Nous aborderons en particulier dans ce chapitre la communication du stress par la modalité kinesthésique.

Bien que le stress ne soit pas une émotion mais un affect, son étude est pertinente dans le cadre de nos travaux. Il peut en effet être le support de différentes émotions, dont l'irritation et l'anxiété, des états intériorisés pouvant être difficiles à percevoir avec d'autres modalités [Cosnier \(2006\)](#). Il apparaît de façon courante dans notre vie, par exemple pendant un examen, un entretien ou une prise de parole. A forte dose, le stress peut avoir de graves conséquences sur l'individu comme la dépression ou des maladies cardiovasculaires [McEwen et Seeman \(2003\)](#). Pouvoir le détecter serait donc intéressant. Ce chapitre vise donc à 1. caractériser l'expression kinesthésique du stress et 2. en étudier la perception par des utilisateurs réels.

Ce chapitre s'organise de la façon suivante. La section suivante décrit les travaux récents concernant l'étude de l'expression haptique du stress. La section 4.3 présentera différentes contraintes que nous avons mis en évidence pour collecter des expressions haptiques issues d'un affect spontané. Cette collecte sera ensuite présentée section 4.4, servant de support à l'étude de l'expression kinesthésique du stress. Les sections 4.5 et 4.6 présentent nos études sur la perception par des humains d'un état de stress spontané exprimée par la modalité kinesthésique. Enfin, la section 4.7 conclura ce dernier chapitre.

4.2 Contexte de l'étude et objectifs

4.2.1 Travaux existants

4.2.1.1 Définition et mesure de l'état de stress

[Lazarus et Folkman \(1984\)](#) définissent le stress comme une relation particulière entre la personne et son environnement, lorsque l'individu évalue l'environnement comme dépassant son potentiel

d'action, avec conséquences potentiellement négatives pour son bien-être. Dans leur livre, [McIlveen et Gross \(1996\)](#) rappelle que le stress implique un ensemble de réponses psychologiques et physiologiques apparaissant dans des situations dans lesquelles l'individu pourrait ne pas pouvoir faire face.

Nous avons vu dans la section 1.2.4 qu'il existait trois grands types de mesures d'un état affectif : subjectif, comportemental et physiologique. Le stress en tant qu'affect possède ainsi un ensemble de caractéristiques pouvant être observées. Il peut être favorisé par une tendance à l'anxiété, le State-Trait Anxiety Inventory (STAI) proposé par [Spielberger \(1983\)](#) est parfois utilisé pour évaluer le niveau d'anxiété général ou ponctuel d'un individu en étudiant ses réponses à un ensemble de questions spécifiques, comme par exemple « Je m'inquiète à propos de choses sans importance ». Ce test utilise des échelles de Likert à 4 points pour l'évaluation de chaque proposition.

Certains questionnaires ont été conçu pour mesurer l'état de stress d'un individu, c'est le cas de la Echelle de mesure du stress perçu (PSS) proposé par [Cohen et al. \(1983\)](#). Cette échelle évalue le stress général de l'individu en se basant sur un ensemble de questions, comme « Au cours du dernier mois, combien de fois avez vous trouvé que vous ne pouvez pas gérer tout ce que vous avez à faire ? ». Ce test utilise des échelles de Likert à 5 points pour l'évaluation de chaque question.

Le stress peut également s'observer de façon comportementale. [Heuer et al. \(2007\)](#); [Roelofs et al. \(2009\)](#) ont comparé chez des sujets atteint d'anxiété sociale la tendance à adopter un comportement d'approche ou d'évitement, c'est à dire à s'avancer ou à se reculer, lorsqu'on les soumettaient à une expérimentation sociale stressante. Ces études ont mis en évidence une tendance des sujets à adopter un comportement d'évitement lors de cette tâche.

Du point de vue physiologique, [Lazarus et al. \(1963\)](#) ont montré une tendance sous stress à l'élévation du rythme cardiaque et la sécrétion de sueur. Cette sécrétion peut s'observer expérimentalement en mesurant la conductance électrique de la peau, aussi nommée conductance électrodermale.

4.2.1.2 Expression haptique du stress

L'étude bibliographique présenté au chapitre 1 a mis en évidence que l'étude de l'expression d'affects par la modalité haptique est récente. Le stress ne fait pas exception à cette règle. [Zhang et Cai \(2008\)](#) ont suivi pendant plusieurs mois deux populations de rats, une ayant reçu des stimulations tactiles journalières, l'autre aucune. A l'âge de trois mois, les rats ayant reçu des stimulations montraient globalement moins de stress. [Chung et al. \(2009\)](#) ont proposé un dispositif permettant de stimuler à distance une personne via le toucher pour réduire son niveau de stress.

Il faudra attendre les travaux de [Qi et al. \(2001\)](#) qui ont été les premiers à caractériser l'expression haptique d'une émotion exprimée spontanément (la frustration). Ils ont induit une émotion la frustration chez des sujets en leur faisant remplir un long formulaire à l'aide d'une souris d'ordinateur. A la fin du remplissage, le système indique au sujet qu'il a mal rempli un des champs et efface toutes ses réponses, l'obligeant à recommencer. Après cet épisode frustrant, [Qi et al.](#) ont relevé une augmentation de la pression par les sujets sur le bouton de la souris.

Yamauchi (2013) a étudié des changements de comportement cinématiques liés à un état d'anxiété en observant les mouvements de souris effectués par des sujets. Il montra qu'en cas d'anxiété, les sujets avaient tendance à dévier du chemin optimal pour la complétion de la tâche et effectuaient des mouvements irréguliers. Des différences furent également reportées entre les genres. Notons que ces deux derniers états affectifs (frustration et anxiété) peuvent être produites lors d'un état de stress.

Des études plus récentes dans le domaine de l'haptique s'intéressent spécifiquement à l'expression haptique du stress. Sun et al. (2014) ont tenté de caractériser l'expression haptique du stress avec des paramètres cinématiques. Il utilisa pour se faire différentes tâches réalisées à l'aide d'une souris : pointage, glisser/déposer et évitement d'obstacles. Hernandez et al. (2014) ont proposé d'étudier l'influence du stress sur l'utilisation de clavier et souris dans le but de pouvoir détecter le stress en condition normale d'utilisation d'un ordinateur. Ils observent que lors d'un épisode de stress, les sujets ont tendance à exercer des pressions sur le clavier plus importantes, ainsi qu'un contact plus important entre la paume de la main et de la souris. Ils combinent questionnaires subjectifs et mesure de la conductance électrodermale afin d'évaluer le niveau du stress des sujets.

4.2.2 Objectifs

Il existe à ce jour peu d'études portant sur la collecte d'expressions haptiques issues d'un état affectif spontané. Les travaux présentés ci-dessus étudient des expressions haptiques d'un état de stress spontané. Cependant, ils se focalisent soit sur la description de paramètres gestuels, soit sur celle des forces exercées, afin de caractériser l'expression du stress. Ces travaux n'étudient pas ces deux aspects de la modalité haptique simultanément.

Il n'existe par ailleurs d'études sur la perception en IHM d'expressions haptiques issues d'un affect spontané. Ce manque d'études est limitant car si des changements de comportement haptique ont pu être observés de façon statistique au cours d'affects spontanés, nous ignorons si ces changements sont perceptibles par des sujets.

Ce chapitre adresse le problème de l'expression et de la perception d'un état de stress spontané. Dans un premier temps, nous mettrons en évidence les contraintes sociales et technologiques liées à la modalité haptique. Dans un second temps, nous étudierons les avantages et limites de différents protocoles de tests que nous avons proposés. Nous proposerons ensuite un protocole efficace pour collecter des expressions haptiques issues d'un état affectif spontané. Ces expressions seront statiquement analysées, puis soumis à un test perceptif afin de déterminer si l'expression d'un stress spontané peut être perçu par des humains.

Les résultats nous permettront de mieux appréhender la communication d'un état affectif spontané par la modalité kinesthésique.

4.3 Étude de protocoles pour la collecte d'expressions kinesthésiques d'états affectifs spontanés

Comme présenté dans l'étude bibliographique du chapitre 1 section 1.2.3, les émotions peuvent être induites en laboratoire par diverses techniques afin d'étudier leur expression. Ces travaux sont généralement focalisés sur une modalité d'expression, comme l'expression faciale ou orale (Motley et Camden (1988); Vogt et André (2005)). Cependant, la modalité haptique soulève des contraintes qui lui sont propres.

Cette section présente une étude visant à élaborer un protocole permettant de collecter des expressions haptiques d'un affect spontané. Après avoir présenté les contraintes sociales et technologiques majeures, nous élaborerons divers protocoles de tests nécessitant une interaction haptique. Ces protocoles incluent une induction d'affect et visent à mettre en évidence des lignes directrices pour la conception d'un protocole final efficace, présenté en fin de section.

4.3.1 Contraintes de la modalité haptique

4.3.1.1 Aspect intime du toucher

Parmi les trois sens les plus utilisés pour communiquer des émotions (visuel, auditif et toucher), seul le toucher implique un contact physique pour être perçu. Cependant, dans certains contextes de communication (certaines cultures, status sociaux ou genres différents), le contact physique peut-être considéré comme un manque de respect ou inapproprié (Coeman (2010)). Ces contextes ne sont pas favorables à la communication des émotions par le toucher.

Par ailleurs et pour certaines modalités, l'expression d'une émotion est difficilement refoulée. Par exemple, Ekman (2009) démontra l'existence d'expressions faciales rapides et inconscientes observables dans le visage d'un individu lorsqu'il éprouve certaines émotions. Du fait de leur rapidité, il est très difficile de d'inhiber consciemment ces réactions. L'expression par le toucher est différente. Ce contact physique peut facilement être inhibé s'il est jugé non approprié, ce qui est un frein à l'étude de la communication affective par le toucher.

4.3.1.2 Aspect intrusif des capteurs

Afin de collecter des expressions haptiques, il ne suffit pas de créer un contexte propice à leur manifestation, mais également d'être capable d'enregistrer leurs paramètres physiques. Pour certaines modalités, ceci est relativement simple et non intrusif. Par exemple, une caméra peut enregistrer des expressions faciales ou gestuelles d'émotions. Un microphone peut enregistrer des expressions orales. Le cas de la modalité haptique est différent. Certains paramètres comme la pression exercée requiert un contact physique pour être mesurés.

Deux possibilités s'offrent alors :

- Attacher un dispositif de mesure sur la main du sujet. Cette solution est intrusive car elle demande au sujet de porter continuellement un dispositif et peut lui procurer un

contact perçu comme non-naturel. Ceci peut donc limiter l'aspect naturel et spontané de ses expressions haptiques.

- Placer le dispositif de mesure sur la surface susceptible d'être touchée par le sujet. Cette solution est moins intrusive, cependant elle nécessite de couvrir une surface entière à l'aide de capteurs tactiles, ce qui est onéreux et peut également générer des contacts non-naturels.

4.3.2 Exploration de protocoles expérimentaux

La section précédente nous a présenté des contraintes pour la définition d'un protocole expérimental visant à collecter des expressions haptiques d'affects spontanés. Cette section propose d'étudier quatre protocoles expérimentaux pour la collecte d'expressions haptiques d'états affectifs spontanés, en mettant en évidence pour chacun ses avantages et limites. Ces protocoles incluent tous une tâche impliquant une interaction haptique à réaliser, au cours de laquelle un stimulus induit un affect chez le sujet. La réalisation d'une tâche comme prétexte à l'interaction haptique permet de ne pas divulguer au sujet l'objectif réel de l'expérimentation, ce qui risquerait de limiter l'aspect spontané de son comportement.

Le dispositif utilisé par les sujets pour compléter les tâches proposées est un Geomagic Touch, décrit en annexe B.3. Ce dispositif permet non seulement de réaliser la tâche, mais aussi de collecter les données relatives au mouvement du sujet à chaque instant de la tâche afin de déterminer les caractéristiques cinématiques de son expression. Ceci rend l'utilisation des capteurs transparent pour l'utilisateur. L'inconvénient de ce dispositif est de ne pas pouvoir collecter les données relatives à la pression exercée par le sujet, celui-ci n'embarquant pas de capteur de force.

Les expressions collectées ne sont donc pas l'expression d'une émotion induite seule, mais d'une combinaison entre cette expression et la réalisation de la tâche proposée. Ceci est plus intéressant lorsque nous étudions des interactions haptiques intervenants en milieu naturel, pouvant donc inclure des éléments d'interaction autre que l'expression affective. L'analyse des expressions kinesthésiques du sujet se fera donc en comparant leurs caractéristiques entre le moment où le sujet réalise la tâche sans induction d'affect, puis lorsqu'il la réalise avec induction d'affect.

4.3.2.1 Tâche d'apprentissage gestuel

Description de la tâche. En contexte naturel, le toucher affectif est généralement lié à un contact physique entre deux personnes. C'est la raison pour laquelle la première tâche proposée pour induire des affects se place dans le contexte d'une interaction sociale. Cette tâche s'inspire de recherches menées par [Basdogan et al. \(2000\)](#) sur la collaboration en environnement virtuel entre deux partenaires par la modalité haptique. Elle se place dans un contexte d'apprentissage gestuel, impliquant un sujet professeur P et un sujet étudiant E . Ces deux sujets sont placés dans des salles différentes afin qu'il ne puisse communiquer entre eux.

Avant l'expérimentation, P est formé pour réaliser une tâche de contrôle d'un système mécanique. Il s'agit plus précisément d'amplifier l'amplitude d'oscillation d'un pendule en modifiant dynamiquement la longueur de son fil (voir figure 4.1a).

Durant l'expérimentation, *P* et *E* ont chacun un Geomagic Touch et un écran devant eux, affichant l'état courant du même pendule, dont la longueur du fil dépend du dispositif haptique de *E*. Ce dispositif est contraint en position avec une certaine force au dispositif de *P*, afin que *P* puisse guider les mouvements de *E* pour lui montrer comment compléter la tâche.

Induction d'affect. En plus du pendule, un affichage d'un agent virtuel issu du framework MARC (Courgeon et al. (2008)) est présenté sur l'écran du sujet *E*. *P* n'est pas au courant de cet affichage, bien que nous ayons dit à *E* que ce visage est contrôlé par *P*. En réalité, ce visage est contrôlé par un expérimentateur, situé dans une troisième pièce. À certains moments de l'expérimentation, l'avatar virtuel génère différentes expressions faciales positives ou négatives, accompagnées de messages audio congruents. Par exemple, une expression faciale de colère illustrée figure 4.1b couplée avec le message « Tu fais n'importe quoi » vise à induire une réponse affective négative chez *E*.

Résultats des tests. Des pré-tests sur quelques sujets ont mis en évidence des limitations à ce protocole. Cette tâche semble trop compliquée à apprendre, en particulier pour *E* qui a du mal à comprendre comment amplifier l'oscillation du pendule avec un simple guidage haptique. Ce dernier se contente alors généralement de suivre les mouvements de *P*. Son comportement est donc fortement influencé par celui de *P*. Par ailleurs, le dispositif haptique de *E* est soumis à celui de *P* pour le guidage. Cette soumission limite également la qualité de la collecte, puisque les positions collectées du dispositif de *E* dépendent des gestes de *P*.

Une simplification de la tâche à apprendre ne permettrait pas de résoudre ces problèmes. *P*, qu'il soit le même ou différent entre les différentes passations, a un comportement haptique qui va nécessairement varier entre les différentes passations de sujets. Une solution envisagée serait de retirer *P* et de synthétiser son comportement, afin de fournir un comportement homogène entre les différentes passations de sujets. Ceci n'est cependant pas réalisable car le comportement de *P* doit s'adapter à ce que fait *E*. Ceci ne résout par ailleurs pas le problème de complexité de la tâche.

4.3.2.2 Tâche de pointage de cible

Description de la tâche. Le protocole précédant suggère que la tâche doit être facile à apprendre et à réaliser afin de ne pas introduire de gestes liés à l'incompréhension de la tâche par le sujet. Dans le même objectif, nous décidons d'enlever tout guidage haptique, et de ne plus se baser sur un scénario incluant une communication haptique.

La tâche consiste à atteindre une cible dans l'espace 3D (voir figure 4.1c). Ces cibles apparaissent sur un axe prédéfini. Après la présentation de dix cibles, nous changeons l'axe sur lequel les cibles s'affichent (gauche-droite, puis haut-bas, et enfin profondeur). Ces cibles sont donc à des positions simples à atteindre, mais variant de temps en temps afin d'éviter une accoutumance du sujet. Une méthode similaire basée sur du pointer-et-cliquer a plus récemment été proposée par Sun et al. (2014) pour l'étude d'expression de stress dans des mouvements de souris.

Induction d'affect. L'induction d'affect exploite une combinaison de médias, plus exactement le couplage d'un stimulus visuel avec un stimulus auditif. Le stimulus visuel est affiché au même endroit que la tâche, comme le montre la figure 4.1d. Afin d'assurer que l'attention du sujet soit sur le stimulus, la cible et la position virtuelle du sujet sont effacées. Deux différentes combinaisons de stimuli ont été employées pour induire de la joie et du dégoût. Pour la joie, une image d'un bébé issue du corpus de l'International Affective Picture System (IAPS) apparaît à l'écran. Simultanément, les haut-parleurs diffusent le son d'un bébé qui rit. Pour le dégoût, une image de toilettes bouchées issue du même corpus apparaît à l'écran. Simultanément, les haut-parleurs diffusent un son de vomissement.

Résultats des tests. Des pré-tests sur quelques sujets ont mis en évidence que cette tâche était facile à comprendre pour les sujets. De nouvelles limitations sont cependant apparues. Les sujets ont du mal à atteindre les cibles placées selon l'axe avant/arrière, à cause du problème de la perception de profondeur dans les environnements virtuels [Armbrüster et al. \(2008\)](#). Cette tâche a été jugée répétitive, car la disposition des cibles était prévisible. À cause de la perte d'attention associée à cette répétitivité, les sujets ont parfois manqué les cibles, les obligeant à revenir en arrière, brisant le mouvement à étudier. Enfin, la méthode d'induction de l'émotion impliquait que la cible et le curseur disparaissaient de l'écran durant l'induction de l'affect. Ceci avait tendance à désorienter les sujets qui s'arrêtaient de bouger, rendant impossible l'étude de la cinématique de l'expression haptique.

4.3.2.3 Tâche de poursuite de cible

Description de la tâche. Ce protocole est similaire à celui de la tâche de pointage de cible. Il utilise une cible mobile, qui ne disparaît pas quand l'utilisateur l'atteint. Il ne s'agit donc plus d'une tâche de pointage mais de poursuite de cible, comme le montre la figure 4.1e. La couleur de la sphère représentant le sujet change du rouge au vert en fonction de la distance à la cible, afin de fournir un retour visuel au sujet.

Cette cible laisse une trainée bleue pour que le sujet comprenne rapidement qu'elle décrit une trajectoire circulaire et à vitesse constante. Ceci vise à ce qu'il puisse anticiper les mouvements qu'il effectue et donc moins qu'ils soient moins saccadés. Des mouvements trop saccadés durant la poursuite de la cible complexifieraient l'expression collectée et rendraient son analyse plus complexe. Par ailleurs, contrairement à la tâche précédente le sujet ne peut aller trop vite car il est contraint par la vitesse de sa cible.

Afin de répondre au problème de la perception de profondeur, la cible se déplace en deux dimensions et le mouvement du dispositif haptique est contraint dans le plan parallèle à l'écran.

Induction d'affect. L'induction de stress est identique à celle de l'expérimentation précédente (IAPS et son). La différence est que le stimulus visuel est diffusé à l'arrière de la cible à poursuivre et du curseur, permettant au sujet de continuer la tâche (voir figure 4.1f).

Résultats des tests. Des pré-tests sur quelques sujets montrèrent que les problèmes précédents de perception de profondeur et d'attention étaient résolus avec ce protocole. En outre, le fait de suivre une cible mobile oblige le sujet à se mouvoir, ce qui nous permet de déterminer les paramètres cinématiques de son expression. Ceci est ce que nous souhaitons, mais introduit une nouvelle limitation. La cible devant être suivie, la liberté de mouvement du sujet est limitée : sa trajectoire dépend intégralement de celle de la cible. Ainsi, à l'affichage du stimulus, les sujets avaient tendance à s'arrêter de bouger pendant une seconde surpris par l'image, puis reprirent le cours normal de la tâche.

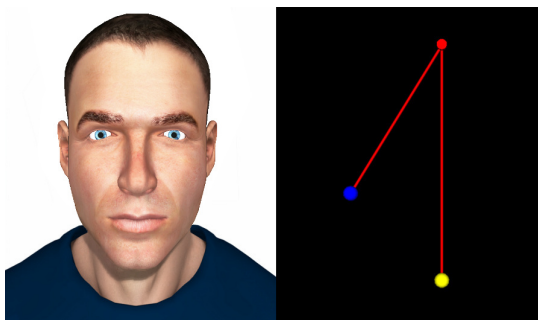
4.3.2.4 Tâche d'évitement

Description de la tâche. Les jeux étant motivants et favorisant l'apparition d'affects [Geslin \(2012\)](#), ce dernier protocole de test est basé sur un jeu existant, nommé « la queue du cochon ». Ce jeu consiste à faire passer un anneau dans lequel passe un fil conducteur. L'objectif est de faire passer l'anneau d'un bout à l'autre du fil sans le toucher. Dans le cas contraire, une lampe s'allume pour signaler au joueur qu'il y a contact entre l'anneau et le fil. La tâche d'évitement étudiée vise à reproduire ce jeu. Elle inclue une barre de score affichée à droite de l'écran qui diminue à chaque fois que l'anneau touche le fil. Notons qu'une méthode similaire basée sur un passage entre deux murs d'un curseur de souris a plus récemment été proposée par [Sun et al. \(2014\)](#) pour l'étude d'expressions de stress dans des mouvements de souris.

Induction d'affect. Jusqu'à présent, deux types de stimuli ont été utilisés : des messages visuels et audios lors d'une interaction, ainsi que des combinaisons de stimuli visuels et auditifs. Ces stimuli ont tendance à gêner la tâche en attirant l'attention sur eux. Nous proposons ici une nouvelle méthode d'induction visant à induire du stress.

Une façon d'induire du stress au sujet vise à lui donner l'impression qu'il est en train de perdre le contrôle de la situation. Le stimulus proposé tente de répondre à ce critère et se compose de trois éléments illustrés dans la figure 4.1h. Premièrement, un fond passant alternativement du noir au rouge, visant à reproduire une alarme. Cet effet d'alarme est appuyé par un second élément, le son d'une alerte dans les haut-parleurs. Enfin, un compte à rebours à échéance courte est affiché. Cet ensemble d'éléments visent à faire penser au sujet qu'il n'a plus beaucoup de temps pour terminer la tâche. La présence d'un temps limite, comme lors d'examens pour des étudiants, est idéale pour induire du stress.

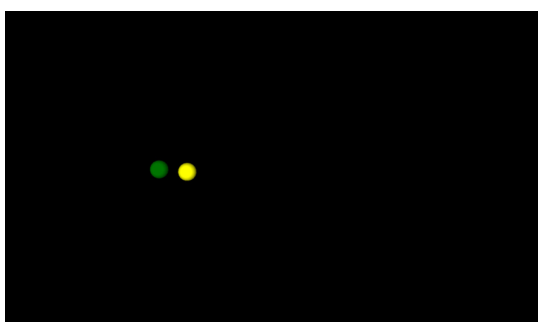
Nous n'avons pas fait de tests informels sur ce protocole. Ce protocole nous paraît plus motivant que les précédents, très facile à comprendre et dont le stimulus ne gêne pas la complétion de la tâche. Ce protocole semble néanmoins présenter deux limitations : cette tâche est inspirée d'un jeu réel, naturellement stressant. Nous souhaitons cependant que pendant la première partie de la tâche, les sujets n'éprouvent pas de stress. Par ailleurs, s'il serait intéressant d'étudier la force exercée sur le dispositif haptique au cours de la tâche, l'étude des aspects cinématiques de l'expression haptique serait très contrainte par la précision requise par la tâche à accomplir, obligeant par exemple son utilisateur à se déplacer à de faibles vitesses pour ne pas heurter le fil.



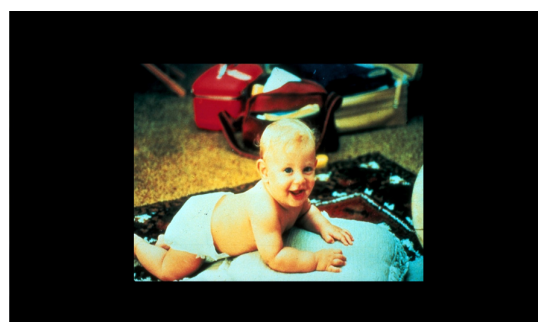
(A) Apprentissage gestuel, sans stimulus



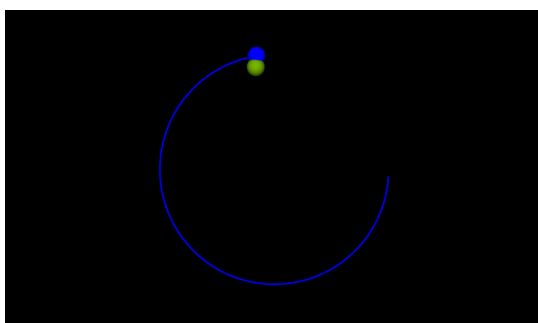
(B) Apprentissage gestuel, avec stimulus



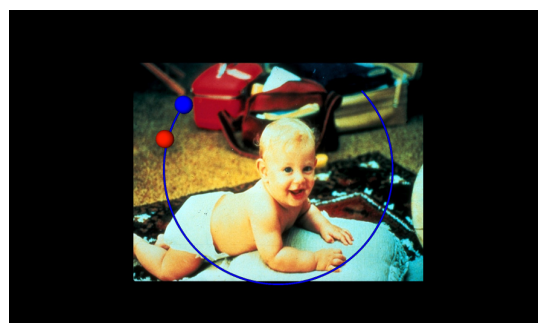
(C) Pointage de cible, sans stimulus



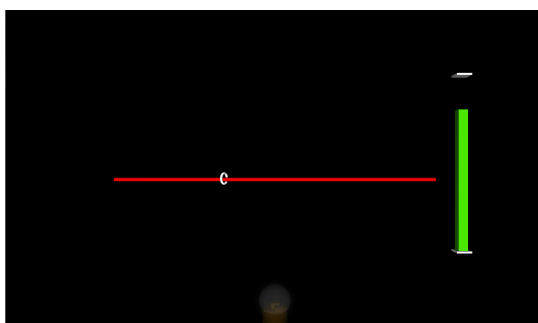
(D) Pointage de cible, avec stimulus



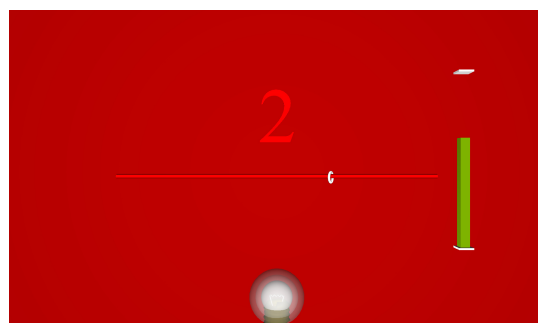
(E) Poursuite de cible, sans stimulus



(F) Poursuite de cible, avec stimulus



(G) Évitement, sans stimulus



(H) Évitement, avec stimulus

FIGURE 4.1 : Différents protocoles testés pour l'induction d'un état affectif, incluant une collecte de l'expression kinesthésique via un Geomagic Touch.

4.3.3 Tâche sélectionnée : conduite

Les contraintes que nous avons précédemment mises en évidence nous suggèrent de réaliser une tâche ludique, permettant une plus grande immersion et implication du sujet, et plus propice à l'apparition d'affects.

Description de la tâche. Ce scénario est basé sur un jeu d'arcade de conduite d'une voiture de course vue du dessus. La voiture se déplace selon l'axe gauche-droite sur trois voies (voir figure 4.2b). Ce déplacement est contrôlé par le Geomagic Touch. Sur la route, des obstacles représentés par de gros carrés blancs défilent sur les voies et doivent être évités. Ces obstacles forcent donc le sujet à faire se déplacer la voiture. Afin de motiver davantage le sujet, une barre de santé est affichée sur la voiture. Cette barre diminue et devient de plus en plus rouge à chaque collision de la voiture avec un obstacle.

Induction de stress. Après 40 secondes, la visibilité de la route est soudainement réduite en cachant d'un voile noir la moitié supérieure de l'écran sans en informer au préalable le sujet (voir figure 4.2). Les obstacles apparaissent ainsi au dernier moment, les rendant plus difficiles à éviter. Après 23 secondes, la visibilité revient à la normale. La tâche dure au total 1'30 minute.

Entraînement. Un entraînement est proposé au sujet avant d'effectuer la tâche réelle comme décrite ci-dessus. Ceci permet à fois de lui expliquer la tâche et qu'il la comprenne en pratiquant. Cet entraînement consiste à faire la tâche avec une durée réduite à 30 secondes. Le stimulus stressant est bien entendu absent de cet entraînement.

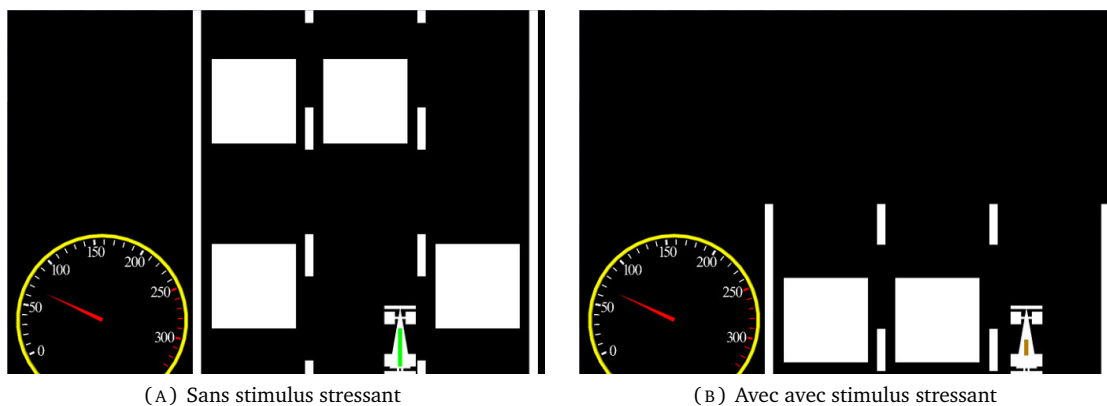


FIGURE 4.2: Tâche de conduite/évitement d'obstacles.

4.4 Étude de l'expression haptique d'un état de stress spontané

Cette étude a pour objectif de collecter un corpus d'expressions haptiques issues d'un stress spontané chez des utilisateurs et d'en étudier les caractéristiques en termes de force et de cinématique.

4.4.1 Hypothèses

Sur la base de notre objectif et de la tâche de conduite proposée, nous posons l'hypothèse suivante :

H1 Le stimulus au cours de la tâche induit du stress aux sujets. Afin d'évaluer cette hypothèse, nous posons trois sous-hypothèses liées à différentes méthodes de mesure du stress : subjective, comportementale et physiologique. Ces méthodes ont été abordées dans notre étude bibliographique en section 1.2.4.

H1-a Les sujets reportent avoir ressenti du stress au cours du stimulus.

H1-b Les sujets présentent un changement de comportement (évitement) au cours du stimulus. Cette hypothèse est basée sur les travaux de [Heuer et al. \(2007\)](#); [Roelofs et al. \(2009\)](#).

H1-c Les sujets présentent un changement physiologique (augmentation de l'activité électrodermale) au cours du stimulus. Cette hypothèse est basée sur les travaux de [Lazarus et al. \(1963\)](#).

Notre objectif étant de caractériser l'expression kinesthésique du stress, nous comparerons l'expression collectée avant et pendant le stimulus stressant. Nous posons donc :

H2 Les paramètres haptiques (cinématique et force appliquée) diffèrent entre avant et pendant le stimulus stressant. D'après les travaux de [Yamauchi \(2013\)](#); [Hernandez et al. \(2014\)](#), on attend en particulier que :

H2-a Les sujets exercent une force plus importante sur le bouton durant le stimulus par rapport à avant.

H2-b Les sujets se déplacent plus rapidement durant le stimulus par rapport à avant.

H2-c Les sujets se déplacent de façon plus saccadée durant le stimulus par rapport à avant.

H2-d Les sujets se déplacent moins sur un axe majeur durant le stimulus par rapport à avant.

H2-e Les sujets se déplacent plus sur un second axe majeur durant le stimulus par rapport à avant.

Enfin, nous étudierons les différences éventuelles dans l'expression kinesthésique entre avant et après le stimulus stressant. L'objectif est de tester si l'expression haptique du sujet présente toujours des changements dû à l'épisode stressant, malgré que le stimulus soit terminé. Nous posons donc :

H3 Les paramètres haptiques (cinématique et force appliquée) diffèrent entre avant et après le stimulus stressant. Cette hypothèse vise à étudier l'influence de l'induction de stress sur l'expression haptique du sujet. D'après les travaux de [Yamauchi \(2013\)](#); [Hernandez et al. \(2014\)](#), on attend en particulier que :

H3-a Les sujets exercent une force plus importante sur le bouton après le stimulus par rapport à avant.

H3-b Les sujets se déplacent plus rapidement après le stimulus par rapport à avant.

H3-c Les sujets se déplacent de façon plus saccadée après le stimulus par rapport à avant.

H3-d Les sujets se déplacent moins sur un axe majeur après le stimulus par rapport à avant.

H3-e Les sujets se déplacent plus sur un second axe majeur après le stimulus par rapport à avant.

4.4.2 Méthode expérimentale

4.4.2.1 Sujets

16 jeunes sujets droitiers, 27 ans d'âge moyen ($SD = 3.6$, $min = 21$, $max = 33$) ont participé à cette expérimentation. Nous avons restreint cette étude aux hommes, jeunes et droitiers afin d'éviter d'éventuelles différences liées au genre, à l'âge et à la main dominante ([Nguyen et al. \(1975\)](#)). Ces sujets ont également été sélectionnés pour être naïfs sur les méthodes d'induction d'affect afin d'éviter qu'ils ne comprennent l'objectif de l'expérimentation (voir la procédure expérimentale section 4.4.2.4 pour plus de détails).

4.4.2.2 Plateforme expérimentale

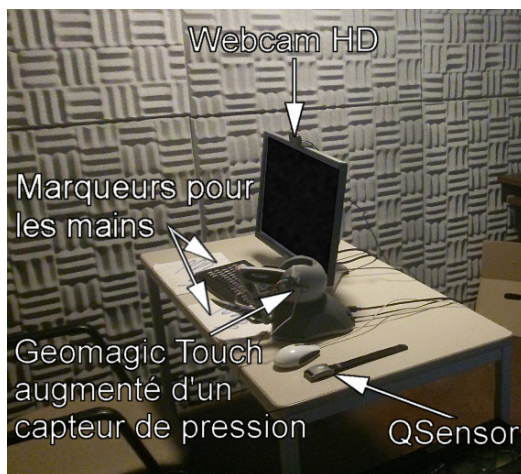
Cette expérimentation se déroule dans une chambre anéchoïque acoustique afin d'éviter tout stimulus visuel ou auditif externe. Une chaise sur laquelle s'assoit le sujet est mise en face d'une table sur se trouvent un écran d'ordinateur de 22 pouces, un clavier et un dispositif Geomagic Touch (voir figure 4.3) :

Une série de capteurs ont été utilisés afin de mesurer l'expression kinesthésique, comportementale et physiologique du sujet :

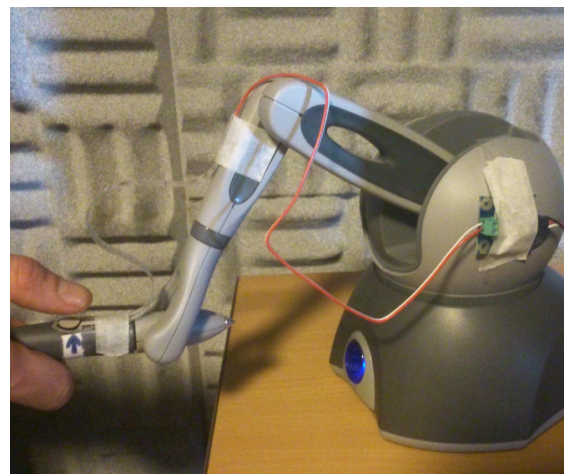
- Un Geomagic Touch, permettant d'enregistrer les expressions kinesthésiques du sujet. Ce dispositif est utilisé par le sujet pour contrôler la position de la voiture à l'écran. Ce dispositif est augmenté d'un capteur de forces que nous avons développé sur son bouton. Ce capteur est décrit en annexe B.2.
- Une caméra Logitech HD c525, permettant d'enregistrer le comportement du sujet. Cette caméra est placée sur l'écran pour filmer le visage du sujet. Une lumière au plafond permet d'assurer un éclairage correcte du sujet. Ceci est important pour le fonctionnement de l'algorithme AdaBoost, proposé par [Morency et al. \(2003\)](#) qui permet de suivre les mouvements du visage et des yeux des sujets.

- Un QSensor¹, permettant d'enregistrer les données physiologiques du sujet. Ce capteur mesure la conductance électrodermale. Ce dispositif est fixé au poignet du sujet durant l'expérimentation.

Le logiciel Camtasia permet de capturer de façon synchronisée le visage du sujet filmé par la webcam et l'écran de l'ordinateur, permettant de lier les réactions du sujets aux différentes périodes de la tâche de conduite.



(A) Plateforme expérimentale.



(B) Geomagic Touch augmenté d'un capteur de force sur son bouton.

FIGURE 4.3 : Plateforme expérimentale pour la collecte d'expressions kinesthésiques issues d'un stress spontané.

4.4.2.3 Variables

Cette étude utilise deux types de variables. Premièrement, une variable indépendante correspondant au moment étudié : avant, pendant ou après stimulus. Deuxièmement, des mesures calculées à partir des expressions collectées. Ceci nous permettra de déterminer l'influence du stimulus sur les expressions collectées.

Variable indépendante. Cette expérimentation vise à collecter et à analyser des expressions haptiques de stress. Cette analyse se fera en comparant trois moments distincts de la tâche, décrivant notre variable aléatoire :

Avant le stimulus stressant, entre deux et vingt-deux secondes après l'apparition du premier obstacle.

Pendant le stimulus stressant, entre deux et vingt-deux secondes après l'apparition du stimulus.

Après le stimulus stressant, entre deux et vingt-deux secondes après la fin du stimulus.

1. <http://qsensor-support.affective.com/>

Afin d'avoir des résultats comparables entre eux, la séquence d'obstacles utilisée est la même pour tous les sujets. Cette séquence est réinitialisée au début et à la fin du stimulus. Ceci permet de comparer les différents temps sur la même séquence d'obstacles. Les obstacles mettant environ deux secondes à atteindre le bas de l'écran où se trouve la voiture après leur création, et le stimulus stressant durant vingt-trois seconde, on ne peut comparer les différentes périodes sur des temps plus grands.

Variables dépendantes. Deux types de variables dépendantes sont collectées dans cette expérimentation. Le premier type concerne l'induction de stress et vise à évaluer H1. Ces variables sont soit subjectives, reportées par le sujet, soit objectives, mesurées au cours de l'expérimentation. Le second type concerne les mesures extraites des expressions haptiques collectées et vise à évaluer H2 et H3.

Induction de stress Afin d'évaluer l'induction de stress, nous utilisons conjointement les trois grands types de mesures vues dans notre étude bibliographique section 1.2.4.

Report subjectif Afin de mesurer subjectivement l'induction de stress, deux formulaires de questions sont présentés au sujet après la tâche. Ces formulaires sont illustrés en annexe A.8. Le premier consiste en une série d'affirmations et s'inspire de la PSS proposée par [Cohen et al. \(1983\)](#). Pour chaque affirmation donnée, le sujet indique son degré d'accord ou de désaccord sur une échelle de Likert à 5 points, allant de 1 « désaccord » à 5 « accord » :

Ms1 « J'ai rapidement compris la tâche demandée ». Cette mesure permet de vérifier que la tâche était facile à comprendre pour le sujet, et donc que son exécution n'était pas influencée par sa complexité.

Ms2 « J'ai été dérangé(e) par un événement inattendu ». Cette mesure permet de vérifier que le sujet ne s'attendait pas à recevoir un stimulus.

Ms3 Sentiment de dominer la situation. Divisé en deux questions :

Ms3-a « J'ai senti que je dominais la situation (avant la réduction la visibilité) ».

Ms3-b « J'ai senti que je dominais la situation (après la réduction la visibilité) ».

Ces deux dernières mesures permettent d'évaluer un des aspects de la définition du stress, à savoir le fait de penser pour le sujet qu'il ne peut faire face à l'événement.

Ms4 Le second formulaire s'inspire de la Echelle différentielle des émotions (DES) présentée en 1.2.4. Il s'agit demander au sujet de reporter s'il a fait l'expérimentation de stress selon une échelle de Likert à 5 points. Cette mesure est diluée dans un ensemble de douze labels émotions présentés, que nous n'étudierons pas mais dont la présence vise à dissimuler au sujet ce que nous mesurons. Cette question est posée pour deux moments :

Ms4-a Avant la réduction de la visibilité.

Ms4-b Après la réduction de la visibilité.

Mo1 Approche-évitement . Cette mesure comportementale est la distance entre les yeux du sujet vue par la caméra [Gómez Jáuregui et al. \(2013\)](#). Elle représente le fait que le sujet se recule (valeur négative) ou s'avance (valeur positive) vers la caméra.

Mo2 Conductance électrodermale . Cette mesure physiologique est l'activité électrique à la surface de la peau, liée à la sécrétion de sueurs. Cette sécrétion est généralement liée à une augmentation de l'activation du sujet. Cette mesure a été utilisée par [Chiew et al. \(2014\)](#); [Hernandez et al. \(2014\)](#) comme indicateur de la présence de stress.

Paramètres des expressions haptiques Les mesures Mo4 à Mo7 sont extraites de la séquence de positions 3D $[(x, y, z)_1, (x, y, z)_2, \dots, (x, y, z)_n]$ enregistrées via le Geomagic Touch. Le taux d'échantillonnage était de 1 ms. Ces mesures sont les mêmes que celles utilisées 2.3, dont nous rappellerons ici les formules.

Mo3 Pression exercée . Intensité de la force sur le bouton du Geomagic Touch (mesurée via le capteur Flexiforce).

Mo4 Vitesse moyenne . Vitesse moyenne de l'expression. Calculée avec l'équation $\sum_{t=0}^{n-1} |v(t+1) - v(t)| / n$

Mo5 Saccades . Variations moyennes de l'accélération : $\sum_{t=0}^{n-1} |a(t+1) - a(t)| / n$, avec $a(t)$ l'accélération au temps t .

Mo6 Poids de l'axe majeur . Importance de l'axe majeur sur la gestuelle (calculée par Décomposition en Valeurs Singulières (DVS)). Plus cette valeur s'approche de 1, plus l'expression est contrainte sur l'axe majeur du mouvement.

Mo7 Poids du second axe majeur . Importance de second axe majeur sur la gestuelle, orthogonal à l'axe majeur (calculée par DVS).

Ces mesures sont calculées d'après les expression haptiques collectées pour les trois périodes de la tâche de conduite correspondant à notre variable indépendante.

4.4.2.4 Procédure expérimentale

Présentation de l'expérimentation au sujet. Au début de l'expérimentation, le sujet s'assoit sur la chaise. On l'informe que cette étude concerne la perception haptique d'objets virtuels dans des environnements virtuels. On lui explique ensuite que nous allons devoir collecter certaines données physiologiques le concernant et une capture vidéo de son visage. On lui dit que ceci est utilisé pour pouvoir évaluer son niveau de concentration au cours de la tâche qui va lui être proposée. Ces explications sont des leurres : notre objectif étant en réalité de collecter des expressions haptiques issues d'un état de stress spontané. Les mesures sont quand à elles utilisées pour évaluer l'efficacité de l'induction de stress chez le sujet. Nous nous assurons que le sujet ne puisse découvrir l'objectif de l'expérimentation afin de ne pas influencer l'aspect naturel de son comportement. Nous ne pouvons cependant pas cacher au sujet la collecte de ces mesures pour des raisons légales, bien que nous ne révélons pas leur véritable utilité dans un premier temps. Un formulaire d'accord pour la collecte présenté en A.8 est signé par le sujet. Le sujet remplit ensuite un court formulaire décrit en annexe A.1 afin de s'assurer qu'il rentre bien dans nos critères d'âge, genre et main dominante.

Démarrage des mesures comportementales et physiologiques. Le sujet place ses mains dans deux emplacements dessinés sur la table à cet effet (voir figure 4.3a). Ceci permet d'assurer que le sujet reste bien juste en-dessous de la source lumineuse et fait correctement face à la caméra. L'éclairage est en effet important pour l'efficacité de la détection des yeux par l'algorithme Adaboost, support pour calculer Mo1 l'approche-évitement du sujet. Le QSensor est attaché au poignet gauche tandis que le sujet est informé qu'il doit bouger ce poignet le moins possible. Une capture vidéo de son visage ainsi que de l'écran est réalisée via le logiciel Camtasia Studio. La capture de l'écran permet de lier les réactions du sujet aux événements. Le Geomagic Touch est présenté au sujet auquel la façon de tenir le dispositif est précisée (comme lors d'une poignée de main).

Remplissage du formulaire STAI. Le sujet remplit un formulaire pour évaluer son niveau général d'anxiété. Demander au sujet de compléter ce formulaire a deux objectifs. Le premier est d'étudier l'existence éventuelle de relations entre les mesures objectives haptiques collectées et les réponses au STAI. Le second objectif est de détourner l'attention du sujet du fait qu'il soit filmé en le faisant se concentrer sur le formulaire. Cette distraction vise à collecter un comportement du sujet plus naturel.

Complétion de la tâche de conduite. La tâche de conduite est présentée au sujet qui en passe l'entraînement en présence de l'expérimentateur. Afin de déplacer la voiture, le sujet doit maintenir le bouton du Geomagic Touch enfoncé. Ceci permet à la fois de vérifier que le sujet est en train de réaliser la tâche, mais également de mesurer la pression qu'il exerce sur ce bouton. L'expérimentateur sort de la salle après avoir répondu aux éventuelles questions du sujet. [Coan et Allen \(2007\)](#) rappellent en effet que la présence d'une autre personne pourrait influencer sur l'aspect naturel du comportement du sujet. Un écran noir d'une durée d'une minute est diffusé avant la tâche durant lequel le sujet doit éviter de bouger. Ceci permet de mesurer le comportement au repos du sujet concernant sa conductance électrodermale. Le sujet réalise ensuite la tâche, suite à laquelle un nouvel écran noir est affiché durant une minute. A la fin de second écran noir, l'expérimentateur rentre dans la salle pour donner au sujet les dernières instructions.

Questionnaire subjectif. Le sujet remplit successivement les deux questionnaires subjectifs présentés en annexe A.9. Ces questionnaires inspirés de la PSS et de la DES permettent de vérifier le succès de l'induction de stress au sujet.

Fin de l'expérimentation. Nous enlevons le QSensor et éteignons la caméra puis expliquons le réel objectif de l'expérimentation au sujet, ainsi que pourquoi nous ne lui avons pas révélé. Il est important pour des raisons éthiques que le sujet soit informé. Justifier cette dissimulation permet non seulement au sujet de la comprendre, mais aussi implicitement de lui montrer que l'expérimentation a été conçue pour ne pas qu'il puisse découvrir l'objectif par lui-même. Le sujet pourrait en effet se sentir trompé ou s'en vouloir de ne pas l'avoir deviné.

4.4.3 Résultats

Cette section traite des résultats de notre étude. Elle est divisée en deux parties. La première partie présente les résultats subjectifs, comportementaux et physiologiques liés à l'induction de stress. La seconde partie présente les caractéristiques kinesthésiques des expressions collectées au cours de la tâche de conduite.

4.4.3.1 Induction de stress

Ms1 Tous les sujets ont reporté avoir parfaitement compris la tâche de conduite proposée ($M = 5.00$, $SD = 0.00$).

Ms2 Les sujets ont moyennement été surpris par la réduction de la visibilité ($M = 3.31$, $SD = 1.30$).

Ms3 Les sujets pensaient parfaitement dominer la situation avant le stimulus (**Ms3-a**, $M = 4.50$, $SD = 1.21$). Les sujets pensaient moyennement dominer la situation avant le stimulus (**Ms3-b**, $M = 3.31$, $SD = 1.30$). Les mesures **Ms3-a** et **Ms3-b** présentent une différence significative entre elles ($p = 0.02126$, $V = 78$).

Ms4 Les sujets rapportent moins de stress avant le stimulus ($M = 1.63$, $SD = 0.806$) qu'après le stimulus (**Ms4-b**, $M = 3.13$, $SD = 1.26$). Cette différence est hautement significative ($p \ll 0.01$, $V = 0$).

Les résultats de ces quatre mesures subjectives valident donc notre hypothèse H1-a.

Mo1 Approche-évitement. La figure 4.4 illustre le comportement moyen d'approche-évitement des sujets. La valeur 0 représente la position du sujet juste avant le stimulus. Une réaction d'évitement est observée durant le stimulus. Ce résultat valide donc notre hypothèse H1-b.

Mo2 Conductance électrodermale. Nous observons des résultats intéressants pour certains sujets. La courbe présentée figure 4.5 montre pour le premier sujet une élévation de la conductance électrodermale pendant le stimulus, persistant encore après le stimulus. Les courbes du bas sont liées aux accéléromètres du QSensor et montrent que le sujet n'a pas bougé son poignet gauche durant cette période.

Nous avons cependant choisi de ne pas considérer le résultat de cette mesure à cause de sa fiabilité. Le logiciel Camstasia faisait chauffer de façon importante l'ordinateur, la température de la pièce anéchoïque augmentait au cours de l'expérimentation, ce qui s'observe généralement par une montée de la sécrétion de sueur tout au long de l'expérimentation. Par ailleurs, le taux d'échantillonnage du QSensor prévu pour être réglé sur 32 Hz, nous a fourni des données à une fréquence de seulement 2 Hz. Cette faible fréquence diminue fortement la fiabilité des traitements statistiques sur ce genre de signal.

Ces résultats valident notre hypothèse H1.

Aucun résultat n'a été obtenu concernant l'influence du niveau d'anxiété générale (STAI) sur les autres mesures objectives ou subjectives collectées.

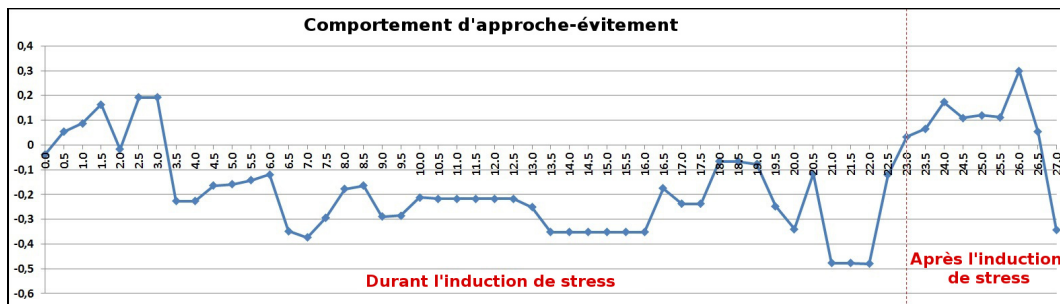


FIGURE 4.4 : Comportement d'approche-évitement durant l'induction de stress. Les valeurs positives décrivent un comportement d'approche (avancée du sujet par rapport à la caméra), les valeurs négatives décrivent un comportement d'évitement (recul du sujet par rapport à la caméra).

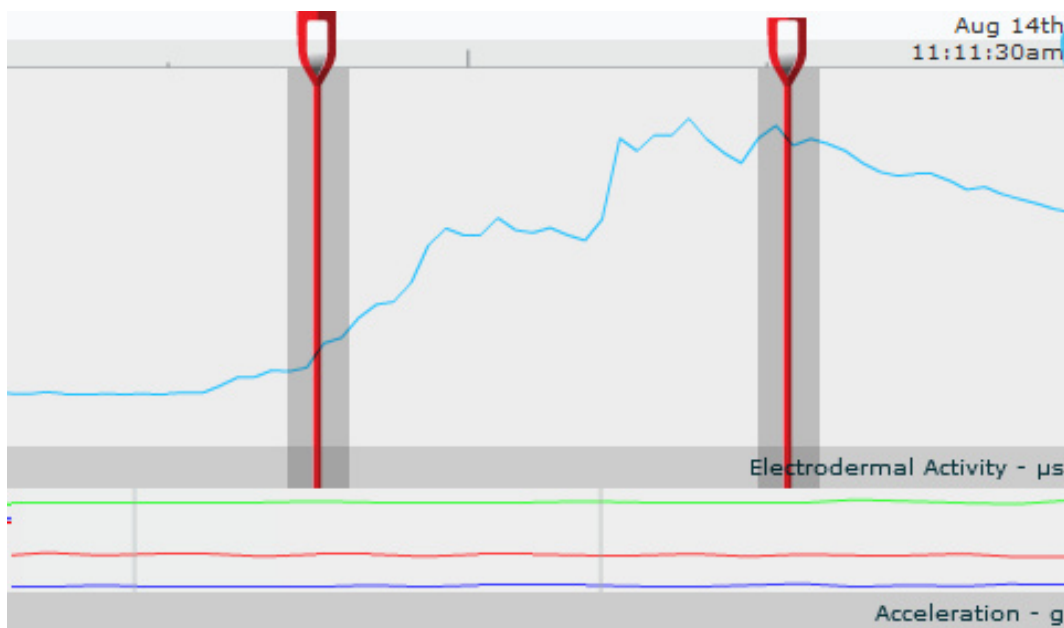


FIGURE 4.5 : Conductance électrodermale du premier sujet ayant passé l'expérimentation. Les barres verticales rouges sur la courbe du haut indiquent les moments de début et de fin du stimulus stressant.

4.4.3.2 Paramètres des expressions haptiques

La figure 4.6 présente les résultats concernant les mesures cinématiques des expressions haptiques collectées. Trois périodes y sont présentées : avant, pendant et après le stimulus.

Le tableau 4.1 présente les différences significatives obtenus via le test de Friedman et le test des rangs signés de Wilcoxon (échantillons appariés) entre avant/pendant le stimulus stressant et avant/après le stimulus stressant.

Avant VS Pendant. Le tableau montre des différences significatives pour les mesures de force exercée, vitesse moyenne et aspect saccadé du geste. Une tendance a été trouvée concernant les mesures sur l'axe du majeur du mouvement. Ces résultats valident donc nos sous-hypothèses **H2-a**, **H2-b**, **H2-c** et infirment **H2-d** et en partie **H2-e**. Certaines des sous-hypothèses étant validées, ces résultats valident donc l'hypothèse **H2**.

Mesure	Temps par rapport au stimulus			Friedman (X^2)	Comparatif p-value (V)	
	avant	pendant	après		av VS pdt	av VS ap
Mo3 Force N (SD)	4.13 (5.2)	6.35 (6.21)	5.04 (6.03)	0.00901 (9.42)	0.0319 (26)	0.979 (69)
Mo4 Vitesse moyen- ne cm.s^{-1} (SD)	12.7 (2.59)	19.0 (3.17)	16.3 (2.46)	1.29e-6 (27.1)	0.000482 (0)	0.000482 (0)
Mo5 Aspect sac- cadé cm.s^{-2} (SD)	1.17 (0.367)	2.50 (0.426)	2.16 (0.376)	1.22e-05 (22.6)	0.000584 (1)	0.000482 (0)
Mo6 Poids du premier axe majeur	0.613 (0.0785)	0.586 (0.0715)	0.647 (0.0730)	0.0339 (11.4)	0.518 (0.0715)	0.0664 (32)
Mo7 Poids du second axe majeur	0.284 (0.0737)	0.340 (0.0768)	0.283 (0.0757)	0.0152 (8.38)	0.0525 (30)	0.856 (72)

TABLE 4.1 : Valeurs moyennes et écart-types des différentes mesures pour les périodes correspondants à avant, pendant et après le stimulus stressant. Les trois dernières colonnes correspondent aux résultats des tests statistiques effectués entre ces différentes périodes.

Avant VS Après. Le tableau montre des différences significatives pour les mesures de vitesse moyenne et d'aspect saccadé du geste. En revanche, aucune différence n'a été trouvée concernant les mesures concernant la force exercée, ni l'axe du majeur du mouvement (seulement une tendance pour poids du premier axe majeur). Ces résultats valident donc nos sous-hypothèses H3-b, H3-c et infirment H3-a, H3-d et H3-e. Certaines des sous-hypothèses étant validées, ces résultats valident l'hypothèse H3.

4.4.4 Analyse et Discussion

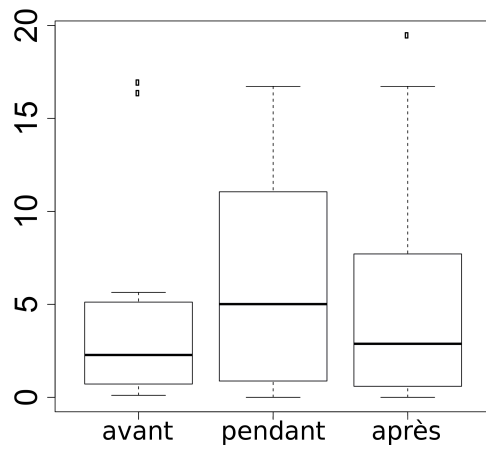
4.4.4.1 Induction de stress

Cette section discute de l'efficacité de l'induction de stress dans notre expérimentation. L'ensemble des sujets reportèrent avoir parfaitement compris la tâche. Il est donc peu probable qu'un changement de comportement observé puisse résulter d'une mauvaise compréhension de la tâche. Bien que simple, cette tâche requiert une réadaptation continue afin d'éviter les obstacles apparaissant à l'écran, évitant à la tâche d'être trop prévisible et donc forcément lassante. Les sujets reportèrent qu'ils se sentaient dominer moins la situation durant le stimulus. Ces résultats sont des indications de stress [Cohen et al. \(1983\)](#); [McIlveen et Gross \(1996\)](#).

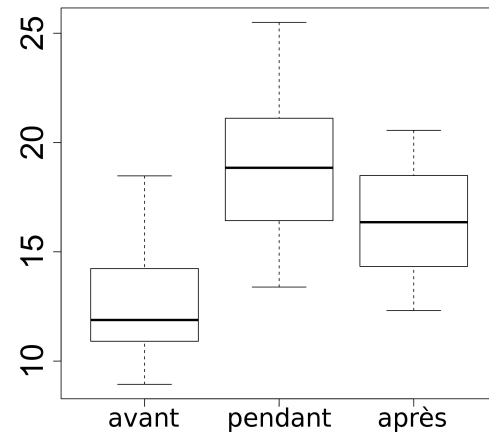
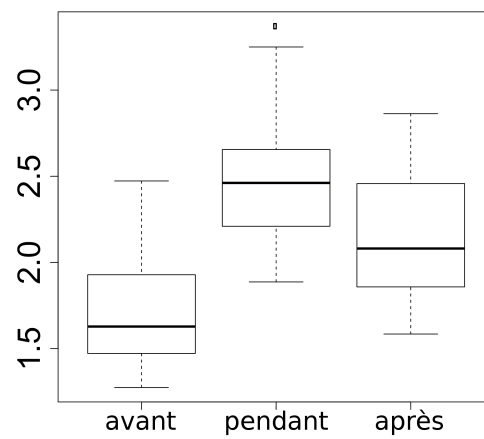
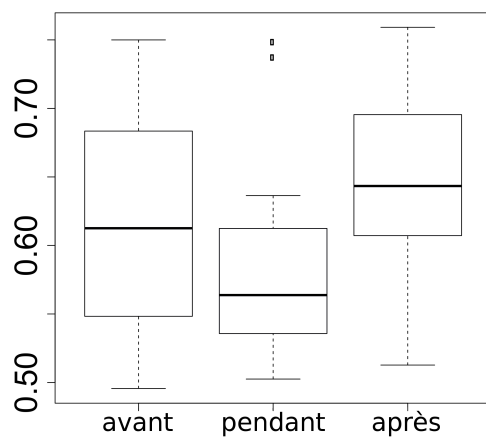
D'après les résultats de l'approche-évitement, les sujets réagirent avec un comportement d'évitement durant le stimulus stressant. Ces résultats sont en accord avec les travaux de [Roelofs et al. \(2009\)](#); [Heuer et al. \(2007\)](#), qui observèrent une tendance à adopter un comportement d'évitement lors d'une induction de stress chez des individus souffrant d'anxiété sociale.

4.4.4.2 Expression haptique du stress

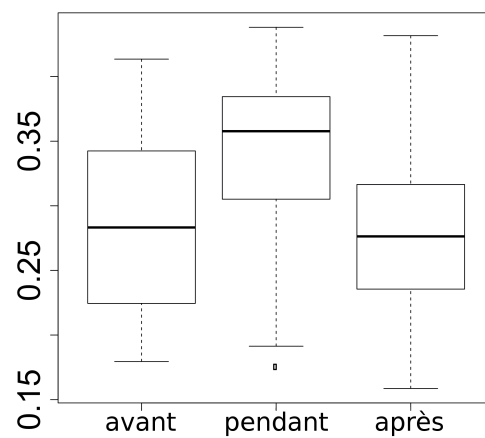
Cette étude a mis en évidence des différences à la fois cinématiques et en forces exercées en cas de stress. Nous n'avons toutefois pas retenu les changements cinématiques observés durant le stimulus stressant, car ils peuvent être dûs à la présence du stimulus et non seulement du stress. Les



(A) Mo3 Pression exercée (N)

(B) Mo4 Vitesse moyenne (cm.s⁻¹)(C) Mo5 Saccades (cm.s⁻²)

(D) Mo6 Poids de l'axe majeur



(E) Mo7 Poids du second axe majeur

FIGURE 4.6: Mesures calculé pour avant, pendant et après stimulus.

obstacles apparaissant aux derniers moments, les sujets devaient en effet réagir plus rapidement. Toutefois, ce que nous avons observé perdure après le stimulus stressant, en particulier pour la vitesse moyenne et l'aspect saccadé de l'expression haptique. Certains sujets ont reportés qu'ils restaient stressés même après la fin du stimulus stressant, car ils pensaient que quelque chose d'autre pouvait arriver à nouveau. L'un d'entre eux a également comparé ceci avec une conduite de nuit, lorsqu'un animal traversant brusquement la route nous met en alerte pour la suite.

Ces résultats sont cohérents avec les travaux de [Yamauchi \(2013\)](#) qui a observé des gestes irréguliers durant un épisode d'anxiété. Certains sujets de notre étude ont par ailleurs reporté après expérimentation qu'ils restaient stressés même après la fin du stimulus stressant car ils pensaient que quelque chose d'autre pouvait survenir.

Concernant la force exercée sur le dispositif, nos résultats ont mis en avant une augmentation de la pression pendant le stimulus. Cependant, la valeur de la force exercée sur le bouton n'avait pas d'influence sur la tâche. Cette augmentation est donc liée à un changement dans le comportement du sujet. Ce résultat est soutenu par d'autres études observant des augmentations de la force exercée sur le bouton d'une souris, dans le cas d'irritation ([Qi et al. \(2001\)](#)) ou de stress ([Hernandez et al. \(2014\)](#)).

En conclusion de cette expérience, le stimulus stressant a induit chez les sujets un changement de comportement kinesthésique. Ce changement transcrit une expression kinesthésique du stress ressenti par les sujets. Bien que nous ayons observé cette expression de manière statistique, nous ne savons pas si elle est perceptible par des individus réels.

4.5 Étude de la perception haptique de la composante cinématique d'expressions de stress

Cette étude se base sur les expressions de stress précédemment collectées. Elle a pour objectif de déterminer si des humains sont capables de discriminer les paramètres cinématiques entre deux expressions : une enregistrée avant un stimulus stressant, et une enregistrée après ce stimulus. Elle vise également à déterminer si des humains sont capables de retrouver, en fonction des paramètres perçus, l'expression qui a été enregistrée après l'induction de stress.

4.5.1 Hypothèses

Nous avons vu en section 4.4 que certains paramètres de l'expression kinesthésiques des sujets variaient lors du stimulus stressant. Sur la base des différences observées, nous posons l'hypothèse que ces différences sont perceptibles par des individus :

H1 Les sujets perçoivent des différences dans la cinématique des expressions haptiques collectées lors de l'expérimentation précédente entre avant et après le stimulus stressant.
En particulier :

H1-a Les sujets perçoivent les gestes plus rapides dans l'expression après le stimulus par rapport à avant.

H1-b Les sujets perçoivent les gestes plus saccadés dans l'expression après le stimulus par rapport à avant.

H1-c Les sujets perçoivent une plus grande étendue du geste que l'axe gauche-droite dans l'expression après le stimulus par rapport à avant.

Notre objectif étant aussi de déterminer si des individus pourront associer ces augmentations de la vitesse moyenne, aspect saccadé et étendue du geste au stress, nous posons également l'hypothèse suivante :

H2 Les sujets perçoivent un stress plus important dans l'expression collectée après le stimulus stressant par rapport à celle collectée avant ce stimulus.

4.5.2 Méthode expérimentale

4.5.2.1 Sujets

15 jeunes sujets droitiers, 25 ans d'âge moyen ($SD = 4.6$, $min = 19$, $max = 37$) ont participé à cette expérimentation. Nous avons restreint cette étude aux hommes, jeunes et droitiers afin d'éviter d'éventuelles différences liées au genre, à l'âge et à la main dominante [Nguyen et al. \(1975\)](#). Par ailleurs, les sujets à cette expérimentation étaient différents de ceux de l'expérimentation 5 afin d'éviter qu'ils ne connaissent le stimulus stressant utilisé. Cette connaissance et le fait qu'ils avaient fait la tâche auraient pu influencer leur réponse.

4.5.2.2 Plateforme expérimentale

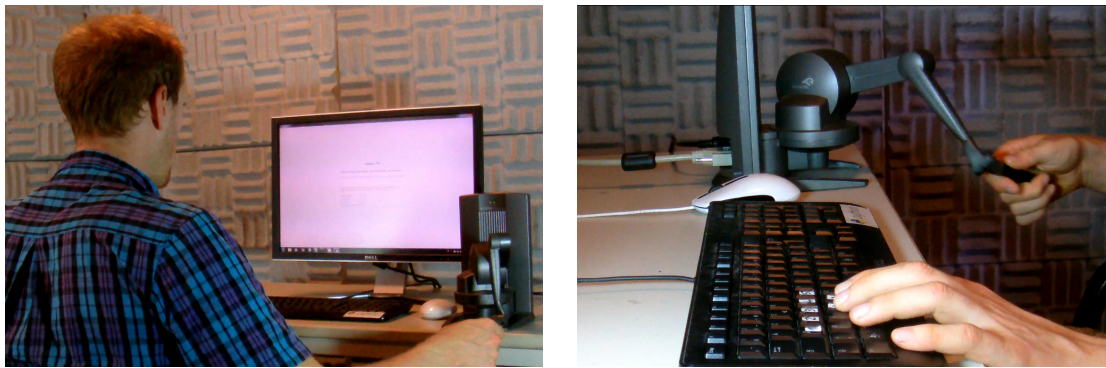
Cette expérimentation se déroule dans la même chambre anéchoïque acoustique que précédemment afin d'éviter tout stimulus visuel ou auditif externe. Une chaise sur laquelle s'assoit le sujet est mise en face d'une table sur laquelle est placé un écran affichant des formulaires à remplir par le sujet.

Cette expérience utilise un Geomagic Touch X décrit en annexe B.1 pour restituer des expressions kinesthésiques (voir figure 4.7a). Ce dispositif permet de générer des expressions d'intensités plus importantes qu'un Geomagic Touch. Des pré-tests ont montré que ce dernier n'est pas assez puissant pour restituer fidèlement les expressions kinesthésiques collectées dans notre étude décrite en 4.4. Ces deux dispositifs sont néanmoins similaires en fonctionnement et possèdent la même interface de programmation, ce qui est essentiel pour ne pas dénaturer les expressions kinesthésiques originales.

Enfin, un clavier permet au sujet de reporter son évaluation des couples d'expressions présentés.

4.5.2.3 Variables

Cette étude utilise deux types de variables. Premièrement, une variable indépendante correspondant au moment où les expressions présentées ont été enregistrées : avant ou après un stimulus



(A) Sujet utilisant un Geomagic Touch X pour percevoir une expression kinesthésique.

(B) Sujet reportant au clavier son évaluation d'un couple d'expressions présenté.

FIGURE 4.7: Sujet interagissant avec la plateforme expérimentale.

stressant. Deuxièmement, la perception du sujet de certains paramètres comme la vitesse, etc. dans les expressions présentées. Ceci nous permettra de déterminer si les différences observées à l'étude précédente entre avant et après stimulus sont perceptibles par des sujets.

Variable indépendante. La variable indépendante de cette étude concerne l'ordre de présentation des expressions kinesthésiques constituant chaque couple. Les deux expressions d'un même couple ont été réalisées par le même sujet de l'expérimentation décrite en 4.4. Une des deux expressions présentées a été extraite durant la période précédant le stimulus stressant, l'autre après le stimulus stressant. Ceci donne lieu à deux conditions expérimentales :

- C1** La première expression kinesthésique présentée a été collectée avant le stimulus stressant. La seconde a été collectée après le stimulus stressant.
- C2** La première expression kinesthésique présentée a été collectée après le stimulus stressant. La seconde a été collectée avant le stimulus stressant.

Afin d'éviter un effet d'apprentissage des sujets, la condition est tirée au hasard pour chaque couple d'expressions présentées aux sujets.

Variables dépendantes. Afin d'évaluer nos hypothèses, nous réalisons les quatre mesures suivantes.

- Ms1 Vitesse moyenne** . Vitesse moyenne de l'expression. Cette mesure vise à évaluer H1-a.
- Ms2 Aspect saccadé** . Variation moyenne de l'accélération dans l'expression. Cette mesure vise à évaluer H1-b.
- Ms3 Expansion** Étendue du geste sur d'autres axes que le gauche-droite. Cette mesure vise à évaluer H1-c et est liée à la mesure du second axe majeur du geste.
- Ms4 Présence de stress** . Présence de stress dans l'expression. Cette mesure vise à évaluer H2.

Toutes ces mesures sont évaluées par les sujets avec des échelle de Likert à 5 points. Après chaque couple d'expression présenté, le sujet reporte la valeur 3 pour la mesure concernée s'il ne perçoit aucune différence entre les deux expressions. Il reporte 1 s'il pense que la première expression présente la plus grande valeur pour la mesure, 5 s'il pense que c'est la seconde expression. Les valeurs 2 et 4 servent à nuancer les réponses.

4.5.2.4 Procédure expérimentale

Présentation de l'expérimentation au sujet. Au début de l'expérimentation, le sujet s'assoit sur la chaise et remplit un court formulaire décrit en annexe A.1 afin de s'assurer qu'il rentre dans nos critères de sélection (jeune, droitier et masculin). Il est informé que l'expérimentation vise à étudier la perception d'expressions haptiques réalisées par des sujets lors d'une expérimentation précédente.

La tâche de conduite utilisée lors de l'étude décrite en 4.4 lui est expliquée. Il réalise l'entraînement de cette tâche afin d'avoir une idée de la forme des expressions qu'il va percevoir. On précise ensuite au sujet que les individus ayant fait l'expérimentation de conduite avaient réalisé la tâche selon deux conditions : une normale comme il vient de le faire, et une après avoir été stressés. La nature de l'induction de stress n'est pas mentionnée.

On explique ensuite au sujet qu'il va avoir à comparer deux expressions kinesthésiques qui lui seront restituées : une enregistrée en condition normale au cours de la tâche de conduire, et l'autre en condition de stress, présentées dans un ordre aléatoire. On explique au sujet que cette comparaison s'effectuera selon quatre critères qui lui sont détaillés : vitesse moyenne, saccades, expansion du geste et enfin lequel d'après lui quelle expression a été enregistrée après induction de stress.

Entraînement. Le sujet réalise un entraînement dans lequel il doit comparer deux expressions de test : *A* et *B*. Le lancement des expressions et le report des notes se fait de la main gauche au clavier, afin que le sujet n'ait pas à relâcher le dispositif haptique durant l'expérimentation (voir figure 4.7b). Le sujet lance en premier l'expression *A*. Une fois que cette expression est jouée, l'interface lui propose de jouer l'expression *B*. Les deux expressions présentées, le sujet peut décider soit de les rejouer une fois chacune, soit de commencer à répondre au questionnaire. Pour chaque critère à évaluer, le sujet attribue une note de 1 à 5. S'il pense que l'expression *A* affiche la plus haute valeur pour ce critère, il doit reporter la note 1. S'il pense que c'est l'expression *B* qui affiche la plus haute valeur, il doit reporter la note 5. Les notes intermédiaires permettent de nuancer la réponse.

Complétion et fin de l'expérimentation. L'expérimentateur sort de la salle pour ne pas influencer le sujet. Le sujet est soumis à seize couples d'expressions kinesthésiques à comparer, chacun présenté une fois et issu d'un des sujet de l'expérimentation de collecte. Une fois qu'il a terminé, un message le remercie de sa participation.

4.5.3 Résultats

Nous avons utilisé un test des rangs signés de Wilcoxon sur les réponses des sujets selon la variable indépendante décrivant la condition expérimentale (C1 ou C2). Les sujets ayant passé chacun une seule de ces deux conditions, ce test s'effectue sur des échantillons indépendants.

Aucune différence significative n'a été trouvée pour la vitesse moyenne (Ms1), l'aspect saccadé (Ms2), l'expansion (Ms3) ou la perception du stress (Ms4) entre C1 et C2. Ce résultat est inattendu car il existe des différences significatives entre avant et après le stimulus stressant pour les mesures de vitesse moyenne et d'aspect saccadé du geste, ainsi qu'une tendance pour le poids de l'axe majeur.

Une explication possible serait que ces différences sur les valeurs mesurées objectivement ne sont pas assez grandes pour être perçues par des humains, au moins pour la plupart des couples d'expressions présentés. Afin de vérifier cette idée, nous avons utilisé un test de corrélation de Spearman entre les mesures objectives collectées dans l'expérimentation précédente et celles subjectives associées de l'expérimentation courante. Pour la vitesse moyenne (Ms1), le test a mis en évidence une bonne corrélation ($p \ll 0.01$, $\rho = 0.686$). Plus la différence entre les vitesses des deux expressions haptiques d'un même couple est élevée, plus cette différence a tendance à être perçue par des sujets. Voir figure 4.8a.

Nous avons également fait des tests de corrélation entre les mesures subjectives perçues et la mesure Ms4 de perception de stress. Ces tests visent à mettre en évidence d'éventuels liens entre la perception de stress et les mesures cinématiques. Le test de corrélation de Spearman a mis en évidence une forte corrélation entre les mesures Ms1 de vitesse moyenne et Ms4 ($p \ll 0.01$, $\rho = 0.825$). Plus les sujets évaluent une expression d'un couple comme étant plus rapide que l'autre, plus les sujets perçoivent le stress dans cette expression. Voir figure 4.8b.

Sur la base de la corrélation entre les mesures objectives et subjectives pour la vitesse moyenne, ainsi que celle entre la vitesse moyenne perçue et le stress, nous avons également pu mettre en évidence une moyenne corrélation ($p = 0.0365$, $\rho = 0.526$) entre les différences objectives de la vitesse moyenne et de stress perçue. Les sujets perçoivent donc le stress dans l'expression présentant la vitesse moyenne la plus élevée. Voir figure 4.8c.

Considérant ces résultats, nous avons filtré la moitié du corpus d'expressions haptiques pour ne garder que les huit couples d'expressions haptiques présentant la plus grande différence de vitesse moyenne entre avant et après le stimulus stressant. Un test des rangs signés de Wilcoxon sur ces données filtrées met en évidence des différences selon la variable indépendante pour les mesures Ms1 ($M = 3.34$, $SD = 1.40$ pour C1, $M = 2.75$, $SD = 1.40$ pour C2, $p = 0.0211$, $W = 2230.5$) et Ms4 ($M = 3.492$, $SD = 1.49$ pour C1, $M = 2.97$, $SD = 1.44$) pour C2, $p = 0.0432$, $W = 2175$). Ces résultats sont illustrées sur la figure 4.9.

Ceci valide partiellement donc notre hypothèse H1 (avec H1-a) et H2.

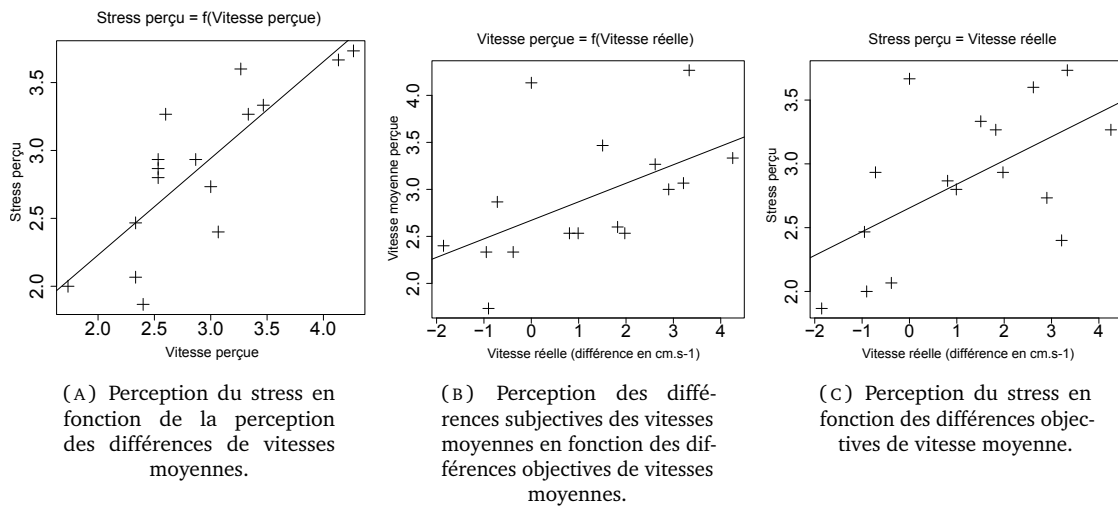


FIGURE 4.8: Corrélations entre les mesures Ms1, Ms2 et les différences objectives dans les forces exercées de chaque couple présenté.

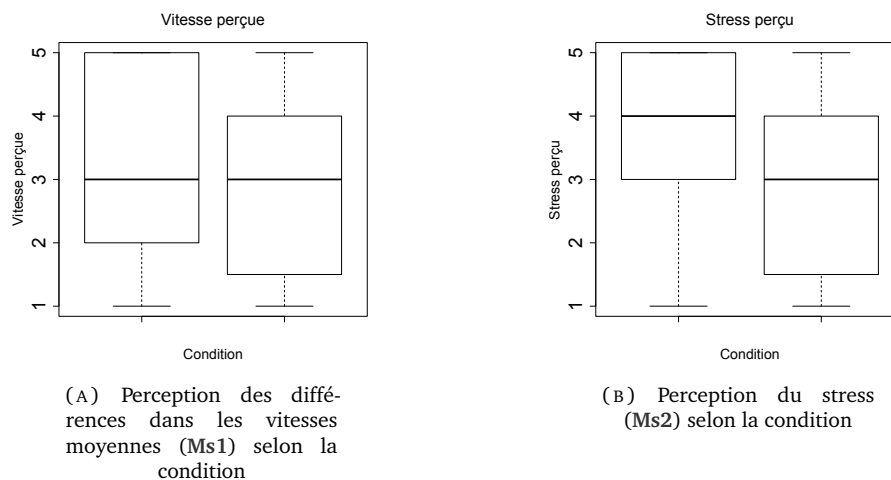


FIGURE 4.9: Différences de perception dans les vitesses moyennes et la perception du stress en fonction de la condition expérimentale. Les sujets ont perçu le stimulus B avec une valeur plus élevée dans la condition C1 pour les deux mesures (réciproquement, le stimulus A pour C2).

4.5.4 Analyse et Discussion

Les mesures d'aspect saccadé (Ms2) et d'expansion du geste (Ms3) n'ont pas présentées de différences significatives entre les deux conditions. Ceci signifie que ces différences n'étaient pas perceptibles par nos sujets.

Après un filtrage sur les différences de vitesses moyennes objectives entre les couples, les résultats ont mis en évidence que les sujets ont attribué pour les mesures de vitesse moyenne (Ms1) et de présence de stress (Ms4) des notes supérieures dans la condition C1 que dans la condition C2. Par ailleurs, une corrélation entre les deux mesures suggère que les sujets attribuent généralement le

stress à l'expression haptique qui présente la vitesse moyenne la plus importante. C'est en accord avec la réalité (voir l'expérimentation 4.4).

En conclusion de cette expérimentation, la vitesse moyenne d'une expression est un critère ayant permis aux sujets de détecter avec succès l'expression enregistrée sous stress.

4.6 Étude de la perception haptique de la composante en intensité de force d'expressions de stress

Cette expérimentation a pour objectif d'évaluer la perception par des humains de l'intensité des forces extraites d'une expression haptique issue d'un stress spontané. De façon plus générale, elle vise à déterminer si des individus sont capables de discriminer des intensités de forces exercées collectées lors d'un épisode de stress spontané de celles collectées sans stress spontané.

4.6.1 Hypothèses

Nous avons vu en section 4.4 que l'intensité de la force exercée sur le bouton du dispositif kinesthésique était significativement plus importante lors du stimulus stressant par rapport à celle exercée avant ce stimulus. Nous posons l'hypothèse que cette différence est perceptible par des individus :

H1 Les sujets perçoivent une intensité de force plus importante dans l'expression collectée pendant le stimulus stressant par rapport à celle collectée avant ce stimulus.

Notre objectif étant aussi de déterminer si des individus pourront associer cette augmentation de l'intensité de la force exercée au stress, nous posons également l'hypothèse suivante :

H2 Les sujets perçoivent un stress plus important dans l'expression collectée pendant le stimulus stressant par rapport à celle collectée avant ce stimulus.

4.6.2 Méthode expérimentale

4.6.2.1 Sujets

15 jeunes sujets droitiers, 25 ans d'âge moyen ($SD = 4.6$, $min = 19$, $max = 37$) ont participé à cette expérimentation. Nous avons restreint cette étude aux hommes, jeunes et droitiers afin d'éviter d'éventuelles différences liées au genre, à l'âge et à la main dominante [Nguyen et al. \(1975\)](#).

4.6.2.2 Plateforme expérimentale

La plateforme expérimentale est similaire à celle de l'expérimentation précédente décrite en 4.5. Elle se situe au même endroit et possède une interface identique pour les sujets. Un changement dans la plateforme pourrait influencer les résultats de cette expérimentation par rapport à la précédente.

La plateforme expérimentale est donc identique à celle décrite en 4.5.2.2, à l'exception du dispositif de rendu haptique. Cette expérimentation vise en effet à rendre sur le pouce des sujets des intensités de forces, ce qui n'est pas faisable avec un Geomagic Touch X. Nous avons développé pour cette expérimentation notre propre dispositif de rendu haptique, baptisé ANGEL et dont les détails techniques sont données en annexe B.3.

4.6.2.3 Variables

Cette étude utilise deux types de variables. Premièrement, une variable indépendante correspondant au moment où les expressions présentées ont été enregistrées : avant ou pendant un stimulus stressant. Deuxièmement, la perception du sujet de l'intensité de la force exercée dans les expressions présentées. Ceci nous permettra de déterminer si la différence d'intensité observée à l'étude précédente entre avant et pendant le stimulus est perceptible par des sujets.

Variable indépendante. La variable indépendante de cette expérimentation concerne l'ordre de présentation des forces constituant chaque couple d'expressions. Les deux intensités de forces d'un même couple ont été réalisées par le même sujet de l'expérimentation décrite en 4.4. Une des deux intensités de forces a été extraite durant la période précédant le stimulus stressant, l'autre pendant le stimulus stressant. Ceci nous conduit à deux conditions expérimentales :

- C1** La première intensité de force présentée au sujet a été collectée avant le stimulus stressant. La seconde a été collectée pendant le stimulus stressant.
- C2** La première intensité de force présentée au sujet a été collectée pendant le stimulus stressant. La seconde a été collectée avant le stimulus stressant.

Afin d'éviter un effet d'apprentissage des sujets, la condition est tirée au hasard pour chaque couple d'intensités de forces présenté aux sujets.

Variables dépendantes. Afin d'évaluer nos hypothèses, nous réalisons les deux mesures subjectives suivantes.

Ms1 Force exercée. Force exercée sur le pouce. Cette mesure vise à évaluer H1.

Ms2 Présence de stress. Présence de stress dans l'expression. Cette mesure vise à évaluer H2.

Toutes ces mesures sont évaluées par les sujets chacune avec une échelle de Likert à 5 points. Après chaque couple de d'intensités de forces présenté, le sujet reporte la valeur 3 pour la mesure

concernée s'il ne perçoit aucune différence entre les deux intensités. Il reporte 1 s'il pense que la première présente la plus grande valeur pour la mesure, 5 s'il pense que c'est la seconde. Les valeurs 2 et 4 servent à nuancer les réponses.

4.6.2.4 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale est similaire à celle de l'expérimentation précédente décrite page 118. Seuls les stimuli et les mesures associées évaluées sont différentes. Cette similitude vise à assurer une compréhension du processus d'évaluation des stimuli identiques pour les sujets.

Présentation de l'expérimentation au sujet. Au début de l'expérimentation, le sujet s'assoit sur la chaise et remplit un court formulaire décrit en annexe A.1 afin de s'assurer qu'il rentre dans nos critères de sélection (jeune, droitier et masculin). Il est informé que l'expérimentation vise à étudier la perception d'expressions haptiques réalisées par des sujets lors d'une expérimentation précédente.

La tâche de conduite lui est expliquée et il en passe l'entraînement pour contextualiser les forces qui vont lui être présentées. On précise ensuite au sujet que les individus ayant fait l'expérimentation de conduite avaient réalisé la tâche selon deux conditions : une normale comme il vient de faire, et une après avoir été stressés. La nature de l'induction de stress n'est pas mentionnée.

On lui explique que dans l'expérimentation courante, il va devoir comparer deux forces qui ont été exercées sur le bouton du dispositif par les sujets de la précédente expérimentation : une enregistrée en condition normale et l'autre en condition de stress, présentées dans un ordre aléatoire. Cette comparaison qu'il devra faire s'effectuera selon deux critères qu'on lui détaille : force exercée et laquelle d'après lui a été enregistrée après induction de stress.

Le sujet s'équipe d'un casque anti-bruit, lui permettant d'écouter les instructions de l'expérimentateur et réduisant le bruit du moteur d'ANGEL (voir figure 4.10). Enfin, le dispositif ANGEL décrit en annexe B.3 est présenté au sujet. Il se calibre au pouce droit du sujet en se positionnant contre lui, selon la procédure décrite en annexe B.3.3.1.

Entraînement. Le sujet réalise un entraînement dans lequel il doit comparer deux intensités de forces exercées de test : A et B . Le lancement des stimuli et le report des notes se fait de la main gauche au clavier, afin que le sujet n'ait pas à relâcher le dispositif haptique durant l'expérimentation. Le sujet lance en premier le stimulus A . Une fois joué, l'interface lui propose de jouer le stimulus B . Les deux stimuli d'intensité de force présentés, le sujet peut décider soit de les rejouer une fois chacun, soit de commencer à répondre au formulaire. Pour chaque critère à évaluer, le sujet attribue une note de 1 à 5, selon qu'il pense que l'expression A (note de 1) ou B (note de 5) affiche la plus haute valeur pour ce critère, les notes intermédiaires permettant de nuancer la réponse.

Complétion et fin de l'expérimentation. L'expérimentateur sort de la salle pour ne pas influencer le sujet. Le sujet est soumis à seize couples de forces exercées à comparer, chacun issu

d'un des sujets de l'expérimentation de collecte. Une fois qu'il a terminé, un message le remercie de sa participation.



FIGURE 4.10 : Sujet interagissant avec la plateforme expérimentale. Il perçoit une intensité de force sur son pouce à l'aide du dispositif ANGEL fixé à la table.

4.6.3 Résultats

Nous avons utilisé un test des rangs signés de Wilcoxon sur nos variables dépendantes selon la variable indépendante décrivant notre condition expérimentale (C1 ou C2).

Pour la mesure de la force exercée (**Ms1**), nous observons une différence entre C1 ($M = 3.62$, $SD = 0.95$) et C2 ($M = 2.29$, $SD = 0.84$), comme le montre la figure 4.11a. Cette différence est hautement significative ($p \ll 0.01$, $W = 5133$). Ceci signifie que les sujets arrivent à percevoir les différences dans les forces exercées entre avant et pendant le stimulus, validant H1.

Ce test a également mis en évidence une différence significative pour la perception de stress (**Ms2**) entre C1 ($M = 3.00$, $SD = 1.07$) et C2 ($M = 2.66$, $SD = 1.05$), voir figure 4.11b. Cette différence est significative ($p = 0.0296$, $W = 3628$). Ceci signifie que les sujets perçoivent le stress dans l'expression où il est effectivement induit, validant H2.

De façon similaire à l'expérience précédente, nous avons effectué des tests de corrélations entre les mesures **Ms1**, **Ms2** et les différences objectives trouvées lors de notre première étude dans les couples de forces exercées. Le test de corrélation de Spearman a mis en évidence une forte corrélation entre **Ms1** et les différences de forces objectives ($p \ll 0.01$, $\rho = 0.898$). Plus la différence de force dans un couple présenté est grande, plus les sujets perçoivent cette différence. Nous avons également une bonne corrélation entre **Ms1** et **Ms2** ($p \ll 0.01$, $\rho = 0.704$), ainsi

qu'entre les différences objectives de forces et le stress perçu ($p \ll 0.01$, $\rho = 0.640$). Les sujets attribuent donc la présence de stress à la force exercée la plus forte. Ces corrélations sont illustrées dans la figure 4.12.

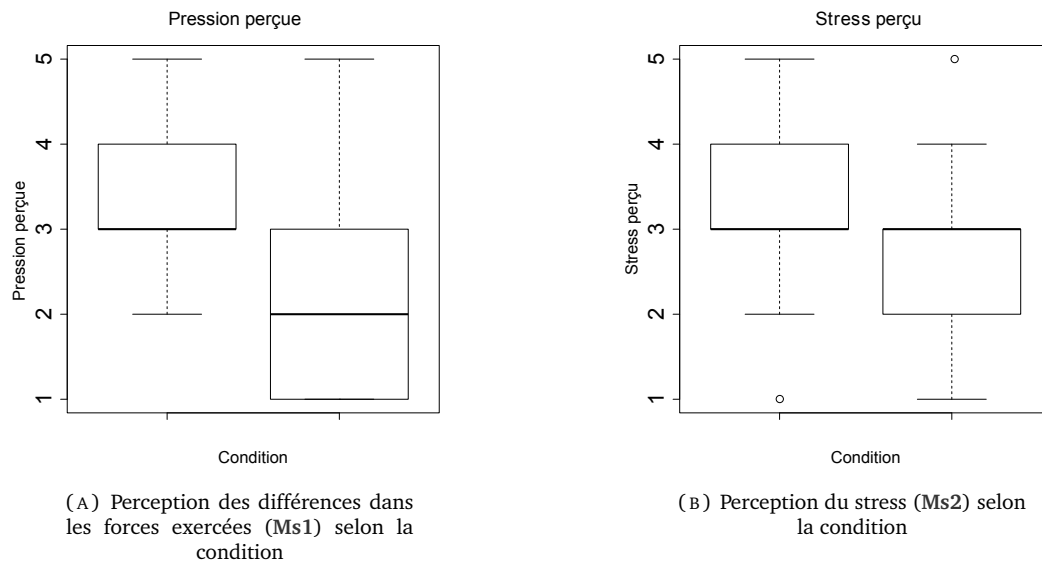


FIGURE 4.11 : Différences de perception dans les forces exercées et la perception du stress en fonction de la condition expérimentale. Les sujets ont perçu le stimulus B avec une valeur plus élevée dans la condition C1 pour les deux mesures (réciproquement, le stimulus A pour C2).

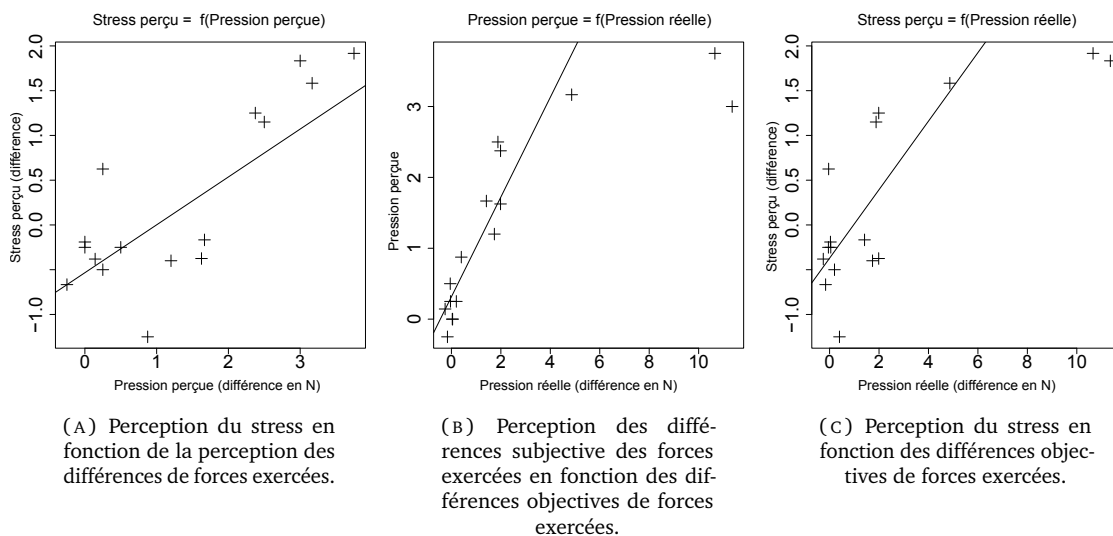


FIGURE 4.12 : Corrélations entre les mesures Ms1, Ms2 et les différences objectives dans les forces exercées de chaque couple présenté.

4.6.4 Analyse et Discussion

Les résultats ont mis en évidence que les sujets attribuèrent pour les mesures **Ms1** et **Ms2** des notes supérieures dans la condition **C1** que dans la condition **C2**. Par ailleurs, une corrélation entre les deux mesures suggère que les sujets attribuent généralement le stress à l'intensité de force la plus importante présentée. C'est en accord avec la réalité, l'étude présentée en 4.4 observant bien une augmentation de l'intensité de la force exercée lors d'un stimulus stressant.

En conclusion de cette étude, l'intensité de la force exercée est un critère ayant permis aux sujets de détecter avec succès laquelle des deux expressions des couples a été enregistrée durant l'induction de stress.

4.7 Conclusion

4.7.1 Résumé des travaux

Les études de ce chapitre avaient pour objectif d'étudier la communication en IHM d'un stress spontané.

Nous avons commencé par proposer différentes tâches pour l'induction d'affects avant d'aboutir à un protocole de collecte d'expression kinesthésique incluant une induction de stress. L'efficacité de cette induction a été réalisée au moyen de différentes méthodes : subjective, comportementale et physiologique.

Grâce à un protocole de tâche de conduite, nous avons pu identifier la manière dont le stress influençait l'expression haptique d'un individu. Les résultats ont en particulier mis en évidence une variation de la vitesse de déplacement, de l'aspect saccadé des gestes ainsi que de l'intensité des forces exercées sur le dispositif.

Dans un second temps, nous avons étudié la perception de ce stress par des humains. Nous avons pu observer que des sujets étaient capables de différencier les expressions enregistrées avant et après le stimulus stressant. A l'aide d'un dispositif de notre conception, nous avons également montré que l'augmentation de la pression exercée sur le dispositif durant l'expérience de collecte était perceptible par des humains. En se basant sur les différences, les sujets ont en moyenne pu retrouver les expressions enregistrées sous stress.

4.7.2 Synthèse et perspectives

L'étude des affects spontanée via la modalité kinesthésique est très récente. Ces dernières expérimentations ont permis de mettre en évidence des différences dans l'expression (humain vers machine) et la perception (machine vers humain) d'un affect spontané. Les deux aspects combinés, nous avons donc montré la possibilité de communiquer du stress par la modalité kinesthésique dans un contexte d'IHM. Bien qu'en parallèle de nos travaux d'autres études ont étudié l'expression kinesthésique de cet affect, le côté perceptif restait inexploré.

L'aspect pratique de ces travaux est multiple : pouvoir communiquer des affects via la modalité haptique (par exemple, évaluer l'urgence d'une demande dans un hôpital en fonction de la pression exercée sur un bouton d'appel) est d'autant plus pertinent que nous avons vu tout au long de nos travaux que la sollicitation de cette modalité permet de calmer les gens. Quoiqu'il en soit, ces résultats pourraient ouvrir la voie à la communication médiée des états affectifs spontanés par la modalité kinesthésique.

Conclusion générale

Au cours de cette thèse, nous avons étudié l'expression et la perception de certains états affectifs par la modalité kinesthésique. Ces états étaient de deux natures : des émotions actées sémantiquement proches et un stress spontané. Dans cette conclusion, nous rappelons nos objectifs de recherches initiaux, ainsi que la contribution apportée afin de répondre à ces objectifs. Enfin, nous proposerons des perspectives à ces travaux.

1 Rappel des objectifs de recherche

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à la communication kinesthésique des émotions dans un contexte d'Interaction Homme-Machine (IHM). Dans ce domaine récent, les travaux actuels tendent principalement à proposer de nouvelles interfaces haptiques permettant de stimuler des parties du corps jusqu'alors inexploitées, avec divers types de stimulations haptiques. L'influence de ces nouvelles stimulations sur la communication affective est discutée dans ces travaux. Étonnamment, une question fondamentale semble rester sans réponse satisfaisante : comment les êtres humains exprimeraient leurs émotions par la modalité haptique, que ce soit de façon actée ou de façon plus spontanée ? En second lieu, on peut aussi se questionner sur l'efficacité de leur façon d'exprimer les émotions pour communiquer des états affectifs particuliers.

Afin de répondre à nos interrogations, nous avons proposé un processus de recherche que nous avons ici divisé en trois étapes. La première de ces étapes portait sur l'**expression** kinesthésique des émotions actées par des êtres humains dans un contexte de poignée de main. Notre objectif était de déterminer si les expressions de certaines émotions sémantiquement proches présentaient des différences entre elles.

La seconde étape portait sur la **perception** par des humains des expressions que nous avons collectées. Au-delà de déterminer l'efficacité de ces expressions pour communiquer des émotions, nous nous sommes penchés sur l'influence de ces expressions sur la perception des émotions dans un couplage avec des expressions faciales. Il s'agissait de déterminer comment l'expression kinesthésique participait à la perception et l'identification d'une émotion exprimée.

Après avoir étudié l'expression et la perception d'émotions actées, la dernière étape concernait l'étude d'états affectifs plus **spontanés**. L'objectif était de déterminer si un état affectif pouvait être communiqué par la modalité kinesthésique en contexte d'IHM. Il s'agissait de caractériser les paramètres influencés par un stress spontané et de déterminer si de réels utilisateurs pouvaient identifier les expressions d'un corpus liées à cet état grâce à ces paramètres.

2 Contribution de cette thèse

Afin de répondre à chacun de ces objectifs, nous avons mené différentes études. Cette section propose de rappeler les contributions que nous avons apportées par rapport à l'état de l'art.

2.1 L'expression kinesthésique des émotions actées

Nous avons dans un premier temps étudié l'expression kinesthésique de huit émotions actées. Nous avons souhaité répondre à certaines limites des travaux actuels. Premièrement, ces travaux se limitent généralement aux émotions de base. Deuxièmement, ils se limitent généralement à des Analyse de Variance (ANOVA) pour discriminer des expressions collectées sur un nombre réduit de paramètres.

Pour répondre à ces limites, nous avons commencé par collecter auprès de sujets un corpus d'expressions kinesthésique de certaines émotions sémantiquement proches. Nous avons extrait de ce corpus des paramètres décrivant les expressions issus de d'autres études sur les modalités kinesthésique et gestuelle. Les résultats ont été comparés à ceux d'autres études similaires.

Sur la base d'une étude des méthodes d'analyse existantes, nous avons proposé une nouvelle méthode en quatre étapes, que nous avons appliquée à notre corpus. Cette méthode permet de prendre en compte la possibilité qu'une même émotion puisse être exprimée de différentes manières, ainsi que de prendre en compte plusieurs paramètres et émotions simultanément.

Nous avons appliqué notre méthode sur notre corpus, mettant en évidence les avantages de cette dernière.

2.2 Reconnaissance multimodale des émotions actées

Dans un deuxième temps, nous avons abordé la perception multimodale des émotions sémantiquement proches dont nous avons étudié l'expression kinesthésique. Pour une grande partie de ces émotions, nous avons mis en évidence que des expressions faciales issues d'un avatar virtuel ne permettaient pas à des sujets de discriminer toutes les émotions.

Nous avons extrait de notre corpus une expression kinesthésique pour chacune des émotions étudiées. Cette extraction s'est effectuée à l'aide d'une approche hybride incluant une partie statistique et une partie perceptive avec sujets. Nous avons ainsi couplé chaque expression kinesthésique retenue à l'expression faciale de l'émotion correspondante afin d'obtenir une expression multimodale faciale-kinesthésique de cette émotion.

Nous n'avons pas observé une amélioration notable des taux de reconnaissances avec ces expressions multimodales par rapport à des expressions monomodales. Une étude approfondie a cependant révélé que pour la plupart des émotions étudiées, les sujets évaluèrent la dimension du plaisir principalement via la composante faciale de l'expression. Similairement, ils évaluèrent la dimension de l'activation principalement via la composante kinesthésique de l'expression. Les émotions avec les plus hautes magnitudes de plaisir (respectivement d'activation) étaient par

ailleurs les mieux reconnues avec des expressions faciales (respectivement kinesthésique). Ces résultats suggèrent qu'une expression kinesthésique de l'émotion serait adaptée pour communiquer la dimension de l'activation d'une émotion.

Par ailleurs, les utilisateurs ont trouvé que les expressions multimodales apportaient une sensation de présence de l'autre, étaient plus expressive et les préféraient à l'expression faciale présentée seule. Ces retours contribuent à suggérer un intérêt à cette intégration de la modalité kinesthésique dans la communication en IHM des émotions.

2.3 Communication kinesthésique d'un stress spontané

Dans un dernier temps, nous nous sommes penchés sur l'expression et la perception kinesthésique en IHM d'un état plus spontané. Les travaux sur l'expression haptique d'un état spontanés sont rares, et aucun n'aborde la perception par des humains de ces expressions.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'élaboration d'un protocole efficace pour collecter des expressions kinesthésiques d'un état affectif spontané. Nous avons abordé les contraintes culturelles et technologiques liées à la modalité haptique. Nous avons ensuite étudié plusieurs protocoles de collecte et déterminé les avantages et inconvénients de chacun afin de proposer un protocole efficace pour l'induction d'un affect spontané.

Nous avons utilisé une tâche de jeu de conduite avec évitement d'obstacles afin d'induire du stress à des sujets. Les résultats ont révélé un changement de comportement kinesthésique, ainsi qu'une augmentation de la pression exercée sur le dispositif permettant de contrôler la voiture. Une évaluation du stress induit a été réalisée.

La plupart de ces différences de comportement ont été perçues par d'autres sujets. Ces sujets ont en particulier été capables de déterminer quelles étaient les expressions kinesthésiques et pressions exercées qui avaient été collectées lors d'un épisode de stress spontané. Ce dernier résultat montre la possibilité de transmettre un état affectif spontané par une communication kinesthésique en IHM.

3 Perspectives de recherche

Chacune des études que nous avons menées a permis de répondre à des questions que nous nous étions posées dans nos objectifs. Elles ont également soulevées de nouvelles questions.

Concernant la méthode d'analyse proposée au premier chapitre, il pourrait être intéressant d'analyser un corpus d'une plus grande taille, ainsi qu'une combinaison de plusieurs outils d'analyse que nous avons utilisés. Par exemple, une Analyse en Composantes Principales (ACP) pourrait être un efficace pré-traitement avant d'utiliser l'algorithme de clustering Espérance-Maximisation (EM) afin de limiter les corrélations entre paramètres étudiés et de réduire leur nombre, rendant l'algorithme de clustering plus efficace. Nous n'avons également pas abordé les aspects dynamiques du mouvements, les paramètres utilisés étant statiques. Une comparaison de notre méthode avec une méthode prenant en compte ces aspects dynamiques pourrait permettre

de mieux décrire nos mouvements, bien que certains de nos paramètres étudiés soient liés à la trajectoire.

Concernant la perception d'expressions multimodales, plusieurs pistes sont également à étudier. La première serait l'amélioration des expressions multimodales présentées. Deux principales limites peuvent avoir influencer les taux de reconnaissance observés. La première est liée à l'aspect statique des expressions faciales employées. Des expressions plus dynamiques pourraient afficher de meilleurs taux de reconnaissances. Par ailleurs, les expressions faciales et kinesthésiques provenaient de corpus différents. Bien que les émotions exprimées soient les mêmes, il serait intéressant que ce soit la même personne qui ait enregistré les expressions faciales et kinesthésiques pour raison de congruence.

Concernant la communication d'un état affectif spontané, la principale limite est le nombre d'affects étudiés, limités au stress. Il pourrait également être intéressant d'étudier l'expression kinesthésique d'affects spontanés dans un contexte d'interaction médiée homme-homme afin de déterminer les spécificités de cette interaction.

L'ensemble des travaux abordés dans cette thèse concernent l'expression et la perception kinesthésique des émotions en contexte d'IHM. Les résultats pourraient servir de base à la création d'un modèle d'interaction pour la conception d'une interface kinesthésique permettant de communiquer efficacement les émotions aux utilisateurs. Les dispositifs de types Geomagic Touch ne permettent pas de collecter ou de restituer l'expression kinesthésique humaine dans son ensemble. Par exemple, il est nativement impossible avec ces dispositifs de collecter ou de restituer des informations telles qu'une pression exercée.

Afin de répondre en partie à cette dernière limite, une perspective serait d'étudier l'expression et la perception kinesthésique des émotions avec un robot humanoïde. De part leur forme, l'expression kinesthésique de ces robots est plus proche de celle d'un être humain. Dans une de nos récentes contributions, nous avons utilisé un robot Meka afin de tester l'influence de la force d'un serrage de main dans la perception affective (Ammi et al. (2015)). Nous avons montré que la force exercée par le robot sur la main de l'utilisateur permettait de discriminer la dimension de la dominance d'une émotion, ce que nous n'avions pas pu faire avec des dispositifs de type Geomagic Touch.

L'ensemble de notre travail a permis de mieux comprendre sur quels paramètres s'effectuent l'expression et la perception des émotions par la modalité kinesthésique dans un contexte d'IHM. Il ouvre également la voie à de nouvelles problématiques de recherche, comme l'intégration de la modalité kinesthésique dans des contextes d'interactions humaines médiées, ou bien la détection de certaines émotions exprimées spontanément par la modalité kinesthésique.

Glossaire

Analyse de Variance (ANOVA)

Famille de méthodes statistiques permettant de déterminer si une variable dépendante et continue est en relation avec une variable indépendante. Deux des tests de cette famille ont particulièrement été utilisés au cours de cette thèse : le test de Friedman et le test des rangs signés de Wilcoxon.

Analyse en Composantes Principales (ACP)

Méthode de la statistique multivariée proposée par [Klema et Laub \(1980\)](#) consiste à transformer des variables liées entre elles (dites "corrélées") en nouvelles variables décorrélées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées axes factoriels. Cette méthode permet de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante.

Décomposition en Valeurs Singulières (DVS)

Outil de factorisation des matrices rectangulaires réelles ou complexes, proposé par [Klema et Laub \(1980\)](#). Ses applications s'étendent du traitement du signal aux statistiques..

Echelle différentielle des émotions (DES)

Instrument standardisé proposé par [Izard et al. \(1974\)](#) pour diviser la description d'une expérience émotionnelle actuelle en catégories discrètes d'émotions. de mesure subjective de l'émotion.

Echelle de mesure du stress perçu (PSS)

Formulaire développé par [Cohen et al. \(1983\)](#) permettant l'évaluation du niveau d'anxiété général d'un individu.

Echelle de Likert

Échelle de jugement proposée par [Likert \(1932\)](#) répandue dans les questionnaires psychométriques par laquelle la personne interrogée exprime son degré d'accord ou de désaccord vis-à-vis d'une affirmation. L'échelle contient en général cinq ou sept choix de réponse qui permettent de nuancer le degré d'accord..

Espérance-Maximisation (EM)

Méthode itérative proposée par [Dempster et al. \(1977\)](#) de détermination du maximum de vraisemblance des paramètres d'un modèle statistique, dépendant de variables latentes non observées. Cette méthode fonctionne en deux étapes. L'étape E (espérance) l'espérance de la vraisemblance en tenant compte des dernières variables observées. L'étape M (maximisation) estime le maximum de vraisemblance des paramètres en maximisant la vraisemblance trouvée à l'étape E.

Haptique

Perception résultant de la stimulation de la peau résultant des mouvements actifs d'exploration de la main entrant en contact avec des objets. Cette perception est aussi parfois nommée tactilo-kinesthésique ([Révész et Wolff \(1950\)](#)).

Interaction Homme-Machine (IHM)

Discipline englobant l'ensemble des aspects de la conception, de l'implémentation et de l'évaluation des systèmes informatiques interactifs. Le terme a été introduit par [Carlisle \(1976\)](#).

International Affective Digital Sounds (IADS)

Corpus de sons développé par [Bradley et Lang \(1999\)](#) visant à induire des émotions.

International Affective Picture System (IAPS)

Corpus d'images développé par [CSEA-NIMH \(1995\)](#) visant à induire des émotions.

Multimodal Affective and Reactive Characters (MARC)

Framework proposé par [Courgeon et al. \(2008\)](#) pour l'interaction temps-réel avec des agents virtuels visuellement réalistes. Ce framework a été en partie développé pour évaluer la perception des émotions exprimées par le visage ou la gestuelle par des utilisateurs.

Plaisir-Activation-Dominance (PAD)

Modèle psychologique développé par [Russell et Mehrabian \(1977\)](#) pour décrire et mesurer les états émotionnels. Ce modèle utilise trois dimensions pour représenter les émotions : le plaisir, l'activation et la dominance, représentant respectivement l'aspect plaisant, l'intensité et l'aspect dominant d'une émotion.

State-Trait Anxiety Inventory (STAI)

Questionnaire développé par [Spielberger \(1983\)](#) visant à évaluer l'anxiété du sujet. Il en existe deux versions : le state-anxiety, évaluant l'état d'anxiété courant du sujet, et le trait-anxiety, évaluant son état habituel d'anxiété. Cette dernière version est notamment liée au stress habituel..

Test de Corrélation de Spearman

La corrélation de Spearman, nommée d'après Charles Spearman, consiste à trouver un coefficient de corrélation, non pas entre les valeurs prises par les deux variables mais entre les rangs de ces valeurs. Elle permet de repérer des corrélations monotones. Il faut également souligner que la corrélation de Spearman utilise les rangs plutôt que les valeurs exactes..

Test de Friedman

Test statistique proposé permettant de déterminer l'influence d'une variable indépendante sur une variable dépendante.

Test des Rangs Signés de Wilcoxon

Test statistique proposé par [Wilcoxon \(1945\)](#) permettant de déterminer si une variable dépendante varie entre deux valeurs d'une variable indépendante.

Vallée Dérangée

Hypothèse proposée par [Mori \(1970\)](#) selon laquelle un physique ou un mouvement d'apparence humain presque naturel, mais pas tout à fait, cause une réaction de rejet chez certains êtres humains.

**QUESTIONNAIRES POUR
L'ÉVALUATION DE LA RÉPONSE
ÉMOTIONNELLE**

Question	Réponses proposées	Études concernées
Genre	- Homme - Femme	Chapitre 1, expression kinesthésique des émotions actées Chapitre 2, perception faciale, kinesthésique et multimodale des émotions Chapitre 4, expression, perception kinesthésique et tactile d'un stress spontané
Âge	-	Chapitre 1, expression kinesthésique des émotions actées Chapitre 2, perception faciale, kinesthésique et multimodale des émotions Chapitre 4, expression, perception kinesthésique et tactile d'un stress spontané
Votre main dominante est	- À droite - À gauche	Chapitre 1, expression kinesthésique des émotions actées Chapitre 2, perception faciale, kinesthésique et multimodale des émotions Chapitre 4, expression, perception kinesthésique et tactile d'un stress spontané
Éducation culturelle	- Africaine - Amérique du Nord - Amérique du Sud - Asiatique - Européenne	Chapitre 1, expression kinesthésique des émotions actées Chapitre 2, perception faciale, kinesthésique et multimodale des émotions
Avez-vous déjà utilisé un bras haptique ?	- Jamais - Occasionnellement - Souvent	Chapitre 1, expression kinesthésique des émotions actées Chapitre 2, perception faciale, kinesthésique et multimodale des émotions Chapitre 4, expression, perception kinesthésique d'un stress spontané

FIGURE A.1 : Formulaire de collecte des informations de bases sur les sujets concernant nos différentes études. En plus de ces informations, les noms et prénoms des sujets sont collectés, mais remplacés par des numéros d'anonymat lors des analyses.

Enregistrement 1 / 8

Émotions à enregistrer : Exaltation, Inquiétude, Rage, Mépris, Irritation, Dégoût, Joie, Peur.

Enregistrez un mouvement qui exprime le mieux possible l'émotion ressentie dans la situation suivante :

Vous éprouvez de l'exaltation lorsque vous venez de gagner une voiture de course.

Vous n'avez le droit qu'à un seul essai.

Arrêter
[E]

Jouer
[Espace]

Le bras haptique est utilisable.

Pensez-vous que le geste que vous avez proposé représente bien l'émotion "Exaltation" ? Indiquez une note, en cochant une des cases, allant de "pas du tout" à "tout à fait" :

Note pas du tout ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ tout à fait

Continuer [c]

FIGURE A.2: Formulaire utilisateur pour l'étude des expressions kinesthésiques des émotions, présentée en 2.3. Ce formulaire permet au sujet d'enregistrer une expression kinesthésique puis de l'évaluer.

Expression 1 / 8

Cliquez sur le bouton ci-dessous pour visualiser l'expression. Vous pouvez la rejouer autant de fois que vous le souhaitez.

Jouer l'expression faciale

À votre avis, cette expression correspond à l'émotion :

- ☐ Peur
On éprouve de la peur lorsqu'on entend gratter à la fenêtre en pleine nuit.
- ☐ Irritation
On éprouve de l'irritation lorsque l'homme juste à côté tapote sans arrêt la table.
- ☐ Mépris
On éprouve du mépris lorsqu'on voit une personne riche se moquer d'un sans-abri.
- ☐ Rage
On éprouve de la rage lorsqu'on découvre que sa voiture a été forcée et que des objets ont été volés.
- ☐ Dégoût
On éprouve du dégoût lorsqu'on s'aperçoit avoir marché dans un excrément.
- ☐ Exaltation
On éprouve de l'exaltation lorsqu'on vient de gagner une voiture de course.
- ☐ Joie
On éprouve de la joie lorsque l'on passe un moment agréable avec ses amis.
- ☐ Surprise
On éprouve de la surprise lorsqu'on voit son frère conduire une voiture de sport.
- ☐ Inquiétude
On éprouve de l'inquiétude lorsqu'on pense qu'on va rater son examen.

Continuer [Ctrl]

FIGURE A.3 : Formulaire utilisateur pour l'étude de la perception des émotions avec des expressions faciales, présentée en 3.3. Ce formulaire permet au sujet de jouer une expression faciale, puis de reporter l'émotion qu'il a perçu dans cette expression.

Mouvement 1 / 32

1. D'après vous, quelle émotion le mouvement que vous avez perçu exprime-t-il ?
Si vous doutez, vous avez le droit de cocher 2, voire 3 émotions.

☐ Joie
☐ Exaltation
☐ Dégoût
☐ Mépris
☐ Inquiétude
☐ Peur
☐ Irritation
☐ Rage

2. L'émotion exprimée par le mouvement semble-t-elle :

très négative ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ très positive

très passive ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ très active

pas du tout dominante ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ très dominante

Continuer [Ctrl]

FIGURE A.4: Formulaire utilisateur pour l'étude de la perception des émotions avec des expressions kinesthésiques, présentée en 3.4. Ce formulaire permet au sujet de reporter quelles émotions il a perçu dans l'expression kinesthésique présentée, en cochant les labels des émotions concernées ainsi qu'une évaluation dans l'espace Plaisir-Activation-Dominance (PAD), chaque dimension étant évaluée sur une échelle de Likert à 5 points.

Expression 8 / 8

1. D'après vous, quelle émotion l'expression faciale et le mouvement associé que vous avez perçu expriment-ils ? Si vous doutez, vous avez le droit de cocher plusieurs émotions.

- ☐ Irritation
- ☐ Exaltation
- ☐ Joie
- ☐ Peur
- ☐ Mépris
- ☐ Rage
- ☐ Inquiétude
- ☐ Dégoût

2. L'émotion exprimée par l'expression faciale et le mouvement associé semble-t-ils :

très négative ☐ ☐ ☐ ☐ ☒ très positive

très passive ☐ ☐ ☐ ☐ ☒ très active

pas du tout dominante ☐ ☐ ☐ ☐ ☒ très dominante

3. Avez-vous confiance en vos réponses pour cette expression faciale et ce mouvement associé ?

Pas du tout confiance ☐ ☐ ☐ ☐ ☒ Tout à fait confiance

Continuer [Ctrl]

FIGURE A.5 : Formulaire utilisateur pour l'étude de la perception des émotions avec des expressions multimodales, présentée en 3.5. Ce formulaire permet au sujet de reporter quelles émotions il a perçu dans l'expression multimodale présentée, en cochant les labels des émotions concernées ainsi qu'une évaluation dans l'espace PAD, chaque dimension étant évaluée sur une échelle de Likert à 5 points. Le sujet reporte également son niveau de confiance dans sa réponse.

Questions sur l'étape courante

J'ai trouvé la combinaison avatar et mouvement expressive.

FD ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ FA

J'ai ressenti la présence d'une autre personne que moi dans la pièce.

FD ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ FA

J'ai ressenti que l'autre personne était consciente de ma présence.

FD ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ FA

La pensée que l'autre personne n'était pas réelle m'a souvent traversée l'esprit.

FD ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ FA

La personne m'est apparue douée de sensations (consciente et vivante).

FD ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ FA

Continuer [Ctrl]

FIGURE A.6: Formulaire utilisateur pour l'évaluation de l'expressivité et du niveau de présence ressenti dans des expressions (faciales, kinesthésiques ou les deux couplées) lors de l'étude présentée en 3.5. Chaque évaluation est effectuée sur une échelle de Likert à 5 points.

Comparaison entre les étapes

Quel mode de rendu avez-vous le plus préféré ?

- ☒ personnage virtuel seul
- ☐ retour d'effort seul
- ☐ personnage avec retour d'effort

Pensez-vous le dispositif haptique utile pour la communication / perception d'émotions ?

- ☒ oui
- ☐ non

Terminer [Ctrl]

FIGURE A.7 : Formulaire utilisateur pour l'évaluation de la modalité d'expression préférée et de l'intérêt de la modalité kinesthésique pour exprimer des émotions lors de l'étude présentée en 3.5.

AUTORISATION D'UTILISATION DE DONNEES

Je soussigné, Mlle/Mme/M, autorise la collecte de mes données suivantes :

Capture vidéo du visage.

Conductance électrodermale.

Cette autorisation est restreinte au cadre de l'expérimentation tenant place à :

LIMSI-CNRS
B.P. 133
91403 ORSAY CEDEX

Au cours de l'été 2013.

J'ai connaissance que ces données seront collectées dans un but unique de recherche scientifique. J'ai également connaissance que ces données ne seront pas diffusées et seront traitées de manière anonyme.

Je reconnais que les utilisations prévues ne peuvent porter atteinte à ma vie privée, et plus généralement, ne sont pas de nature à me nuire ou à me causer un préjudice.

Ces dispositions sont portées à ma connaissance, dans le cadre de l'application de la législation relative au respect de la vie privée.

Fait à Le

Signature

FIGURE A.8: Formulaire d'autorisation pour l'enregistrement des données comportementales et physiologiques lors de l'étude 4.4.

VOTRE ETAT D'ESPRIT **HABITUEL**

DATE :

COND :

ID :

Un certain nombre de phrases que l'on utilise pour se décrire sont données ci-dessous. Lisez chaque phrase, puis **reportez le numéro correspondant** le mieux à ce que vous ressentez **GENERALEMENT**. Il n'y a pas de bonnes ni de mauvaises réponses. Ne passez pas trop de temps sur l'une ou l'autre de ces propositions et indiquez la réponse qui décrit le mieux vos sentiments **HABITUELS**.

	NON 1	PLUTOT NON 2	PLUTOT OUI 3	OUI 4
1.	Je me sens de bonne humeur, aimable.			1. __
2.	Je me sens nerveux (nerveuse) et agité(e).			2. __
3.	Je me sens content(e) de moi.			3. __
4.	Je voudrais être aussi heureux (heureuse) que les autres semblent l'être.			4. __
5.	J'ai un sentiment d'échec.			5. __
6.	Je me sens reposé(e).			6. __
7.	J'ai tout mon sang-froid.			7. __
8.	J'ai l'impression que les difficultés s'accumulent à un tel point que je ne peux plus les surmonter.			8. __
9.	Je m'inquiète à propos de choses sans importance.			9. __
10.	Je suis heureux(se).			10. __
11.	J'ai des pensées qui me perturbent.			11. __
12.	Je manque de confiance en moi.			12. __
13.	Je me sens sans inquiétude, en sécurité, en sûreté.			13. __
14.	Je prends facilement des décisions.			14. __
15.	Je me sens incompetent(e), pas à la hauteur.			15. __
16.	Je suis satisfait(e).			16. __
17.	Des idées sans importance trottant dans ma tête me dérangent.			17. __
18.	Je prends les déceptions tellement à coeur que je les oublie difficilement.			18. __
19.	Je suis une personne posée, solide, stable.			19. __
20.	Je deviens tendu(e) et agité(e) quand je réfléchis à mes soucis.			20. __

FIGURE A.9 : Formulaire State-Trait Anxiety Inventory (STAI) pour évaluer l'anxiété habituelle du sujet, utilisée lors de l'étude présenté en 4.4.

Questionnaire

ID :

1. Pour chacune des affirmations proposées liées au déroulement de l'expérience, indiquez par une note combien vous êtes d'accord avec cette affirmation :

DESACCORD	PLUTOT EN DESACCORD	NI D'ACCORD NI EN DESACCORD	PLUTOT D'ACCORD	D'ACCORD
1	2	3	4	5

	1	2	3	4	5
1. J'ai rapidement compris la tâche demandée.					
2. J'ai été dérangé(e) par un événement inattendu.					
3. J'ai senti que je dominais la situation (avant la réduction de la visibilité).					
4. J'ai senti que je dominais la situation (après la réduction de la visibilité).					

2. Pour chacun des instants suivants, décrivez votre état émotionnel.

1 signifie que vous n'êtes pas du tout dans l'état proposé, 5 que vous êtes tout à fait dans cet état.

a. Avant la réduction de la visibilité, je me sentais :

	1	2	3	4	5
Content(e)					
Triste					
Etonné(e)					
Alerte					
Stressé(e)					
Attentif(ve)					
Joyeux(se)					
Surpris(e)					
Découragé(e)					
Ravi(e)					
Abattu(e)					
Concentré(e)					
Stupéfait(e)					

T.S.V.P.

b. Pendant la réduction de la visibilité, je me sentais :

	1	2	3	4	5
Content(e)					
Triste					
Etonné(e)					
Alerte					
Stressé(e)					
Attentif(ve)					
Joyeux(se)					
Surpris(e)					
Découragé(e)					
Ravi(e)					
Abattu(e)					
Concentré(e)					
Stupéfait(e)					

(B) Feuille 2

FIGURE A.9 : Formulaire d'évaluation subjectif de stress induit proposé au sujet en fin de l'étude présentée en 4.4. Ce formulaire est inspiré de l'Echelle de mesure du stress perçu (PSS) et de l'Echelle différentielle des émotions (DES).

Stimulus 1/16

Appuyez sur 'A' pour lancer le premier stimulus. Ne lâchez pas le bras durant sa lecture.

Appuyez sur 'B' pour lancer le second stimulus. Ne lâchez pas le bras durant sa lecture.

Lequel des deux mouvements affichait la plus haute valeur sur les critères suivants ?
Donnez une valeur de 1 à 5 [1 = plutôt le A, 5 = plutôt le B]

Vitesse moyenne du geste : 4

Aspect saccadé du geste : 4

Expansion du geste : 1 2 3 4 5

Présence de stress : 1 2 3 4 5

FIGURE A.10 : Formulaire d'évaluation d'expressions kinesthésiques de stress par des sujets pour l'étude présentée en 4.5.

Stimulus 11/16

Appuyez sur 'A' pour lancer la première pression.

Appuyez sur 'B' pour lancer la seconde pression.

Laquelle des deux pressions affichait la plus haute valeur sur les critères suivants ?
Donnez une valeur de 1 à 5 [1 = plutôt la A, 5 = plutôt la B]

Pression : 1 2 3 4 5

Présence de stress : 1 2 3 4 5

FIGURE A.11 : Formulaire d'évaluation de pressions exercées exprimant du stress par des sujets pour l'étude présentée en 4.6.

PRÉSENTATION DES DISPOSITIFS HAPTQUES UTILISÉS

B.1 Geomagic Touch et Geomagic Touch X

Notre travail portant sur la collecte et la restitution d'expressions kinesthésiques 3D des émotions, nous nous sommes orientés pour nos études sur l'utilisation de bras haptiques à retour d'effort. Ce type d'interface est généralement constitué d'un effecteur terminal tenu en main par un utilisateur. Cet effecteur est attaché à une structure rigide, articulée et motorisée permettant de connaître la position de l'effecteur dans l'espace de travail 3D, ainsi que d'exercer des forces perceptibles par l'utilisateur.

Bien que de multiples bras à retour d'efforts ont été proposés, nous présenterons seulement ceux que nous avons utilisés dans cette thèse : le Geomagic Touch et le Geomagic Touch X, dont les caractéristiques techniques sont fournies dans le tableau B.1. Ces deux dispositifs ont été développés pour la manipulation d'objets en environnement virtuel. De ce fait, ils offrent un espace de travail, précision et force exercée adaptés à la collecte et à la restitution d'expressions kinesthésiques dans l'espace 3D.

Spécifications	Geomagic Touch	Geomagic Touch X
Image du dispositif		
Espace de travail (cm)	16 l × 120 h × 70 p	16 l × 12 h × 12 p
Force maximale (N)	3.3	7.9
Connectique	FireWire	Parallel port
Compatible OpenHaptics	Oui	Oui

TABLE B.1 : Caractéristiques techniques des Geomagic Touch.

Afin de contrôler ces dispositifs, nous avons réalisé une librairie bas-niveau développée en C++ et utilisant l'API OpenHaptics. Notre librairie permet de :

- Récupérer la position x , y et z de l'effecteur terminal du dispositif.
- Commander au dispositif d'exercer une force f_x , f_y et f_z .
- Connecter/déconnecter le dispositif.
- Calibrer le dispositif.

Pour le besoin de nos études, nous appelons notre librairie depuis une librairie haut-niveau développée en Python. Cette librairie permet de facilement :

- Contrôler jusqu'à quatre dispositifs haptiques.
- Collecter une succession de positions au cours du temps (collecte d'une expression kinesthésique).
- Restituer une succession de positions au cours du temps (restitution d'une expression kinesthésique).

Tout en s'affranchissant des problèmes bas-niveau comme la synchronisation et la calibration des dispositifs impliqués.

B.2 Capteur de pression

Notre première étude du chapitre 4 décrite en 4.4 requiert la mesure de paramètres cinématiques, ainsi que de l'intensité des forces exercées. Les dispositifs Geomagic Touch décrivent ci-dessus permettent de calculer les paramètres cinématiques d'une expression à partir de suite de points dans l'espace 3D qui la compose. Ce dispositif ne permet en revanche pas de mesurer l'intensité de la force qu'exerce sur lui l'utilisateur. Nous avons donc pour nos besoins augmenté un Geomagic Touch d'un dispositif de notre conception permettant de capturer l'intensité de cette force.

Nous avons utilisé un capteur de force FlexiForce SEN-08713 <http://www.flexiforce.com/>. Ce capteur est connecté à un adaptateur Flexiforce permettant de pré-traiter le signal, qui sera ensuite envoyé à une carte Arduino. La carte Arduino alimente le capteur Flexiforce en électricité et en récupère la sortie, envoyée sur le port USB de l'ordinateur (voir figure B.1a). Nous avons enfin fixé le capteur Flexiforce à un bouton du dispositif Geomagic Touch, comme illustré sur la figure B.1b.

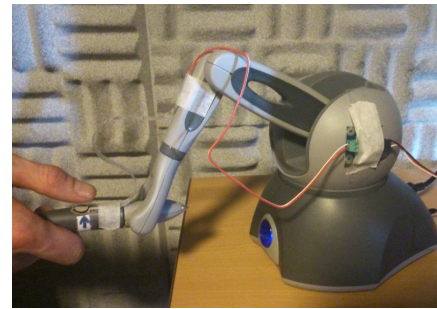
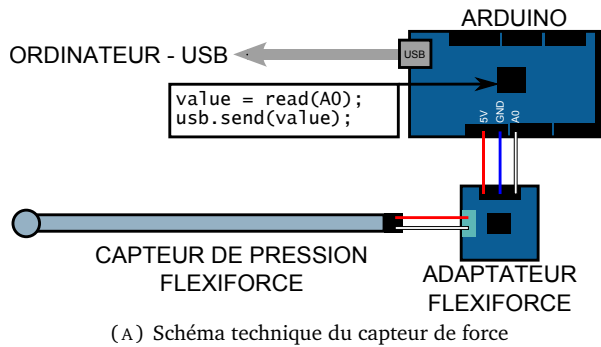


FIGURE B.1 : Augmentation d'un Geomagic touch par un capteur d'intensité de force exercée.

B.3 Restitution de pression

La dernière étude du chapitre 4 décrite en 4.6 nécessite de restituer des intensités de forces exercées sur le doigt des sujets (voir figure B.2a). Les dispositifs Geomagic Touch ne permettent pas de restituer de telles informations. Nous avons donc décidé de créer notre propre dispositif, en prenant en compte que le dispositif doit être mobile et léger pour pouvoir être monté sur un Geomagic Touch.

B.3.1 Conception

Afin de restituer une force sur un doigt, il est nécessaire d'avoir un dispositif rentrant en contact avec les utilisateurs et exerçant une force dessus. Nous avons repris l'idée générale de [Tan et al. \(1994\)](#) qui consistait à attacher un fil relié à une masse autour du doigt de l'utilisateur. Cependant, ce fonctionnement est trop basique pour nous. En particulier, il est nécessaire de pouvoir contrôler de façon dynamique la force appliquée sur le doigt des utilisateurs.

[Bianchi et al. \(2014\)](#) a récemment développé un système similaire mais incluant deux moteurs : un de chaque côté du doigt. En les faisant tourner dans le même sens, ce dispositif permet d'appliquer un contact de frottement sur le doigt de l'utilisateur. En faisant tourner les deux moteurs en sens contraire, il est alors possible d'exercer une force sur ce doigt. Ceci dit, pour appliquer une force sans qu'il n'y ait aucun frottement, il faut que les deux moteurs soient parfaitement synchronisés. En outre, deux moteurs rajoutent du poids et de l'encombrement au dispositif par rapport à un seul moteur.

Sur la base de ces considérations de design, nous avons imaginé un dispositif doté d'un unique moteur placé en dessous du doigt de l'utilisateur (voir figure B.2b). La figure B.2c montre une photographie du prototype réalisé correspondant.

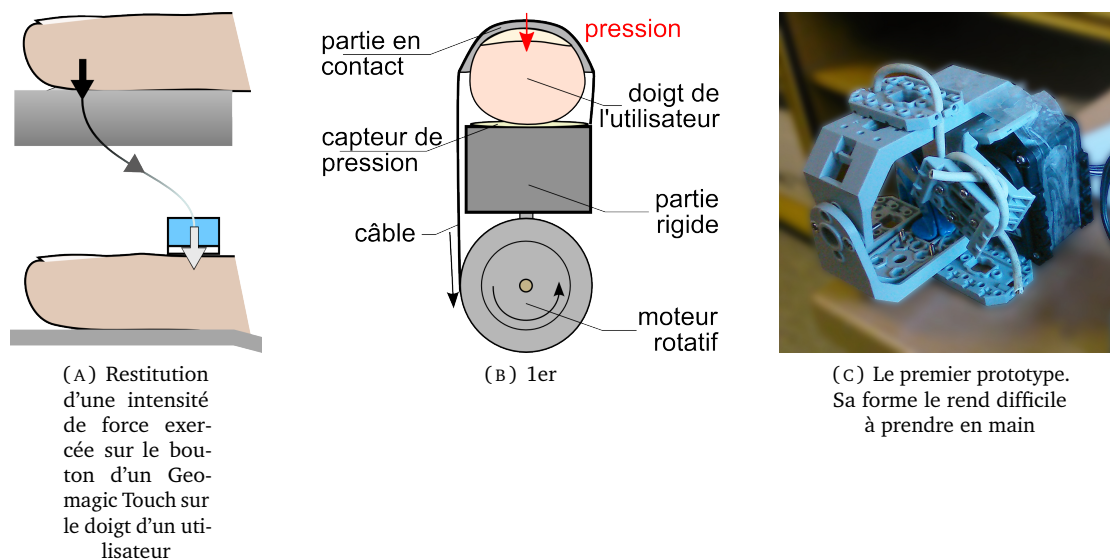


FIGURE B.2 : Principe de restitution d'une intensité de force. une pression : une affaire de force.

B.3.2 Réalisation matérielle

B.3.2.1 Structure matérielle

Le corps du dispositif est réalisé à partir d'un kit Bioloid¹. La partie inférieure du dispositif constitue le support du moteur.

La partie haute du dispositif accueille les doigts de l'utilisateur. Elle est constituée d'une partie fixe tenue par l'utilisateur et d'une partie mobile imprimée en 3D, permettant d'exercer une pression sur le pouce de l'utilisateur. Cette partie mobile est reliée au moteur grâce à un fil de pêche. Le fil de pêche est à la fois flexible et résistant, permettant de supporter une pression importante.

Lorsque la partie mobile descend, un cylindre plastique exerce une pression sur le pouce de l'utilisateur. Nous appellerons ce cylindre par la suite *effecteur terminal*. Une partie en mousse est fixée sur l'effecteur terminal afin de ne pas faire mal au participant lorsqu'il appuie sur son doigt. Une image de ce dispositif est illustré dans la figure B.3a.

B.3.2.2 Contrôle du moteur

Un contrôleur Robotis CM-510 permet de contrôler le moteur Dynamixel AX-12A utilisé par ANGEL. Afin de relier le contrôleur à l'ordinateur par port USB, un dispositif USB2Dynamixel est utilisé. Ce dispositif est fourni avec une API écrite en langage python, que nous utilisons afin de contrôler la position du moteur. La figure B.3a illustre le schéma de fonctionnement du moteur.

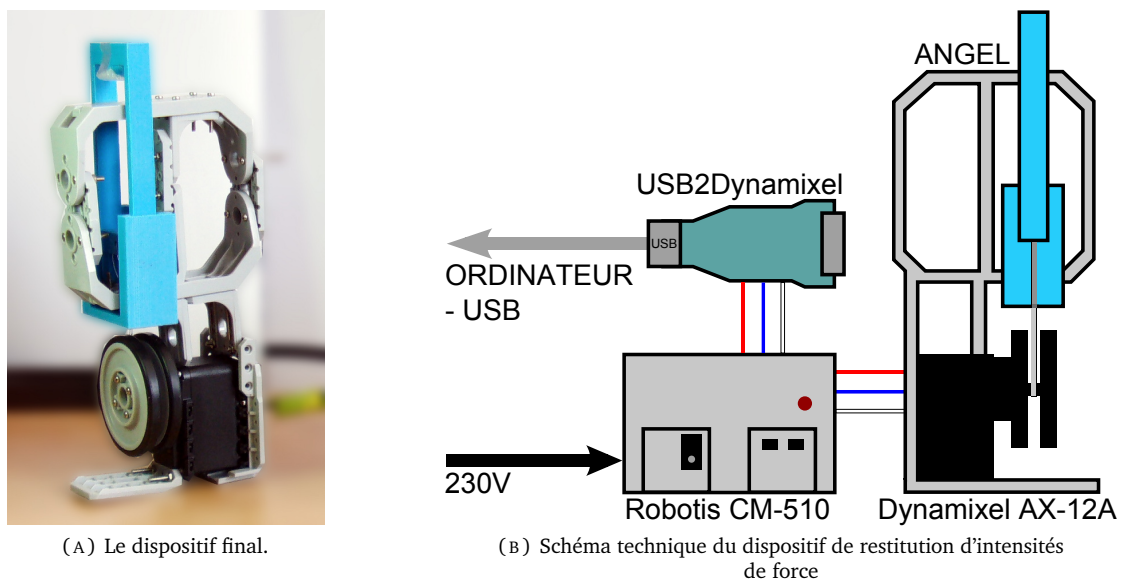


FIGURE B.3: Le dispositif ANGEL.

1. http://www.robotis.com/xe/bioloid_en

B.3.3 Mise en service

Cette section décrit les procédures nécessaires à l'utilisation du dispositif réalisé.

B.3.3.1 Procédure de calibrage

Chaque être humain possède sa propre morphologie, en particulier chacun possède sa propre taille et forme de pouce. Notre dispositif doit pouvoir s'adapter à ces différentes formes afin d'offrir un rendu de stimuli le plus uniforme possible entre les différents individus. C'est pourquoi nous avons mis au point une procédure de calibrage du dispositif.

Le calibrage doit permettre d'indiquer au dispositif à partir de quelle position du moteur l'effecteur terminal entrera en contact avec leur pouce. Nous appelons cette position particulière propre à chaque individu la *position de contact*. Pour déterminer cette position, nous fixons le capteur de force présenté en annexe B.2 au dessous de l'effecteur terminal. Nous demandons au sujet de placer son pouce dans l'ouverture et appliquons au contrôleur d'ANGEL l'algorithme suivant :

```
position_contact = 0;
Tant que (capteur_pression.getValue() < 10): // pas de contact avec le capteur
    position_contact++; // position suivante du moteur, serrant un cran de plus
    angel_motor.setPosition(position_contact, bloquant = FAUX);
    attendre(0.03);
```

Il est nécessaire que l'allée à la position ne soit pas bloquant. Il est possible qu'après un incrément de seulement 1, le contrôleur considère que le moteur a déjà atteint sa position finale et ne le fait pas bouger pas. Si l'appel était bloquant, le programme tournerait alors indéfiniment. On met cependant un temps d'attente entre chaque itération car le mouvement du moteur étant lent par rapport à l'exécution du programme, on doit éviter que `position_contact` ne s'incrémente trop rapidement. Nous nommons la procédure consistant à déterminer la valeur de `position_contact` pour un utilisateur particulier *procédure de calibrage*.

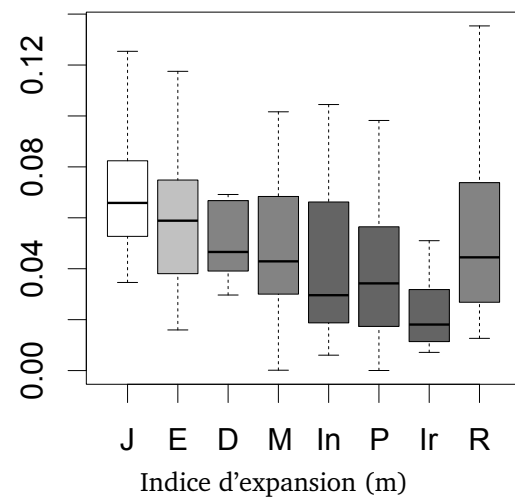
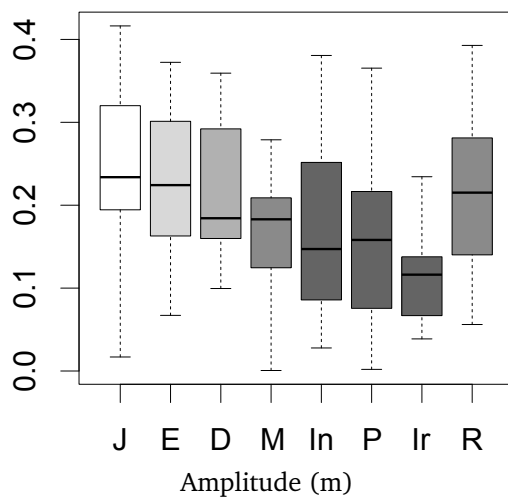
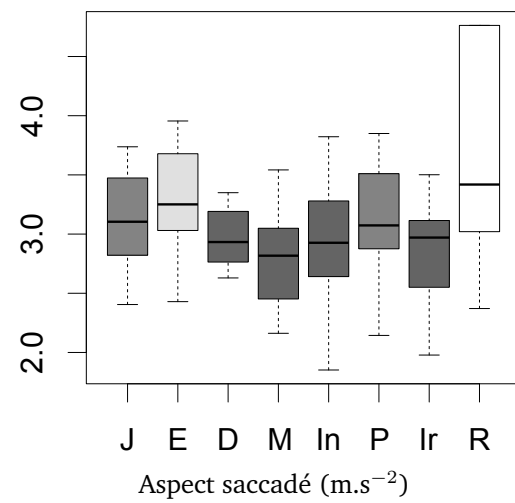
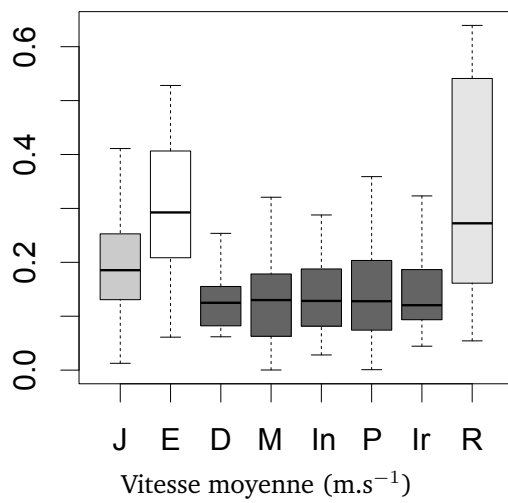
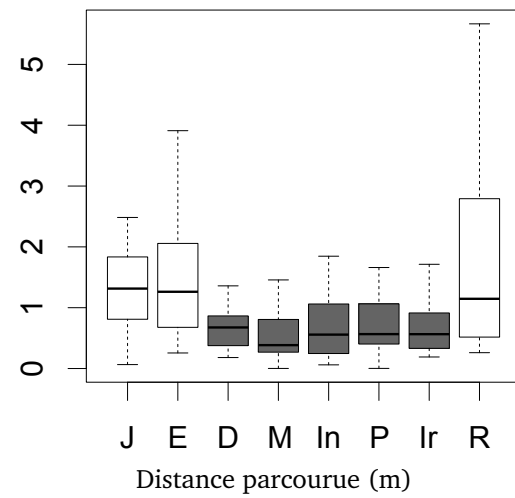
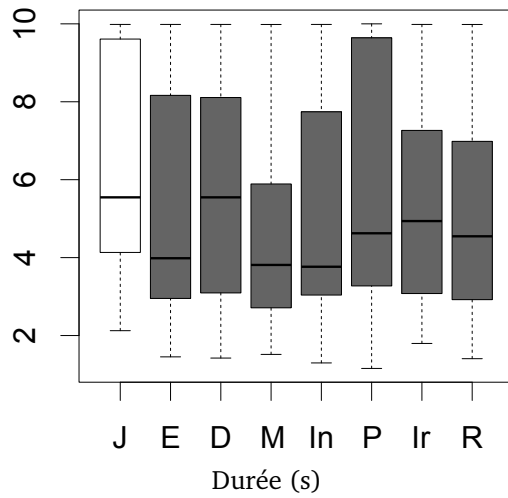
B.3.3.2 Protocoles de sécurité

Le dispositif réalisé est capable d'exercer une force sur le doigt d'un utilisateur. Il est nécessaire de s'assurer que ce dispositif ne fera pas mal à l'utilisateur avant de pouvoir l'utiliser dans un contexte expérimental. C'est pourquoi deux types de sécurités ont été ajoutés : une sécurité logicielle et une sécurité matérielle.

Sécurité matérielle Un butoir est fixé dans le rail accueillant la partie mobile d'ANGEL. À partir d'une certaine position du moteur, la partie mobile vient se placer en butée et ne peut plus continuer de descendre. Ainsi, même en cas de plantage du logiciel de contrôle, le dispositif ne pourra pas aller plus loin que cette position limite.

Sécurité logicielle La position du moteur est limitée logiciellement à une valeur définie expérimentalement par nous-mêmes. L'utilisateur peut aussi à tout moment faire relâcher la pression exercée par le dispositif s'il le souhaite. Un appuie sur la touche F4 du clavier, sur laquelle est collé un autocollant rouge, réinitialise la connexion avec ANGEL puis commande au moteur de se remettre à la position 0.

MESURES COLLECTÉES



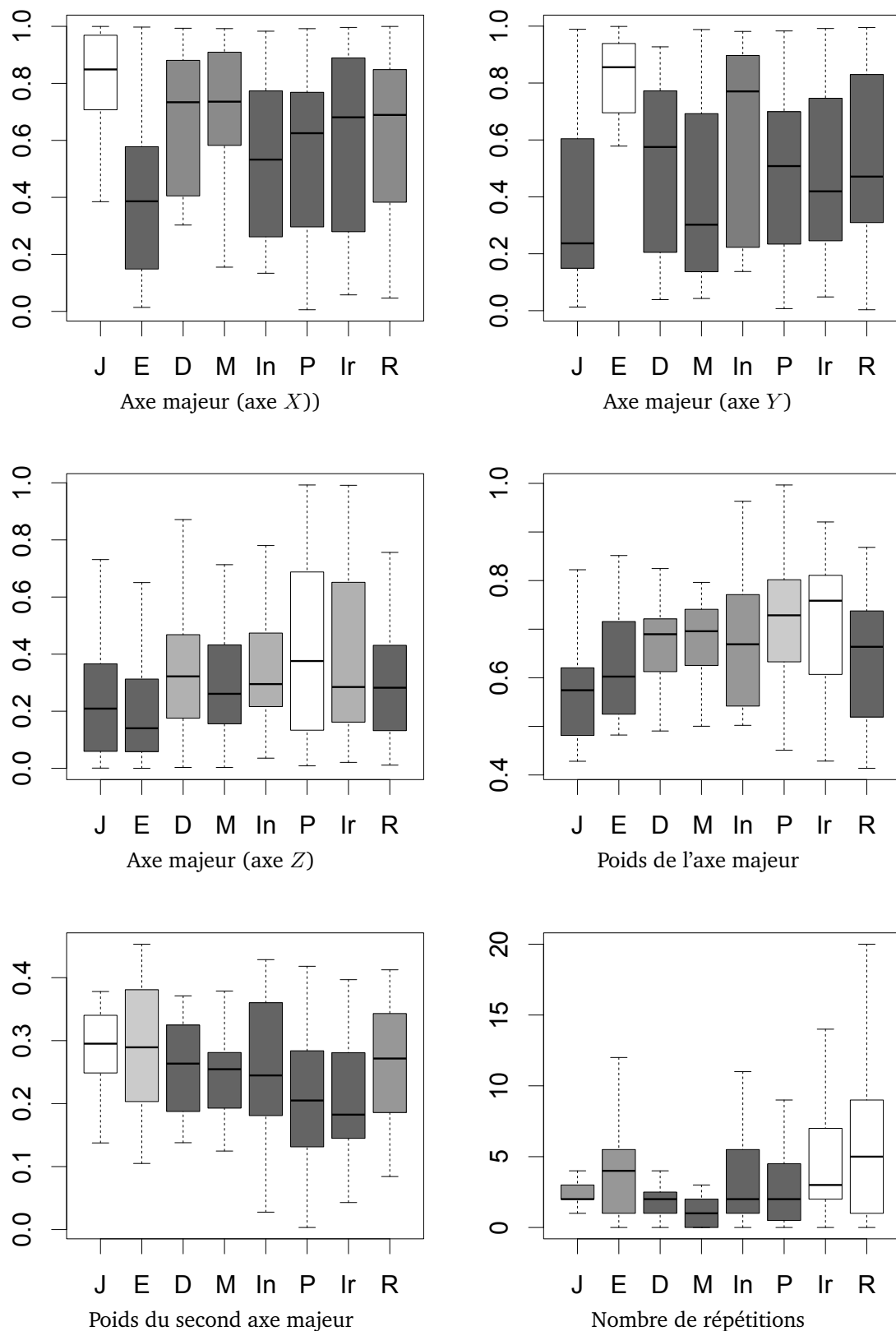


FIGURE C. 1 : Boîte à moustaches des paramètres principaux extraits des expressions collectées lors de l'étude présentée en 2.3. Plus la boîte correspondant à une émotion est de couleur claire, plus sa valeur est statistiquement élevée par rapport aux autres émotions ($p < 0.05$).

Bibliographie

- Aharanson Vered et Amir Noam. Emotion Elicitation in a Computerized Gambling Game. In *International Conference on Information Technology : Research and Education*, pages 179–183, University of California, Berkeley, USA, 2006.
- Ahn Sun Joo, Bailenson Jeremy, Fox Jesse, et Jabon Maria. Using Automated Facial Expression Analysis for Emotion and Behavior Prediction. In *National Communication Association's 95th Annual*, pages 349–369, Chicago Hilton & Towers, Chicago, 2009.
- Ammi Mehdi, Demulier Virginie, Caillou Sylvain, Gaffary Yoren, Tsalamlal Yacine, Martin Jean-Claude, et Tapus Adriana. Haptic Human-Robot Affective Interaction in a Handshaking Social Protocol. In *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, Portland, Oregon, USA, 2015.
- Argyle M. *Bodily Communication*. New York, NY : Methuen, 2nd edition, 1988.
- Ambrüster Claudia, Wolter Marc, Kühlen Torsten, Spijkers Wilhelmus, et Fimm Bruno. Depth perception in virtual reality : distance estimations in peri- and extrapersonal space. *Cyberpsychology & behavior*, 11(1) :9–15, 2008.
- Audibert N, Aubergé V, et Rilliard A. How we are not equally competent for discriminating acted from spontaneous expressive speech. In *Speech Prosody*, pages 693–696, Campinas, Brazil, 2008.
- Avraham Guy, Nisky Ilana, Fernandes Hugo L, Acuna Daniel E, Kording Konrad P, Loeb Gerald E, Member Senior, et Karniel Amir. Toward Perceiving Robots as Humans : Three Handshake Models Face the Turing-Like Handshake Test. *IEEE Transactions on Haptics*, 5(3) :196–207, 2012.
- Bailenson Jeremy N et Yee Nick. Virtual interpersonal touch : Haptic interaction and copresence in collaborative virtual environments. *Multimedia Tools and Applications*, 37(1) :5–14, 2007. ISSN 1380-7501. doi : 10.1007/s11042-007-0171-2. URL <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11042-007-0171-2>.
- Bailenson Jeremy N, Yee Nick, Brave Scott, Merget Dan, et Koslow David. Virtual Interpersonal Touch : Expressing and Recognizing Emotions Through Haptic Devices. *Human-Computer Interaction*, 22(3) :325–353, 2007.
- Bänziger Tanja, Mortillaro Marcello, et Scherer Klaus R. Introducing the Geneva Multimodal expression corpus for experimental research on emotion perception. *Emotion*, 12(5) :1161–1179, 2012. ISSN 1931-1516. doi : 10.1037/a0025827. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22081890>.

- Bargh John a et Shalev Idit. The substitutability of physical and social warmth in daily life. *Emotion (Washington, D.C.)*, 12(1) :154–162, 2012. ISSN 1931-1516. doi : 10.1037/a0023527. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21604871>.
- Bartolini Ellen Elizabeth. Eliciting Emotion with Film : Development of a Stimulus Set. page 84, 2011.
- Basdogan Cagatay, Ho Chih-Hao, Srinivasan Mandayam a., et Slater Mel. An experimental study on the role of touch in shared virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7(4) :443–460, 2000. ISSN 10730516. doi : 10.1145/365058.365082. URL <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=365058.365082>.
- Basori Ahmad Hoirul, Daman Daut, Sunar Mohd Shahrizal, et Bade Abdullah. The Potential of Human Haptic Emotion as Technique for Virtual Human Characters Movement to Augment Interactivity in Virtual Reality Game. 7(2) :27–32, 2007.
- Basori Ahmad Hoirul, Bade Abdullah, Daman Daut, et Sunar Mohd Shahrizal. Face-Touch : An Emotional Facial Expression Technique of Avatar Based on Tactile Vibration in Virtual Reality Game. In Kim Jae-Jin, editor, *Virtual Reality*, pages 107–127. Rijeka, Croatia : InTech., 2010a. ISBN 978-953-307-518-1.
- Basori Ahmad Hoirul, Bade Abdullah, Sunar Mohd Shahrizal, Daman Daut, et Saari Nadzari. E-Facetic : The Integration of Multimodal Emotion Expression for Avatar through Facial Expression, Acoustic and Haptic. *ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry*, pages 147–150, 2010b.
- Beck Aryel, Cañamero Lola, Damiano Luisa, Somnavilla Giacomo, et Tesser Fabio. Children Interpretation of Emotional Body Language Displayed by a Robot. *Social Robotics*, 7072 :62–70, 2011.
- Becker-Asano Christian, Ogawa Kohei, et Nishio Shuichi. Exploring the Uncanny Valley With Geminoid HI-1 in a Real-World Application. In *International Conference Interfaces and Human Computer Interaction*, pages 121–128, Freiburg, Germany, 2010. ISBN 9789728939182.
- Bennett Casey et Sabanovic Selma. Perceptions of Affective Expression in a minimalist robotic face. In *2013 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pages 81–82, Tokyo, Japan, 2013. Ieee. ISBN 978-1-4673-3101-2. doi : 10.1109/HRI.2013.6483511. URL <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6483511>.
- Bethel CL et Murphy RR. Non-facial/non-verbal methods of affective expression as applied to robot-assisted victim assessment. In *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages 287–294, Arlington, VA, USA, 2007. ISBN 9781595936172. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1228755>.
- Bethel CL, Salomon Kristen, et Murphy RR. Preliminary results : Humans find emotive non-anthropomorphic robots more calming. In *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages 291 – 292, La Jolla, CA, USA, 2009. ISBN 9781605584041. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1514181>.
- Bhatti M W, Yongjin Wang, et Guan Ling. A neural network approach for human emotion recognition in speech. In *Proc. of the IEEE International Symposium on Circuits and System*, pages 181–184, Vancouver, B.C., CANADA, 2004.

- Bianchi M., Valenza G., Serio A., Lanata A., Greco A., Nardelli M., Scilingo E.P., et Bicchi A. Design and preliminary affective characterization of a novel fabric-based tactile display. In *IEEE Haptics Symposium*, pages 591–596, Houston, TX, USA, February 2014. Ieee. ISBN 978-1-4799-3131-6. doi : 10.1109/HAPTICS.2014.6775522. URL <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6775522>.
- Bianchi-berthouze Nadia et Tajadura-Jiménez Ana. It's not just what we touch but also how we touch it. In *Workshop on Tactile User Experience Evaluation Methods at CHI*, Toronto, Canada, 2014.
- Bickmore Timothy W, Fernando Rukmal, Ring Lazlo, et Schulman Daniel. Empathic Touch by Relational Agents. *IEEE Transactions of Affective Computing*, 1(1) :60–71, 2010.
- Bonanni Leonardo et Vaucelle Cati. Affective TouchCasting. *ACM SIGGRAPH 2006 Sketches*, page 35, 2006. doi : 10.1145/1179849.1179893. URL <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1179849.1179893>.
- Bonnet David, Ammi Mehdi, et Martin Jean-Claude. Improvement of the recognition of facial expressions with haptic feedback. *IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Games*, pages 81–87, 2011. doi : 10.1109/HAVE.2011.6088396. URL <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6088396>.
- Boucher, J. D., Carlson G. E. Recognition of facial expression in three cultures. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, 11(3) :263–280, 1980.
- Bradley M M et Lang P J. International affective digitized sounds (IADS) : Stimuli, instruction manual and affective ratings. Technical report, (Tech. Rep. No. B-2). Gainesville, FL : The Center for Research in Psychophysiology, University of Florida, 1999.
- Bradley Margaret M. et Lang Peter J. Measuring Emotion : the Self-Assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25(I) :49–59, 1994.
- Brave Scott et Dahley Andrew. inTouch : A Medium for Haptic Interpersonal Communication. *Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 363–364, 1997.
- Breazeal Cynthia. Affective interaction between humans and robots. In *European Conference on Advances in Artificial Life*, pages 582–591, Prague, Czech Republic, 2001. URL http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-44811-X_66.
- Cacioppo J. T., Klein D. J., Berntson G. G., et Hatfield E. The psychophysiology of emotion. In Press New Yoren : Guilford, editor, *Handbook of emotions*, pages 119–142. 1993.
- Carlisle James H. Evaluating the impact of office automation on top management communication. In *National Computer Conference and Exposition*, pages 611–616, 1976.
- Casale S, Russo A, et Serrano S. Analysis of Robustness of Attributes Selection Applied to Speech Emotion Recognition. In *Proc. of the European Signal Processing Conference*, pages 1174–1178, Aalborg, Denmark, 2010.
- Castellano Ginevra. *Movement expressivity analysis in affective computers : from recognition to expression of emotion*. PhD thesis, University of Genoa, Italy, 2008.

- Chang Jonathan, Maclean Karon, et Yohanan Steve. Gesture Recognition in the Haptic Creature. In *Proc. of the EuroHaptics Conference*, volume 1, pages 385–391, Vancouver, B.C., Canada, 2010.
- Chen IYH. *Mixed reality simulation for mobile robots*. PhD thesis, 2011. URL http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5152325.
- Chen Meng, Katagami Daisuke, et Nitta Katsumi. Let's Play Catch in Words, Online Negotiation System with a Sense of Presence Based on Haptic Interaction. In *IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence Agent Technology*, pages 357–360, 2009.
- Chiew Seng Sean Tan, Schöning Johannes, Luyten Kris, et Coninx Karin. Investigating the Effects of using Biofeedback as Visual Stress Indicator during Video-mediated Collaboration. In *ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–10, 2014. ISBN 9781450324731.
- Chung Keywon, Chiu Carnaven, Xiao Xiao, et Chi Pei-Yu (Peggy). Stress OutSourced : A Haptic Social Network via Crowdsourcing. *Extended abstracts of the International Conference on Human factors in computing systems*, page 10, 2009. doi : 10.1145/1520340.1520346. URL <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1520340.1520346>.
- Clay Alexis, Couture Nadine, Nigay Laurence, de la Rivière Jean-baptiste, Martin Jean-claude, Courgeon Matthieu, Desainte-catherine Myriam, Orvain Emmanuel, Girondel Vincent, et Domenger Gaël. Interactions and systems for augmenting a live dance performance. In *International Symposium on Mixes and Augmented Reality*, pages 29–38, Atlanta, GA, United States, 2012.
- Clos Jean et Muller Yves. *Neurobiologie cellulaire. Tome 2, Fonctions sensorielles*. Nathan, 1997.
- Coan James A et Allen John J B. *Handbook of Emotion Elicitation and Assessment*. New York : Oxford university press, 2007.
- Coeman A. Le Toucher... Sens interdit ? <http://www.psychomotricitecoeman.com/articlesletoucher-fr.htm>, 2010.
- Cohen Sheldon, Kamarck Tom, et Mermelstein Robin. A Global Measure of Perceived Stress. *Journal of Health and Social Behavior*, 24(4) :385–396, 1983.
- Cooper Eric W, Kryssanov Victor V, et Ogawa Hitoshi. Building a Framework for Communication of Emotional State through Interaction with Haptic Devices. In *Haptic and Audio Interaction Design*, pages 189–196. Berlin, Heidelberg, 2010.
- Cosnier Jacques. *Psychologie des émotions et des sentiments*. page 169, 2006.
- Coulson Mark. Attributing Emotion to Static Body Postures : Recognition Accuracy, Confusions, and Viewpoint Dependence. *Journal of Nonverbal Behavior*, 28(2) :117–139, 2004. ISSN 0191-5886. doi : 10.1023/B:JONB.0000023655.25550.be.
- Courgeon Matthieu, Martin Jean-Claude, et Jacquemin Christian. MARC : a Multimodal Affective and Reactive Character. In *Workshop on Affective Interaction in Natural Environments*, Chania, Greece, 2008.
- Courgeon Matthieu, Buisine Stéphanie, et Martin Jean-claude. Impact of Expressive Wrinkles on Perception of a Virtual Character's Facial Expressions of Emotions. *Intelligent Virtual Agents*, pages 201–214, 2009a.

- Courgeon Matthieu, Clavel Céline, et Martin Jean-Claude. Appraising Emotional Events during a Real-time Interactive Game. *Affective Interaction in Natural Environments*, 2009b.
- Courgeon Matthieu, Clavel Céline, Tan Ning, et Martin Jean-claude. Front View vs. Side View of Facial and Postural Expressions of Emotions in a Virtual Character. *Transactions on Edutainment VI*, 6758 :132–143, 2011.
- Crusco A. H. et Wetzel C. G. The Effects of Interpersonal Touch on Restaurant Tipping. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 10(4) :512–517, 1984.
- CSEA-NIMH . The International Affective Picture System [Photographic slides]. Gainesville : University of Florida, 1995.
- Dael N, Mortillaro M, et Scherer K R. Emotion Expression in Body Action and Posture. *Emotion*, 12(5) :1085–1101, 2011.
- Dael Nele, Mortillaro Marcello, et Scherer Klaus R. The Body Action and Posture Coding System (BAP) : Development and Reliability. *Journal of Nonverbal Behavior*, 36(2) :97–121, 2012. ISSN 0191-5886. doi : 10.1007/s10919-012-0130-0.
- Damasio Antonio. Des appétits et des émotions. In *Spinoza avait raison*, pages 31–87. 2003.
- Danieau Fabien, Fleureau Julien, Guillotel Philippe, Mollet Nicolas, Christie Marc, et Anatole Lécuyer. Toward Haptic Cinematography : Enhancing Movie Experience with Haptic Effects based on Cinematographic Camera Motions To cite this version :. *IEEE MultiMedia, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).*, 2014. URL <https://hal.inria.fr/hal-00918074>.
- Darwin Charles. *The Expression of Emotions in Man and Animals*. 1872.
- Dellaert Frank, Polzin Thomas, et Waibel Alex. Recognizing emotion in speech. In *Proc. of the Fourth International Conference on Spoken Language*, volume 3, pages 1970–1973, Philadelphia, PA, 1996.
- Dempster A P, Laird N M, et Rubin. D B. Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, 39(1) :1–38, 1977.
- Dijk Esko O, Weffers-albu Alina, et Zeeuw Tin De. A tactile actuation blanket to intensify movie experiences with personalised tactile effects. *International Conference on Intelligent Technologies for Interactive Entertainment*, 2009.
- Dougherty Patrick. *Somatosensory Pathways*, 1997.
- Dragone M, Duffy BR, Holz Thomas, et O'Hare GMP. Fusing realities in human-robot social interaction. In *International Symposium on Robotics*, Munich, Germany, 2006. URL <http://irserver.ucd.ie/handle/10197/4543>.
- Eichhorn Elisabeth, Wettach Reto, et Hornecker Eva. A stroking device for spatially separated couples. *MobileHCI*, pages 303–306, 2008.
- Ekman P., Levenson R. W., et Friesen W. V. Autonomic Nervous System Activity Distinguishes Among Emotions. *Science*, 221(4616) :1208–1210, 1983.
- Ekman Paul. Basic Emotions. In Dalglish T. et Power M., editors, *Handbook of Cognition and Emotion*, chapter ch1, pages 45–60. 1999.

- Ekman Paul. Lie catching and microexpressions. In *The philosophy of deception*, pages 118–133. Oxford University Press, 2009.
- Ekman Paul et Friesen Wallace V. *Unmasking the face : A guide to recognizing emotions from facial clues*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1975.
- Ellingsen Dan-Mikael, Wessberg Johan, Chelnokova Olga, Olausson Hå kan, Laeng Bruno, et Leknes Siri. In touch with your emotions : oxytocin and touch change social impressions while others' facial expressions can alter touch. *Psychoneuroendocrinology*, 39 :11–20, January 2014. ISSN 1873-3360. doi : 10.1016/j.psyneuen.2013.09.017. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24275000>.
- Enriquez Mario, Maclean Karon, et Chita Christian. Haptic Phonemes : Basic Building Blocks of Haptic Communication. *International Conference on Multimodal Interfaces*, 2004.
- Erp Jan B.F. Van et Toet Alexander. How to Touch Humans : Guidelines for Social Agents and Robots That Can Touch. In *Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction*, pages 780–785, Geneva, Switzerland, September 2013. Ieee. ISBN 978-0-7695-5048-0. doi : 10.1109/ACII.2013.145. URL <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6681537>.
- Essick Greg K, McGlone Francis, Dancer Chris, Fabricant David, Ragin Yancy, Phillips Nicola, Jones Therese, et Guest Steve. Quantitative assessment of pleasant touch. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 34(2) :192–203, 2010. ISSN 1873-7528. doi : 10.1016/j.neubiorev.2009.02.003. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19896001>.
- Field Tiffany. *Touch*. MIT Press, Cambridge, MA., 2001.
- Flagg Anna. *Sensing and Recognizing Affective Touch in a Furry Zoomorphic Object*. PhD thesis, 2012.
- Fogg B J, Arnold Perry, Cutler D, et Eisbach Chris. HandJive : A Device for Interpersonal Haptic Entertainment. *SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 57–64, 1998.
- Frijda Nico H, Kuipers Peter, et ter Schure Elisabeth. Relations among emotion, appraisal, and emotional action readiness. *Journal of Personality and Social Psychology*, 57(2) :212–228, 1989. ISSN 0022-3514. doi : 10.1037/0022-3514.57.2.212.
- Fussell Susan R., Kiesler Sara, Setlock Leslie D., et Yew Victoria. How people anthropomorphize robots. In *International Conference on Human Robot Interaction*, pages 145–152, Amsterdam, Netherlands, 2008. ACM Press. ISBN 9781605580173. doi : 10.1145/1349822.1349842. URL <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1349822.1349842>.
- Gatti Elia, Caruso Giandomenico, Bordegoni Monica, et Spence Charles. Can the Feel of the Haptic Interaction Modify a User's Emotional State ? In *IEEE World Haptics Conference*, pages 247 – 252, Daejeon, Korea, 2013.
- Geslin Erik. Method of induction of basic and complex emotions in video games and virtual environments. In *ACM SIGGRAPH*, page 6, Singapore, 2012.
- Ghedighian-Courier Josy-Jeanne. Le toucher, un sens aux multiples avatars. *Cahiers jungiens de psychanalyse*, 118(2) :17–28, 2006. ISSN 0984-8207. doi : 10.3917/cjung.118.0017. URL <http://www.cairn.info/revue-cahiers-jungiens-de-psychanalyse-2006-2-page-17.htm>.

- Giraud Tom, Soury Mariette, Hua Jiewen, Delaborde Agnes, Tahon Marie, Jauregui David Antonio Gomez, Eyharabide Victoria, Filaire Edith, Le Scanff Christine, Devillers Laurence, Isableu Brice, et Martin Jean-Claude. Multimodal Expressions of Stress during a Public Speaking Task. In *Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction*, pages 417–421, Geneva, Switzerland, 2013.
- Golan O, Baron-Cohen S, et J. Hill. The Cambridge Mindreading (CAM) Face-Voice Battery : Testing Complex Emotion Recognition in Adults with and without Asperger Syndrome. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 36(2) :169–183, 2006.
- Gómez Jáuregui David Antonio, Philip Léonor, Clavel Céline, Padovani Stéphane, Bailly Mahin, et Martin Jean-Claude. Video analysis of approach-avoidance behaviors of teenagers speaking with virtual agents. In *ACM on International conference on multimodal interaction*, pages 189–196, Seattle, USA, 2013. ACM Press. ISBN 9781450321297. doi : 10.1145/2522848.2522891. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2522848.2522891>.
- Gratch Jonathan, Cheng Lin, Marsella Stacy, et Boberg Jill. Felt emotion and social context determine the intensity of smiles in a competitive video game. In *2013 10th IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition (FG)*, pages 1–8, Shanghai, China, April 2013. Ieee. ISBN 978-1-4673-5546-9. doi : 10.1109/FG.2013.6553792.
- Gross James J. et Levenson Robert W. *Emotion Elicitation Using Films*, 1995.
- Group Gale. Kinesthetics and Kinesthetic Sensations. In *World of Anatomy and Physiology*. 2002.
- Guéguen Nicolas. Nonverbal Encouragement of Participation in a Course : the Effect of Touching. *Social Psychology of Education*, 7(1) :89–98, 2004. ISSN 1381-2890. doi : 10.1023/B:SPOE.0000010691.30834.14. URL <http://www.springerlink.com/openurl.asp?id=doi:10.1023/B:SPOE.0000010691.30834.14>.
- Guéguen Nicolas et Jacob C. The effect of touch on tipping : an evaluation in a French bar. *International Journal of Hospitality Management*, 24(2) :295–299, 2005. ISSN 02784319. doi : 10.1016/j.ijhm.2004.06.004. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0278431904000465>.
- Haans Antal, Technology Human, Group Interaction, et Nood Christiaan De. *Investigating Response Similarities between Real and Mediated Social Touch : A First Test*, 2007.
- Hall Judith a et Matsumoto David. Gender differences in judgments of multiple emotions from facial expressions. *Emotion (Washington, D.C.)*, 4(2) :201–206, 2004. ISSN 1528-3542. doi : 10.1037/1528-3542.4.2.201. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15222856>.
- Handlin Linda. *Human–human and human–animal interaction : some common physiological and psychological effects*. PhD thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Skara, 2010.
- Harris T. E. *Applied Organizational Communication : Principles and Pragmatics for Future Practice*. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Association., 2002.
- Hartmann B, Mancini Maurizio, et Pelachaud Catherine. Implementing Expressive Gesture Synthesis for Embodied Conversational Agents. In *International Conference on Gesture in Human-Computer Interaction and Simulation*, pages 188–199, Berder Island, France, 2006. Springer.

- Hashimoto Yuki, Nakata Satsuki, et Kajimoto Hiroyuki. Novel tactile display for emotional tactile experience. *International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pages 124–131, 2009. doi : 10.1145/1690388.1690410. URL <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1690388.1690410>.
- Hernandez Javier, Paredes Pablo, Berkeley Eecs U C, et Hall Soda. Under Pressure : Sensing Stress of Computer Users. In *ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 51–60, Toronto, Canada, 2014. ISBN 9781450324731.
- Hertenstein Matthew J. Out of Touch : Is it Worth the Cost ? *Providence Journal.*, 2009.
- Hertenstein Matthew J et Campos Joseph J. Emotion Regulation Via Maternal Touch. *Infancy*, 2(4) :549–566, 2001. ISSN 15250008. doi : 10.1207/S15327078IN0204_09. URL http://doi.wiley.com/10.1207/S15327078IN0204_09.
- Hertenstein Matthew J et Keltner Dacher. Gender and the Communication of Emotion Via Touch. *Sex roles*, 64(1-2) :70–80, January 2011. ISSN 0360-0025. doi : 10.1007/s11199-010-9842-y. URL <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3016097&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- Hertenstein Matthew J, Keltner Dacher, App Betsy, Bulleit Brittany a, et Jaskolka Ariane R. Touch communicates distinct emotions. *Emotion (Washington, D.C.)*, 6(3) :528–533, 2006a. ISSN 1528-3542. doi : 10.1037/1528-3542.6.3.528.
- Hertenstein Matthew J, Verkamp Julie M, Kerestes Alyssa M, et Holmes Rachel M. 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, 2006b. ISSN 8756-7547. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17345871>.
- Heuer Kathrin, Rinck Mike, et Becker Eni S. Avoidance of emotional facial expressions in social anxiety : The Approach-Avoidance Task. *Behaviour Research and Therapy*, 45(12) :2990–3001, 2007.
- Hietanen Jari K, Leppänen Jukka M, et Lehtonen Ulla. Perception of Emotions in the Hand Movement Quality of Finnish Sign Language. *Journal of Nonverbal Behavior*, 28(1) :53–64, 2004. ISSN 0191-5886. doi : 10.1023/B:JONB.0000017867.70191.68. URL <http://www.springerlink.com/openurl.asp?id=doi:10.1023/B:JONB.0000017867.70191.68>.
- Ho CC, MacDorman KF, et Pramono ZAD. Human emotion and the uncanny valley : a GLM, MDS, and Isomap analysis of robot video ratings. In *ACM/IEEE international conference on Human robot interaction*, pages 169–176, Amsterdam, Netherlands, 2008. ISBN 9781605580173. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1349845>.
- Hofer Gregor O. *Emotional Speech Synthesis*. PhD thesis, University of Edinburgh, 2004.
- Hooton Christopher. Woman opens professional cuddling shop – gets 10,000 customers in first week, 2014.
- Hornik J. Tactile stimulation and consumer response. *Journal of Consumer Research*, 19(3) : 449–458, 1992.

- Huisman Gijs, Frederiks Aduén Darriba, et Heylen Dirk. Affective touch at a distance. In *Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction*, page 769, Geneva, Switzerland, 2013. ISBN 9780769550480. doi : 10.1109/ACII.2013.122.
- Izard Carroll Ellis. *Human emotions*. 1977.
- Izard Carroll Ellis, Dougherty F. E., Bloxom B. M., et Kotsch N. E. The differential emotion scale : A method of measuring the meaning of subjective experience of discrete emotions. In *Nashville, TN : Vanderbilt University, Department of Psychology.*, 1974.
- James William. What is an emotion ? *Mind*, 9(34) :188–205, 1884.
- Jörg Sophie, Normoyle Aline, et Safonova Alla. How Responsiveness Affects Players' Perception in Digital Games. In *ACM Symposium on Applied Perception*, pages 33–38, Los Angeles, California, U.S.A., 2012.
- Kaye K. *The Mental and Social Life of Babies*. University of Chicago Press, Chicago, IL, USA, 1982.
- Kipp Michael et Martin Jean-Claude. Gesture and emotion : Can basic gestural form features discriminate emotions ? In *International Conference on Gesture and Emotion*, pages 1–8, Amsterdam, Netherlands, 2009. ISBN 9781424447992.
- Kirschbaum C, Pirke K M, et Hellhammer D H. The 'Trier Social Stress Test'—a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting. *Neuropsychobiology*, 28(1-2) :76–81, 1993.
- Klatzky Roberta L, Abramowicz Aneta, Hamilton Cheryl, et Lederman Susan J. Irrelevant visual faces influence haptic identification of facial expressions of emotion. *Attention, perception & psychophysics*, 73(2) :521–530, 2011. ISSN 1943-393X. doi : 10.3758/s13414-010-0038-x. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21264726>.
- Klaus R. Scherer, Tanja Banziger et Roesch Etienne, editors. *A Blueprint for Affective Computing*. 2010.
- Klema V et Laub A. The singular value decomposition : Its computation and some applications. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 25(2) :164–176, 1980.
- Knight Heather, Toscano Robert, Stiehl Walter D, Chang Angela, Wang Yi, et Breazeal Cynthia. Real-time Social Touch Gesture Recognition for Sensate Robots. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3715–3720, St. Louis, MO, USA, 2009. Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 9781424438044.
- Kok Ralph et Broekens Joost. Physical Emotion Induction and Its Use in Entertainment : Lessons Learned. *New Frontiers for Entertainment Computing*, pages 33–48, 2008.
- Kozima Hideki et Nakagawa Cocoro. Interactive Robots as Facilitators of Children's Social Development. In *Mobile Robots : towards New Applications*, number December, pages 269–285. 2006. ISBN 3866113145.
- Krishna Sreekar, Bala Shantanu, et Mcdaniel Troy. VibroGlove : An Assistive Technology Aid for Conveying Facial Expressions. pages 3637–3642, 2010.

- Lang P J, Bradley M M, et Cuthbert B N. International affective picture system (IAPS) : Affective ratings of pictures and instruction manual. Technical report, Technical Report A-8. University of Florida, Gainesville, FL, 2008.
- Lazarus R. et Folkman S. *Stress, appraisal and coping*. New York, Springer, 1984.
- Lazarus Richard S., Speisman Joseph C., et Mordkoff Arnold M. The relationship between autonomic indicators of psychological stress : Heart rate and skin conductance. *Psychosomatic Medicine*, 25(1) :19–30, 1963.
- Le Chenadec G, Maffiolo V, Chateau N, et Colletta J M. Creation of a Corpus of Multimodal Spontaneous Expressions of Emotions in Human-Machine Interaction. *International Conference on Language Resources and Evaluation*, pages 2010–2013, 2011.
- Lemmens Paul, Cromptvoets Floris, Brokken Dirk, van den Eerenbeemd Jack, et de Vries Gert-Jan. A body-conforming tactile jacket to enrich movie viewing. In *Proc. of the World Haptics*, pages 7–12. Ieee, 2009. ISBN 978-1-4244-3858-7. doi : 10.1109/WHC.2009.4810832.
- Levenson Robert W., Ekman Paul, et Friesen Wallace V. Voluntary Facial Action Generates Emotion-Specific Autonomic Nervous System Activity. *Psychophysiology*, 27(4) :363–384, 1990.
- Likert Rensis. A Technique for the Measurement of Attitudes. *Archives of Psychology*, 140 :1–55, 1932.
- Lo Shao-Kang. The Nonverbal Communication Functions of Emoticons in Computer-Mediated Communication. *CyberPsychology & Behavior*, 11(5) :595–597, 2008.
- Lu Yijuan, Cohen I, Zhou X S, et Tian Q. Feature selection using principal feature analysis. In *Proc. of the International Conference on Multimedia*, pages 301–304, New York, USA, 2007.
- Luk Joseph, Little Shannon, Maclean Karon, et Hayward Vincent. A Role for Haptics in Mobile Interaction : Initial Design Using a Handheld Tactile Display Prototype. 2006.
- Lynn Michael, Le Joseph-Mykal, et David Sherwyn. Reach Out and Touch Your Customer. *Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly* 39, pages 60–65, 1998.
- M. Courgeon, C. Jacquemin J J.-C. Martin. Virtual Humans : Expressivity, Interactivity and Realism. page 0, 2008.
- MacLean K E. Designing with haptic feedback. *EEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings*, pages 783–788, 2000. doi : 10.1109/ROBOT.2000.844146. URL <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=844146>.
- Maclean Karon E, Pasquero Jerome, et Smith Jocelyn. Building a Haptic Language : Communication through Touch. pages 1–16, 2004.
- Masuda T, Ellsworth P C, Mesquita B, Leu J, Tanida S, et Van de Veerdonk E. Placing the face in context : Cultural differences in the perception of facial emotion. *ournal of personality and social psychology*, 94(3) :365–381, 2008.
- Matsui D., Minato T., MacDorman K.F., et Ishiguro H. Generating natural motion in an android by mapping human motion. *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3301–3308, 2005. doi : 10.1109/IROS.2005.1545125. URL <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1545125>.

- McEwen B. S. et Seeman T. Stress and affect : applicability of the concepts of allostasis and allostatic load. In *Handbook of Affective Sciences*, pages 1117–1138. 2003.
- McGlone Francis, Wessberg Johan, et Olausson Hakan. Discriminative and Affective Touch : Sensing and Feeling. *Neuron*, 82(4) :737–755, 2014.
- McIlveen Rob et Gross Richard. *Biopsychology*. Lawrence Erlbaum, 1996.
- Mehrabian A et Ferris S R. Inference of attitudes from nonverbal communication in two channels. *Journal of Consulting Psychology*, 3(31) :248–252, 1967.
- Mehrabian Albert. *Silent messages : Implicit communication of emotions and attitudes*. Belmont, CA : Wadsworth, 1981.
- Mehrabian Albert et Wiener Morton. Decoding of Inconsistent Communications. *Journal of Personality and Social Psychology*, 6(1) :109–114, 1967.
- Morency Louis-Philippe, Rahimi Ali, et Darrell Trevor. Adaptive view-based appearance models. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 1 :803–812, 2003.
- Mori Masahiro. The uncanny valley. *Energy*, 7(4) :33–35, 1970. URL <http://www.movingimages.info/digitalmedia/wp-content/uploads/2010/06/MorUnc.pdf>.
- Morrison I., Löken L. S., Minde J., Wessberg J., Perini I., Nennesmo I., et Olausson H. Reduced C-afferent fibre density affects perceived pleasantness and empathy for touch. *Brain*, 134(4) : 1116–1126, 2011.
- Morrison India, Löken Line S, et Olausson Hå kan. The skin as a social organ. *Experimental brain research*, 204(3) :305–14, July 2010. ISSN 1432-1106. doi : 10.1007/s00221-009-2007-y. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19771420>.
- Motley Michael T. et Camden Carl T. Facial expression of emotion : A comparison of posed expressions versus spontaneous expressions in an interpersonal communication setting. *Western Journal of Speech Communication*, 52(1) :1–22, 1988.
- Mower Emily et Narayanan Shrikanth. A Hierarchical Static-Dynamic Framework For Emotion Classification. In *Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pages 2372–2375, Prague, Czech Republic, 2011.
- Nakagawa Kayako, Shiomi Masahiro, Shinozawa Kazuhiko, Matsumura Reo, Ishiguro Hiroshi, et Hagita Norihiro. Effect of robot's active touch on people's motivation. *International conference on Human-robot interaction*, page 465, 2011. doi : 10.1145/1957656.1957819. URL <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1957656.1957819>.
- Nguyen Tuan, Heslin Richard, et Nguyen Michele L. The Meanings of Touch : Sex Differences. *Journal of Communication*, 25(3) :92–103, 1975.
- Nicholson J, Takahashi K, et Nakatsu R. Emotion Recognition in Speech Using Neural Networks. *Neural Computing & Applications*, 9(4) :290–296, 2000. ISSN 0941-0643. doi : 10.1007/s005210070006.

- Nishio Shuichi, Taura Koichi, Sumioka Hidenobu, et Ishiguro Hiroshi. Teleoperated Android Robot as Emotion Regulation Media. *International Journal of Social Robotics*, 5(4) :563–573, July 2013. ISSN 1875-4791. doi : 10.1007/s12369-013-0201-3. URL <http://link.springer.com/10.1007/s12369-013-0201-3>.
- Nwe T, Foo Say Wei, et De Silva Liyanage. Speech emotion recognition using hidden Markov models. *Speech Communication*, 41(4) :603–623, 2003. ISSN 01676393. doi : 10.1016/S0167-6393(03)00099-2.
- Olausson H, Lamarre Y, Backlund H, Morin C, Wallin B G, Starck G, Ekholm S, Strigo I, Worsley K, Vallbo a B, et Bushnell M C. Unmyelinated tactile afferents signal touch and project to insular cortex. *Nature neuroscience*, 5(9) :900–904, 2002. ISSN 1097-6256. doi : 10.1038/nn896. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12145636>.
- Olausson Håkan W, Cole Jonathan, Vallbo Ake, McGlone Francis, Elam Mikael, Krämer Heidrun H, Rylander Karin, Wessberg Johan, et Bushnell M Catherine. Unmyelinated tactile afferents have opposite effects on insular and somatosensory cortical processing. *Neuroscience letters*, 436(2) : 128–132, 2008. ISSN 0304-3940. doi : 10.1016/j.neulet.2008.03.015.
- Park Jongkyeong et Kim GJ. Robots with projectors : an alternative to anthropomorphic HRI. In *ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction*, pages 7–9, La Jolla, California, USA, 2009. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1514146>.
- Park Young-woo, Lim Chang-Young, et Nam Tek-Jin. CheekTouch : An Affective Interaction Technique while Speaking on the Mobile Phone. *Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 3241–3246, 2010.
- Picard R. Affective Computing. In book Cambridge MA : M I T Press, editor, *User Modeling and User-Adapted Interaction*, chapter 12, 1, pages 85–89. Springer Science+Business Media B.V., Formerly Kluwer Academic Publishers B.V., 1997.
- Picard Rosalind W et Daily Shaundra Bryant. Evaluating affective interactions : Alternatives to asking what users feel. In *CHI Workshop on Evaluating Affective Interfaces : Innovative Approaches*, 2005.
- Plutchik R. A general psychoevolutionary theory of emotion. *Theories of emotions*, 1 :3–33, 1980.
- Polzehl Tim, Sundaram Shiva, Ketabdar Hamed, Wagner Michael, et Metze Florian. Emotion Classification in Children’s Speech Using Fusion of Acoustic and Linguistic Features, 2009.
- Qi Yuan, Reynolds Carson, et Picard Rosalind W. The Bayes Point Machine for Computer-User Frustration Detection via PressureMouse. In *Workshop on Perceptive user interfaces*, pages 1–5, Orlando, FL, USA, 2001.
- Rantala Jussi, Salminen Katri, Raisamo Roope, et Surakka Veikko. Touch gestures in communicating emotional intention via vibrotactile stimulation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 71(6) :679–690, June 2013. ISSN 10715819. doi : 10.1016/j.ijhcs.2013.02.004. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1071581913000232>.
- Révész G. et Wolff H. A. *Psychology and Art of the Blind*. Longmans, Green and Co., 1950.

- Roberts N A et Levenson R W. The remains of the workday : Impact of job stress and exhaustion on marital interaction in police couples. *Journal of Marriage and the Family*, 63(4) :1052–1067, 2001.
- Roelofs Karin, Peer Van Jacobien, Berretty Ed, Jong de Paula, Spinhoven Philip, et Elinga Bernet M. Hypothalamus–Pituitary–Adrenal Axis Hyperresponsiveness Is Associated with Increased Social Avoidance Behavior in Social Phobia. *Biological Psychiatry*, 65(4) :336–343, 2009.
- Rolls E T, O'Doherty J, Kringelbach M L, Francis S, Bowtell R, et McGlone F. Representations of pleasant and painful touch in the human orbitofrontal and cingulate cortices. *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 13(3) :308–317, 2003. ISSN 1047-3211. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12571120>.
- Russell J a. Is there universal recognition of emotion from facial expression ? A review of the cross-cultural studies. *Psychological bulletin*, 115(1) :102–141, 1994. ISSN 0033-2909. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8202574>.
- Russell James a. A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39 (6) :1161–1178, 1980. ISSN 0022-3514. doi : 10.1037/h0077714.
- Russell James A et Mehrabian Albert. Evidence for a three-factor theory of emotions. *Journal of Research in Personality*, 11(3) :273–294, 1977. ISSN 00926566. doi : 10.1016/0092-6566(77) 90037-X.
- Russell James A. et Weiss A. Affect grid : A single- item scale of pleasure and arousa. *Journal of Personality and Social Psychology*, 57(3) :493–502, 1989.
- Ruttkay Z., Dormann C., et Noot H. Evaluating ECAs - What and How. In *Workshop on Embodied Conversational Agents*, 2002.
- Sallnäs Eva-lotta. Haptic Feedback Increases Perceived Social Presence. *International Journal*, pages 178–185, 2010.
- Salminen Katri, Surakka Veikko, Lylykangas Jani, Raisamo Jukka, Saarinen Rami, Raisamo Roope, Rantala Jussi, et Evreinov Grigori. Emotional and behavioral responses to haptic stimulation. *Conference on Human factors in computing systems*, page 1555, 2008. doi : 10.1145/1357054.1357298. URL <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1357054.1357298>.
- Sander David, Grandjean Didier, et Scherer K R. A systems approach to appraisal mechanisms in emotion. *Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society*, 18(4) :317–352, 2005. ISSN 0893-6080. doi : 10.1016/j.neunet.2005.03.001. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15936172>.
- Schaefer Alexandre, Nils Frédéric, Sanchez Xavier, et Philippot Pierre. Assessing the effectiveness of a large database of emotion-eliciting films : A new tool for emotion researchers. *Cognition & Emotion*, 24(7) :1153–1172, 2010. ISSN 0269-9931. doi : 10.1080/02699930903274322. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02699930903274322>.
- Scherer K R. Appraisal considered as a process of multilevel sequential checking. In *Appraisal processes in emotions : Theory, Methods, Research*, pages 92–120. New-York and Oxford : Oxford University Press, 2001.

- Scherer K R. What are emotions ? And how can they be measured ? *Social Science Information*, 44 (4) :695–729, 2005. ISSN 0539-0184. doi : 10.1177/0539018405058216.
- Scherer K R et Grandjean Didier. Facial expressions allow inference of both emotions and their components. *Cognition & Emotion*, 22(5) :789–801, 2007. ISSN 0269-9931. doi : 10.1080/02699930701516791. URL <http://www.informaworld.com/openurl?genre=article&doi=10.1080/02699930701516791&magic=crossref||D404A21C5BB053405B1A640AFFD44AE3>.
- Scherer K R et Sangsue J. Le système mental en tant que composant de l’emotion. *Cognitions et emotions*, pages 11–36, 2004.
- Scherer Klaus R. Emotions as episodes of subsystem synchronization driven by nonlinear appraisal processes. In *Emotion, development, and self-organization : Dynamic systems approaches to emotional development*, pages 70–99. New York/Cambridge : Cambridge University Press, 2000.
- Scherer Klaus R. Feelings Integrate the Central Representation of Appraisal-driven Response Organization in Emotion. pages 136–157, 2004.
- Schiel Patrick. Expressive Gesture Synthesis for ECA and the EMOTE model for Effort and Shape. 2008.
- Schuller B, Rigoll G, et Lang M. Hidden Markov model-based speech emotion recognition. In *Proc. of the International Conference on Multimedia and Expo*, volume 2, pages 401–404, Washington, USA, 2003. ISBN 0-7803-7663-3. doi : 10.1109/ICASSP.2003.1202279.
- Seay Bill, Alexander Bruce K., et Harlow Harry F. Maternal behavior of socially deprived Rhesus monkeys. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, 69(4) :345–354, 1964.
- Seo Stela H, Geiskkovitch Denise, Nakane Masayuki, King Corey, et Young James E. Poor Thing ! Would You Feel Sorry for a Simulated Robot ? A comparison of empathy toward a physical and a simulated robot. In *Human-Robot Interaction*, pages 125–132, 2015. ISBN 9781450328838.
- Sequeira Henrique, Hot Pascal, Silvert Laetitia, et Delplanque Sylvain. Electrical autonomic correlates of emotion. *International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology*, 71(1) :50–6, January 2009. ISSN 0167-8760. doi : 10.1016/j.ijpsycho.2008.07.009. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18723054>.
- Shibata Takanori et Tanie Kazuo. Physical and affective interaction between human and mental commit robot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2572–2577, Seoul, Korea, 2001. ISBN 0780364759. URL http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=933010.
- Shinoda Hiroyuki. Noncontact Haptic Interface Using Ultrasound. In *Haptic and Audio Interaction Design*, pages 120–127, Kusatsu, Japan, 2011.
- Sir Cherrington Charles S. *The integrative action of the nervous system*. New Haven Yale University Press, 1920.
- Spielberger C. D. *Manual for the State-Trait Anxiety Inventory (Form Y)*. Consulting Psychologists Press, Palo Alto, CA, 1983.

- Stevenson Ryan a. et James Thomas W. Affective auditory stimuli : Characterization of the International Affective Digitized Sounds (IADS) by discrete emotional categories. *Behavior Research Methods*, 40(1) :315–321, February 2008. ISSN 1554-351X. doi : 10.3758/BRM.40.1.315. URL <http://www.springerlink.com/index/10.3758/BRM.40.1.315>.
- Stiehl W.D., Lieberman J., Breazeal C., Basel L., Cooper R., Knight H., Lalla L., Maymin A., et Purchase S. The huggable : a therapeutic robotic companion for relational, affective touch. *CCNC 2006. 2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2006.*, 2 : 1290–1291, 2006. doi : 10.1109/CCNC.2006.1593253. URL <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1593253>.
- Stinson Linda L. Measuring how people spend their time : a time-use survey design. *Monthly Labor Review*, 122(8) :12–19, 1999.
- Strack F., Martin L., et Stepper S. Inhibiting and facilitating conditions of the human smile : A non-obtrusive test of the facial feedback hypothesis. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54(5) :768–777, 1988.
- Sun David, Paredes Pablo, et Canny John. MouStress : Detecting Stress from Mouse Motion. In *SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 61–70, Toronto, Canada, 2014. ISBN 9781450324731.
- Suzuki Yuriko et Kobayashi Minoru. Arrayed Air Jet Based Haptic Display : Implementing An Untethered Interface. *Symposium on User Interface Software and Technology*, 2013.
- Tan Hong Z., Srinivasan Mandayam A., Eberman Brian, et Cheng Belinda. Human Factors for the Design of Force-Reflecting Haptic Interfaces, 1994.
- Tan Ning, Courgeon Matthieu, Bellik Yacine, et Martin Jean-claude. A Location-Aware Virtual Character in a Smart Room : Effects on Performance, Presence and Adaptivity. *International conference on Intelligent user interfaces*, pages 399–402, 2011.
- Tcherkassof A, Bollon T, Dubois M, Pansu P, et Adam J M. Facial expressions of emotions : A methodological contribution to the study of spontaneous and dynamic emotional faces. *European Journal of Social Psychology*, 37(6) :1325–1345, 2007.
- Tetteroo D. Communicating emotions in instant messaging, an overview. *Twente Conference on IT*, (Figure 2), 2008.
- Thompson Erin H et Hampton James a. The effect of relationship status on communicating emotions through touch. *Cognition & emotion*, 25(2) :295–306, 2011. ISSN 1464-0600. doi : 10.1080/02699931.2010.492957. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21432672>.
- Tsalamlal Mohamed Y., Issartel Paul, Ouarti Nizar, et Ammi Mehdi. HAIR : Haptic feedback with a mobile AIR jet. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2699 – 2706, Hong Kong, China, 2014.
- Tsetserukou Dzmitry et Neviarouskaya Alena. World's first wearable humanoid robot that augments our emotions. *International Conference on Augmented Human*, pages 1–10, 2010. doi : 10.1145/1785455.1785463. URL <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1785455.1785463>.

- ur Réhman Shafiq et Liu Li. iFeeling : Vibrotactile Rendering of Human Emotions on Mobile Phones. In Xiaoyi Jiang, MatthewY. Ma Chang Wen Chen, editor, *Mobile multimedia processing : fundamentals, methods, and applications*, pages 1–20. Springer Berlin, 1st editio edition, 2010.
- Van Goozen Stephanie et Frijda Nico H. Emotion words used in six European countries, 1993.
- Ververidis Dimitrios, Kotropoulos Constantine, et Pitas Ioannis. Automatic Emotional Speech Classification. In *Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pages 593–596, Thessaloniki, Greece, 2004.
- Vogt Thurid et André Elisabeth. Comparing Feature Sets for Acted and Spontaneous Speech in View of Automatic Emotion Recognition. In *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, pages 474–477, Amsterdam, Netherlands, 2005.
- Wallbott Harald G. Bodily expression of emotion. *European Journal of Social Psychology*, 28 (6) :879–896, 1998. ISSN 0046-2772. doi : 10.1002/(SICI)1099-0992(1998110)28:6<879::AID-EJSP901>3.0.CO;2-W.
- Wang Ning et Marsella Stacy. Introducing EVG : An Emotion Evoking Game. In *International Conference on Intelligent Virtual Agents*, volume 4133, pages 282–291, Berlin, Heidelberg, 2006.
- Watson D. et Clark L. A. The PANAS-X : Manual for the Positive and Negative Affect Schedule. In *Unpublished Manuscript*, University of Iowa, Iowa City, 1994.
- Watson D., Clark L. A., et Tellegan A. Development and validation of brief measures of positive and negative affect : The PANAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, 56(6) : 1063–1070, 1988.
- Wilcoxon Franck. Individual comparison by ranking methods. *International Biometric Society*, 1 (6) :80–83, 1945.
- Wilting Janneke, Krahmer Emiel, et Swerts Marc. Real vs . acted emotional speech. In *INTER-SPEECH*, pages 805–808, Pittsburgh, Pennsylvania, 2006.
- Yamauchi Takashi. Mouse Trajectories and State Anxiety : Feature Selection with Random Forest. In *Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction*, pages 399–404, Geneva, Switzerland, 2013.
- Yang Seung-Ho, Kim Hyun-Woo, et Kim Min Young. Human visual augmentation using wearable glasses with multiple cameras and information fusion of human eye tracking and scene understanding. In *International conference on Human-robot interaction*, pages 287–288, Lausanne, Switzerland, 2011. ACM Press. ISBN 9781450305617. doi : 10.1145/1957656.1957774. URL <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1957656.1957774>.
- Yohanan Steve et MacLean Karon E. The Role of Affective Touch in Human-Robot Interaction : Human Intent and Expectations in Touching the Haptic Creature. *Special Issue on Expectations, Intentions & Actions*, 4(2) :163–180, 2011. ISSN 1875-4791. doi : 10.1007/s12369-011-0126-7.
- Yohanan Steve et MacLean KE. The haptic creature project : Social human-robot interaction through affective touch. *Symposium on the Role of Virtual Creatures in a Computerised Society*, pages 7–11, 2008. URL <https://aisb.org.uk/~aisborgu/convention/aisb08/proc/proceedings/01ReignofCatzDogz/02.pdf>.

- Yohanan Steve, Chan Mavis, Hopkins Jeremy, Sun Haibo, et Maclean Karon. Hapticat : Exploration of Affective Touch. In *International Conference on Multimodal Interfaces*, pages 222–229, Trento, Italy, 2005.
- Yohanan Steve, Hall Joseph P, Maclean Karon E, Croft Elizabeth A, Loos H F Machiel Van Der, Baumann Matthew, Chang Jonathan, Nielsen Dana, et Zoghbi Susana. Affect-Driven Emotional Expression with the Haptic Creature. *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pages 5–6, 2009.
- Young James E., Xin Min, et Sharlin Ehud. Robot expressionism through cartooning. In *ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, page 309, Arlington, VA, 2007. ACM Press. ISBN 9781595936172. doi : 10.1145/1228716.1228758. URL <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1228716.1228758>.
- Zhang Ming et Cai Jing-Xia. Effects of Neonatal Tactile Stimulation and Maternal Separation on the Anxiety and the Emotional Memory in Adult Female Rats. *Neurobiology of Learning and Memory*, 89(4) :397–406, 2008.