



THÈSE / UNIVERSITÉ DE RENNES 1
sous le sceau de l'Université Européenne de Bretagne

pour le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1

Mention : Informatique

Ecole doctorale Matisse

présentée par

Jonathan Perrinet

Préparée à l'unité de recherche IRISA/Inria Rennes

**Evaluation de
l'impact des
facteurs
émotionnels lors
d'interactions
physiques entre
humains réels et
virtuels**

**Thèse soutenue à Rennes
le 19 décembre 2013**

devant le jury composé de :

Arjan EGGES

Assistant Professor, Université d'Utrecht, Pays-Bas
/ Rapporteur

Catherine PELACHAUD

Directrice de Recherche CNRS, Telecom Paris-
Tech */ Rapporteuse*

Bruno ARNALDI

Professeur, INSA de Rennes */ Président*

Céline LOSCOS

Professeur, IUT de Reims-Châlons-Charleville
/ Examinatrice

Julien PETTRE

Chargé de Recherche, Inria Rennes */ Encadrant de
thèse*

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Stéphane Donikian, mon directeur de thèse pour m'avoir permis de réaliser cette thèse. Ensuite, je remercie plus particulièrement mon encadrant de thèse Julien Pettré pour m'avoir guidé et accompagné tout au long de ces trois années.

J'ai une pensée toute particulière pour Anne-Hélène Olivier, la MacGyver de la capture de mouvement et des manip grâce à qui cette thèse a pu avancer sur de bons rails et à qui je souhaite bon vent pour la suite à l'Inria et ailleurs.

Ensuite, je tiens à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à cette thèse. Je pense notamment aux partenaires du projet TANGO dans lequel s'inscrivait cette thèse et en particulier Jindrich Kodl de l'Institut Weizmann en Israel que j'ai eu le plaisir de rencontrer lors de son séjour ici à Rennes. C'est en collaboration avec lui qu'a été réalisé l'étude sur l'interaction entre deux marcheurs réels. Je pense également à tous les personnes qui ont participé aux différentes campagnes expérimentales.

Merci à Arjan Egges et Catherine Pelachaud pour avoir accepté d'être mes rapporteurs de thèse. Merci pour vos remarques et vos conseils sur la rédaction de mon manuscrit et merci d'avoir participé à mon jury de thèse.

Merci à Céline Loscos pour avoir accepté d'être examinatrice de thèse et d'avoir participé à mon jury de thèse ainsi qu'à Bruno Arnaldi pour avoir accepté d'être président du jury.

Je salue également mes collègues de chez Mimetic, Hybrid et du M2S avec qui j'ai passé de bons moments tout au long de cette thèse.

Enfin merci à mes amis qui ont été à mes côtés tout au long de cette thèse et qui ont toujours été là, même lors des moments difficiles.

Table des matières

Liste des figures	v
Liste des tableaux	ix
Introduction	1
1 État de l'art	9
1.1 Les émotions	9
1.1.1 Définition	9
1.1.2 Modèles d'émotions	10
1.1.2.1 Modèle discret	10
1.1.2.2 Modèle dimensionnel	11
1.1.3 Expression et perception des émotions	12
1.1.4 Expression des émotions dans la marche	16
1.2 Interaction	18
1.2.1 Interactions sociales	18
1.2.2 Interactions dans le cas de la marche	18
1.3 Les humains virtuels expressifs	20
1.4 Conclusion	24
2 Influence des émotions sur une marche non contrainte : protocole général	27
2.1 Introduction	27
2.2 Protocole expérimental	28
2.2.1 Population d'étude	28
2.2.2 Tâche	28
2.2.3 États émotionnels	29
2.2.4 Méthodologie générale	30
2.3 Traitement des données cinématiques	31
2.3.1 Reconstruction des données	31
2.3.2 Calcul des paramètres cinématiques	33
2.3.3 Analyse statistique	35
2.4 Discussion/Conclusion	36
3 Validation de la démarche expérimentale	39
3.1 Introduction	39
3.2 Étude en perception	40
3.2.1 Protocole expérimental	40
3.2.1.1 Population d'étude	40
3.2.1.2 Stimuli	40
3.2.1.3 Tâche	41

3.2.1.4	Analyse	41
3.2.2	Résultats	43
3.2.2.1	Marche seul	43
3.2.2.2	Marche en groupe	43
3.3	Étude en perception : nouvelle étude du cas de la marche en groupe	46
3.3.1	Protocole expérimental	46
3.3.1.1	Population d'étude	46
3.3.1.2	Stimuli	46
3.3.1.3	Tâche	47
3.3.1.4	Analyse	48
3.3.2	Résultats	48
3.4	Analyse cinématique	53
3.5	Discussion	57
3.6	Conclusion	60
4	Interactions entre deux marcheurs	61
4.1	Introduction	61
4.2	Analyse	62
4.3	Résultats	63
4.3.1	Cinématique du groupe	65
4.3.2	Cinématique de l'acteur neutre	65
4.3.3	Effet de la transitivité	66
4.3.4	Effet du dialogue	67
4.3.5	Décalage de phase	67
4.4	Discussion	68
4.4.1	Émergence d'un mécanisme de "meneur-suiveur"	69
4.4.2	Effet des différentes conditions d'interaction	71
4.5	Conclusion	72
5	Interaction humain réel / humain virtuel	73
5.1	Introduction	73
5.2	Étape 1 : création de la base de marches expressives	74
5.2.1	Protocole expérimental	74
5.2.1.1	Population d'étude	74
5.2.1.2	Tâche	74
5.2.1.3	Analyse	75
5.2.2	Résultats	76
5.3	Étape 2 : validation des données de marche expressive	77
5.3.1	Protocole expérimental	77
5.3.1.1	Population d'étude	77
5.3.1.2	Stimuli	78
5.3.1.3	Environnement virtuel	78
5.3.1.4	Tâche	78
5.3.1.5	Analyse	79
5.3.2	Résultats	79
5.4	Étape 3 : comparaison réel-réel / réel-virtuel	80
5.4.1	Protocole expérimental	80
5.4.1.1	Population d'étude	80
5.4.1.2	Stimuli	80

5.4.1.3	Environnement virtuel	80
5.4.1.4	Tâche	81
5.4.1.5	Analyse	81
5.4.2	Résultats	81
5.5	Discussion	82
5.6	Conclusion	85
	Conclusion	87
	Publications	93
	Bibliographie	93

Table des figures

1	Exemples d'agents virtuels	2
2	Extraits du court-métrage <i>La mécanique des émotions</i>	3
3	Thématique pluridisciplinaire	4
4	Analyse de l'effet des émotions sur les interactions entre marcheurs : une approche en trois étapes	5
5	Acquisition de données	6
1.1	Émotions de base d'Ekman	11
1.2	Exemple d'encodage FACS d'une expression de peur	12
1.3	Circumplex : modèle dimensionnel de Russel	12
1.4	Circumplex : modèle dimensionnel complexifié.	13
1.5	Expression des émotions par Darwin	13
1.6	Différents type de stimulus jouant la même émotion	14
1.7	Humains virtuels exprimant (de gauche à droite) la peur, la tristesse, la colère, un état neutre, et la joie	16
1.8	Moyennes des notes obtenues lors de la notation des caractéristiques de marches expressives	17
1.9	Extraits des vidéos de l'expérience de Costa	19
1.10	Distances personnelles	20
1.11	Protocole expérimental de l'expérience de Ducourant et al.	21
1.12	Expressions faciales expressives utilisées comme stimuli dans l'expérience de Melo et al.	22
1.13	Conception de stimuli à partir de photographies d'expressions faciales et du langage FACS. Les auteurs ont utilisé des photographies d'expressions faciales (en haut) pour pouvoir appliquer des expressions faciales à un humain virtuel grâce à la méthode FACS. Adaptée de [FMH04]	23
1.14	Stimuli utilisés dans l'expérience de Ennis et Egges	24
1.15	Animation procédurale d'un humain virtuel	25
2.1	Dispositif expérimental pour la capture de mouvement	27
2.2	Extrait d'une séquence vidéo montrant les 2 comédiens côte à côte.	29
2.3	Disposition du système de capture de mouvement à l'intérieur de la salle Métivier. La zone rouge représente les champs de vision des caméras.	31
2.4	Placement des marqueurs	33
2.5	Sujet intégralement reconstruit dans le logiciel Vicon IQ.	34
2.6	Disparition de marqueurs lorsqu'un des sujets sort de la zone de capture.	34
2.7	Mesures cinématiques	35
2.8	Paramètres ségmentaires	35
3.1	Validation des données de marche expressive	39
3.2	Stimuli de l'étude en perception	41

3.3	Capture d'écran de l'interface de l'étude en perception. Au centre se joue l'animation et en bas de l'écran sont affichées les réponses possibles données au sujet pour qualifier la marche expressive observée.	42
3.4	Taux de reconnaissance moyens des émotions dans le cas de la marche seul, indices de confiance moyens et temps de réponses moyens.	43
3.5	Taux de reconnaissance moyens des émotions dans le cas de la marche en groupe (2 acteurs expressifs), indices de confiance moyens et temps de réponses moyens.	44
3.6	Taux de reconnaissance moyens des émotions dans le cas de la marche en groupe (1 acteur expressif), indices de confiance moyens et temps de réponses moyens	45
3.7	Stimuli de la deuxième étude en perception	47
3.8	Taux de reconnaissance moyens de l'émotion neutre et résultats des tests statistiques.	49
3.9	Taux de reconnaissance moyens de l'émotion joie et résultats des tests statistiques.	49
3.10	Taux de reconnaissance moyens de l'émotion colère asymétrique et résultats des tests statistiques.	51
3.11	Taux de reconnaissance moyens de l'émotion colère symétrique et résultats des tests statistiques.	52
3.12	Taux de reconnaissance moyens de l'émotion peur asymétrique et résultats des tests statistiques.	53
3.13	Taux de reconnaissance moyens de l'émotion peur symétrique et résultats des tests statistiques.	54
3.14	Paramètres cinématiques étudiés et analyse statistique de l'influence des émotions.	55
3.15	Exemples de trajectoires de marche en fonction de l'état émotionnel du marcheur.	56
3.16	Vitesse, jerk et courbures moyennes d'un marcheur seul en fonction de ses émotions.	56
3.17	Inclinaison moyenne de la tête et de la colonne d'un marcheur seul en fonction de ses émotions.	57
3.18	Amplitude de mouvement moyenne des épaules et des avants-bras d'un marcheur seul en fonction de ses émotions.	57
4.1	Influence des émotions sur l'interaction entre deux marcheurs : photo prise pendant la capture de mouvement des deux marcheurs.	61
4.2	Mesures cinématiques	62
4.3	Méthode de calcul du décalage de phase.	63
4.4	Exemples de trajectoires obtenues lors de la marche en groupe. Les profils de vitesse et de jerk des tronçons de trajectoires de marche sont affichés sous chacune des trajectoires.	64
4.5	Vitesse de marche en <i>m.s</i> -1 (a) et jerk <i>m.s</i> -3 (b) du groupe en fonction des 5 situations émotionnelles possibles	65
4.6	Positions relatives entre les deux acteurs en fonction des cinq situations émotionnelles possibles	66
4.7	Vitesse moyenne en <i>m.s</i> – 1 (a) et jerk en <i>m.s</i> – 3 (b) de l'acteur neutre en fonction de l'émotion de l'acteur expressif.	66
4.8	Effet de la transitivité (Ntr : Non transitive, Tr Transitive) : sur les paramètres de groupe étudiés dans le cas de la colère. Les situations asymétriques sont en bleu, les situations symétriques en rouge.	67
4.9	Effet de la transitivité (Ntr : Non transitive, Tr Transitive) sur les paramètres de groupe étudiés dans le cas de la peur	68

4.10 Moyennes (\pm écart-type) des décalages de phase entre les acteurs en fonction de leur émotion	69
5.1 Étude des interactions entre humains réels et virtuels	73
5.2 Analyse de l'interaction entre un marcheur réel et un marcheur virtuel en trois étapes	75
5.3 Vitesses de marche moyennes du groupe (bleu), de l'acteur jouant l'émotion (rouge) et de l'acteur neutre (vert).	76
5.4 Position relatives moyennes entre 2 acteurs réels	77
5.5 Du marqueur à l'humain virtuel	78
5.6 Expérience en perception dans la salle de réalité virtuelle Immersia	79
5.7 Taux de reconnaissance moyens pour chacune des émotions.	80
5.8 Protocole expérimental de l'expérience de marche humain réel/humain virtuel .	81
5.9 Vitesses de marche moyennes du groupe (bleu), de l'humain virtuel (rouge) et du sujet (vert).	82
5.10 Position relatives moyennes entre le sujet et l'humain virtuel	83
5.11 Comparaisons	83
5.12 Circumplex de Russel adapté de [PRP05]. Notre expérience semble montrer une relation entre la distance interpersonnelle et l'activation des émotions (joie, peur et colère).	84
5.13 Combinaison MVN Awina et Oculus Rift	91

Liste des tableaux

1.1	Relation entre les fonctions et les composantes de l'émotion.	10
1.2	Tableau comparatif des différents phénomènes affectives et de leurs caractéristiques	10
1.3	Liste non exhaustive de différentes études portant sur la perception des émotions à travers le mouvement	15
2.1	Ensemble des situations étudiées dans le cas de la marche seul.	30
2.2	Ensemble des situations étudiées dans le cas de la marche en groupe. NTr=Non Transitif, Tr=Transitif, SD=Sans Dialogue, AD=Avec Dialogue.	30
2.3	Repères anatomiques pour le placement des marqueurs externes.	32
3.1	Ensemble des stimuli présentés aux sujets.	42
3.2	Matrice de confusion. Répartition des réponses données (émotion reconnue en %) en fonction des émotions jouées dans le cas de la marche seul.	44
3.3	Répartition des réponses données (émotion reconnue en %) en fonction des émotions jouées dans le cas de la marche en groupe lorsque les 2 acteurs jouent l'émotion.	45
3.4	Répartition des réponses données (émotion reconnue en%) en fonction des émotions jouées dans le cas de la marche en groupe lorsqu'1 seul acteur joue l'émotion.	45

Introduction

Contexte

Les interactions sociales forment notre quotidien. En effet, la plupart, des actions que nous réalisons chaque jour se font en interaction avec d'autres individus à l'instar d'une poignée de mains, de porter une armoire à plusieurs lors d'un déménagement ou encore de donner la main à son enfant pour traverser la rue. Ces interactions, qu'elles soient verbales ou non, peuvent être de différentes natures. Par exemple, certaines actions vont entraîner de la coopération ou de l'adaptation et d'autres de la compétition, ce qui entraînera de ce fait des comportements très différents. Dans le cas d'une interaction de type "coopération" par exemple, les individus devront sûrement se synchroniser pour accomplir une tâche en commun. Ceci nécessite alors une bonne perception et interprétation des mouvements de l'autre. Dans le cas d'une interaction de type "compétition", les individus devront anticiper les mouvements de l'autre. De nombreuses études ont montré que différents facteurs pouvaient influencer les interactions. Ainsi, pour une même tâche, l'interaction ne sera pas la même en fonction d'un certain nombre de facteurs tels que l'âge, le sexe, le statut social ou l'état affectif des individus. Par exemple, deux personnes en colère se dépêcheront de terminer une tâche qu'ils ont à réaliser en commun tandis que deux personnes contentes de réaliser la tâche ensemble prendront leur temps et discuteront. Dans cette thèse, nous nous focalisons sur l'impact du facteur émotionnel sur les interactions.

L'utilisation d'agents virtuels prend une part de plus en plus importante dans de nombreux domaines de la vie courante. Dans le domaine des films d'animation, les animateurs prennent soin de donner un caractère expressif aux personnages qu'ils conçoivent (Figure 1 a). Par ailleurs, nous sommes amenés à interagir de plus en plus régulièrement avec des humains virtuels que cela soit dans des environnements virtuels comme dans les jeux vidéos (Figure 1 b) ou sur Internet (Figure 1 c). Par exemple, sur les sites d'EDF ou de la SNCF, on peut interroger un agent virtuel pour nous aider à trouver une information ou résoudre un problème (Figure 1 c). Or, dans le cas des sites Internet et des jeux vidéos, pour que l'interaction entre l'humain réel et l'humain virtuel soit la plus réaliste possible, il faut que ce dernier agisse de manière naturelle. Il en est de même dans les films d'animation où les interactions entre les personnages doivent être crédibles. Dès lors, la prise en compte des émotions devient essentielle. Afin de pouvoir simuler de manière adéquate un humain virtuel, nous avons cherché à comprendre la nature des effets des facteurs émotionnels.

L'étude des émotions dans le cadre d'interactions entre humains réels et virtuels passe d'abord par l'étude des interactions entre humains réels. Pour cela, il faut se poser la



Figure 1 – Exemples d’agents virtuels : a) Capture des films d’animation *Les aventures de Tintin : le secret de la Licorne* réalisé par Steven Spielberg et *Rebelle* (©Pixar). b) Capture des jeux *Heavy Rain* (©Sony) et *Sims 3* (©EA Games). c) Assistantes virtuelles conçues par la société Do You Dream Up (©). Ces agents permettent à des sociétés de répondre aux questions de leurs clients de façon naturelle.

question de savoir quelle tâche étudier. Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés au cas de la marche. Comme le note Montepare [MGC87], "les situations quotidiennes nécessitent souvent que l'on fasse des jugements sociaux à partir de la démarche [...] Par exemple, on peut identifier des individus et arriver à déterminer leur but, attitude ou état émotionnel [...]". On peut donc estimer que si les émotions influencent la marche, c'est peut-être également le cas des interactions qui ont lieu pendant la marche. En effet, marcher nécessite non seulement de s'adapter aux contraintes physiques du milieu (à l'environnement, aux obstacles) mais également de s'adapter aux autres comme



Figure 2 – Extraits du court-métrage *La mécanique des émotions* présentant a) deux marcheurs dont un en colère, b) deux marcheurs contents. Sur ces extraits on s’aperçoit que l’émotion des marcheurs a influencée leur manière de marcher. (©Jonathan Perrinet)

par exemple lorsque l’on marche en groupe ou que l’on veut éviter ou croiser une autre personne. De même, on devine que deux personnes en colère (Figure 2 a) ne marcheront pas de la même manière qu’un groupe d’amis (Figure 2 b). Les premiers feront certainement de grands gestes brusques en exprimant leur colère tandis que les autres marcheront de façon plus rapprochée.

Problématique

Des études en Neurosciences et en Psychologie ont montré que nous adaptons notre comportement, et par conséquent notre manière d’interagir avec d’autres individus, en fonction des émotions que nous percevons [BSBC08, SCP⁺12, FSG⁺10]. Dans cette thèse, nous voulons étudier l’impact des émotions sur les interactions entre deux marcheurs. En effet, de nombreuses études ont déjà montré que les émotions avaient une influence sur la marche individuelle, notamment sur la vitesse de marche et l’amplitude des mouvements. De même, il a également été montré que marcher avec d’autres individus générait un grand nombre d’interactions. Cependant, à notre connaissance, aucune étude ne s’est penchée sur les interactions entre marcheurs expressifs. La première problématique de cette thèse est donc de **déterminer comment s’organisent les interactions entre deux marcheurs expressifs et de mesurer l’influence de l’état émotionnel des marcheurs sur ces interactions.**

La deuxième problématique de cette thèse porte sur les interactions avec des humains virtuels expressifs. Ceux-ci peuvent être utilisés dans le cadre de simulations de foule par exemple ou dans un contexte interactif comme les Serious Games. En effet, les études ont montré que plus les humains virtuels agissaient de manière réaliste, plus le sentiment de présence des utilisateurs était important [MRL08]. Elles ont également montré le fait qu’interagir avec des humains virtuels expressifs pouvait avoir une influence sur la manière dont les utilisateurs réagissent [dMCG12]. Il nous paraît donc essentielle de pouvoir reproduire ce que nous observons dans une situation réelle entre deux marcheurs réels à une situation marcheur réel/marcheur virtuel. La deuxième problématique de cette thèse

est donc de savoir si l'animation du corps dans sa globalité est suffisante pour rendre un humain virtuel expressif et de voir si les utilisateurs réagissent de la même manière que s'il s'agissait d'un humain réel.

Approche

Cette thèse s'inscrit dans une thématique pluridisciplinaire (Figure 3) dont les domaines sont les interactions, les émotions, la locomotion et ce dans le cadre des environnements virtuels.

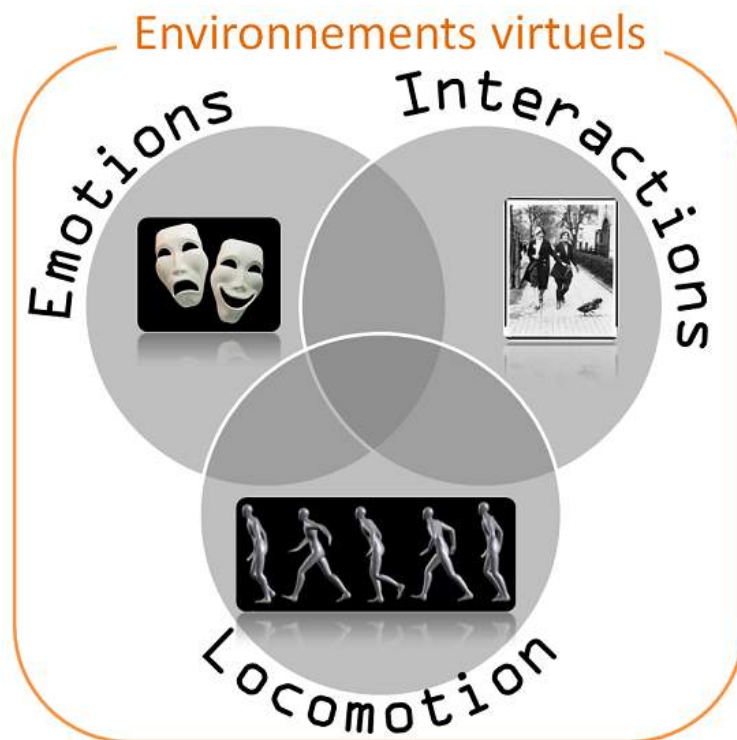


Figure 3 – Thématique pluridisciplinaire : la thèse s'inscrit à l'intersection du domaine des émotions, des interactions et de la locomotion.

Afin d'aborder les deux problématiques qui ont été présentées, nous avons procédé à une approche expérimentale en trois étapes (Figure 4) que nous détaillerons dans les prochains paragraphes. La première étape consiste à élaborer un protocole permettant l'étude des interactions physiques entre humains réels. Les données obtenues permettront alors, dans une deuxième étape, d'effectuer une analyse cinématique et de déterminer l'impact des émotions sur les interactions entre marcheurs réels. Enfin, dans la dernière étape, nous voulons étudier les interactions entre un humain réel et un humain virtuel et vérifier que l'on observe un comportement similaire à celui de deux humains réels.

Afin de procéder à l'analyse cinématique de la marche de deux individus expressifs, nous devons pouvoir obtenir les données cinématiques des deux marcheurs. Pour se faire, il existe deux principales méthodes. La première consiste à acquérir des données de locomotion en observant des individus évoluer dans un environnement naturel. C'est ce qu'a



Figure 4 – Analyse de l’effet des émotions sur les interactions entre marcheurs : une approche en trois étapes.

effectué Costa [Cos10] en plaçant une caméra vidéo sur le côté d’un tronçon de rue (Figure 5 a)). Dans son expérience, il observait des groupes de piétons afin de déterminer le positionnement entre les individus des groupes. La deuxième méthode consiste à observer des sujets dans le cadre d’une approche expérimentale dont les paramètres sont contrôlés. Un tel protocole requiert l’utilisation d’un système de capture de mouvement (Figure 5 b)). Le principal avantage de la première méthode est qu’elle permet d’observer des données obtenues dans un contexte écologique et garantissant ainsi un comportement naturel des individus. Cependant, elle possède de nombreux désavantages. Dans cette thèse, nous voulons étudier des marches dites expressives. Or, l’observation d’individus dans la rue nécessiterait de connaître l’état émotionnel de tous les passants au moment de leur passage devant la caméra. Ensuite, les données obtenues par les caméras vidéos seraient peu précises et ne permettraient pas obligatoirement de pouvoir calculer tous les paramètres cinématiques souhaités. En effet, le fait que les marcheurs ne soient équipés d’aucun marqueur ne permet pas de connaître leur position précise et l’accès aux paramètres cinématiques de l’ensemble des marcheurs d’un groupe apparaît difficile. Ces inconvénients peuvent être facilement évités grâce à l’utilisation d’un environnement expérimental contrôlé et notamment grâce à l’utilisation d’un système de capture de mouvement optoélectronique tel que le Vicon (©Vicon Motion Systems Ltd). D’une part, ces systèmes permettent d’obtenir des données cinématiques du corps dans sa globalité avec une grande précision. Ceci sera très important dans la deuxième étape de cette thèse (analyse cinématique) ainsi que dans la troisième où il faudra pouvoir reproduire les mouvements des marcheurs sur des humains virtuels. D’autre part, nous avons fait appel à des acteurs pour réaliser les séquences de marches expressives.

La première étape a donc consisté à capturer les mouvements de deux acteurs en train de réaliser des tâches de marche non contrainte, seul ou en groupe, en fonction de différents états émotionnels. La validation des données obtenues s’est faite en deux temps. Tout d’abord, nous nous sommes assurés que les émotions jouées par les acteurs étaient bien perçues grâce à une étude en perception. Ensuite, nous avons effectué une analyse cinématique de la marche seul afin de la comparer avec la littérature existante (études concernant la marche seul en ligne droite).

Dans la deuxième étape, nous avons réalisé une analyse cinématique de la marche en groupe. Nous nous sommes intéressés aux paramètres individuels de chaque marcheur tels que la vitesse de marche, l’orientation des segments, la longueur des pas ainsi qu’aux paramètres du groupe tels que les positions relatives entre les marcheurs. Nous avons



Figure 5 – Acquisition de données d’interactions physiques dans une tâche de locomotion grâce a) à une caméra vidéo placé sur un tronçon de trottoir et b) grâce à un système de capture de mouvements.

également étudié le décalage temporel entre les profils de vitesse des marcheurs afin de pouvoir observer la synchronisation entre ces derniers.

Enfin, dans la troisième étape, nous nous sommes intéressés aux interactions entre humains réel et virtuel. Pour cela, nous avons créé une base de données de mouvements de deux marcheurs expressifs en train de réaliser une tâche de marche en ligne droite. Ces données nous ont permis de réaliser une première analyse cinématique. Ensuite, nous avons extrait des cycles de marches expressives de la base de données afin d’animer un humain virtuel expressif. Nous avons validé l’expressivité de l’humain virtuel grâce à une étude en perception. Pour finir, nous avons demandé à des sujets réels de marcher avec l’humain virtuel. Les données recueillies nous ont permis de procéder à une deuxième analyse cinématique que nous avons comparée à la première.

Contributions

La première contribution de cette thèse concerne la conception et la validation d’un protocole expérimental permettant l’analyse d’interactions physiques entre marcheurs expressifs. En effet, de nombreuses études se sont penchées sur le cas de la marche expressive individuelle mais à notre connaissance, aucune ne s’est intéressée aux interactions physiques entre marcheurs expressifs d’un même groupe.

La deuxième contribution est directement liée à la première puisqu’elle concerne l’analyse cinématique de l’interaction entre deux marcheurs et la mise en avant de mécanismes d’interaction lors de marche expressive.

Enfin, grâce aux données de marche expressive obtenues, nous avons reproduit le mouvement d’un marcheur expressif sur un humain virtuel. Ceci nous a permis de vérifier que nous étions capables d’identifier les émotions d’un humain virtuel grâce à sa démarche et de réagir en conséquence. Ceci constitue la troisième contribution de cette thèse.

Structure

Dans le premier chapitre de ce manuscrit, nous présentons un état de l'art de la littérature recouvrant chacun des domaines étudiés dans cette thèse. Tout d'abord, nous abordons la notion d'émotion en essayant d'en proposer une définition et en présentant différents modèles permettant de les définir. Nous présentons également la manière dont peuvent s'exprimer les émotions sur un individu et notamment à travers l'exemple de la marche. Nous abordons ensuite la notion d'interaction en expliquant ce qu'elles sont et leurs conséquences sur la marche. Dans le deuxième chapitre, nous décrivons l'approche que nous avons utilisée dans nos deux premières expériences pour déterminer l'impact des émotions sur la marche d'humains réels. Le protocole expérimental utilisé ainsi que les données observées y sont décrits. Nous validons ce protocole dans le chapitre 3 en montrant comment l'utilisation de la marche non contrainte permet d'obtenir des résultats cohérents avec la littérature et comment elle permet des interactions entre marcheurs plus écologiques. Ces interactions entre humains réels sont étudiées dans le chapitre 4. Dans le chapitre 5, nous présentons notre dernière expérience consistant à faire marcher un humain réel avec un humain virtuel.

État de l'art

1

1.1 Les émotions

1.1.1 Définition

Dans son article "What are emotions? And how can they be measured?", Scherer [Sch05] met en avant que la question "qu'est-ce qu'une émotion?" donne rarement la même réponse. En effet, le terme *émotion* est souvent utilisé comme un terme générique pour décrire des concepts tels que les sentiments, l'humeur ou même les préférences. A l'heure actuelle, aucune définition ne fait consensus. Cependant, Olivier Luminet [Lum08] synthétise la définition ainsi : "[Les émotions sont des] réponses extrêmement rapides de l'organisme suite à certaines circonstances inhabituelles de l'environnement qui se caractérisent par un ensemble de réponses physiologiques, comportementales expressives et cognitives expérientielles concomitantes. [...] l'émotion se caractérise par une durée courte (quelques secondes à quelques minutes), des éléments déclencheurs aisément identifiables, une intentionnalité, une intensité élevée et une fréquence d'apparition faible". Par exemple, la colère est considérée comme une émotion puisqu'elle porte (intentionnalité) sur quelqu'un ou quelque chose. Au contraire, un état déprimé est considéré comme une humeur puisque n'ayant pas d'objet précis. De même, la vraie colère ne dure généralement que quelques instants lorsque survient l'événement déclencheur alors que l'état déprimé peut durer dans le temps.

Il est donc entendu que les émotions puissent se distinguer des autres phénomènes affectifs grâce à divers critères. Cependant, le fonctionnement même des émotions est sujet à discussion et deux grandes catégories d'approche existent. D'un côté, nous avons une approche dite biologique. Soutenue par Ekman [Ekm92], cette approche caractérise l'émotion par sa durée (très courte), un seuil de déclenchement rapide et spontané ainsi que par la présence d'éléments déclencheurs facilement identifiables. Enfin, pour Ekman, chaque émotion serait associée à un signe distinctif universel (expression faciale spécifique par exemple). Selon l'approche biologique, les émotions reflètent un ensemble de réponses adaptatives et servent de signal de danger pour l'organisme. Dans cette conception, un ensemble restreint d'émotions de base (colère, peur, tristesse, dégoût, surprise, joie) se manifesteraient de manière universelle suite à la présence de déclencheurs spécifiques. De l'autre côté, nous avons l'approche cognitive soutenue par Scherer [Sch05]. Pour lui, les émotions sont des séquences de changements d'état intervenant dans les cinq (mais pas

Fonctions émotionnelles	Composantes émotionnelles
Évaluation du milieu (stimulus...)	Cognitif (chargé du traitement de l'information, appraisal)
Régulation du système	Processus neuro-physiologique (symptômes corporels)
Préparation de l'action	Tendances d'action
Communication des intentions	Expression motrice (expression faciale et vocale par exemple)
Réflexion	État affectif subjectif

Table 1.1 – Relation entre les fonctions et les composantes de l'émotion.

	Intensité	Durée	Synchro	Lié à un événement	Vitesse de déclenchement
Émotion	+++	+	+++	+++	+++
Humeur	++	++	+	+	+
Caractère interpersonnel	++	++	+	++	++
Attitude	++	+++	0	0	+
Trait de personnalité	+	+++	0	0	+

Table 1.2 – Tableau comparatif des différents phénomènes affectives et de leurs caractéristiques. Adaptée de [Ber10]

obligatoirement) systèmes organiques (cf Table 1.1). Ces changements interviennent de manière interdépendante et synchronisée en réponse à l'évaluation d'un stimulus externe ou interne ayant un intérêt significativement important pour l'individu. Les théories cognitives de l'émotion mettent en évidence l'évaluation cognitive ou "appraisal" de la situation et les tendances à l'action. La Table 1.2 adaptée de [Ber10] propose un résumé des différents états affectifs et des caractéristiques de chacun.

1.1.2 Modèles d'émotions

La section précédente a mis en évidence le fait qu'il existe différentes définitions des émotions et qu'il n'existe pas de consensus quand à une définition particulière. Il n'est donc pas très surprenant qu'il y ai également différentes approches pour déterminer quelles sont les émotions. Ces différentes approches peuvent être regroupées en deux grandes familles de modèles : les modèles discrets et les modèles dimensionnels.

1.1.2.1 Modèle discret

Les modèles discrets se basent sur une approche biologique des émotions et sur l'idée que les émotions sont des réactions innées chez l'Homme. Dès 1872, Darwin [Dar72] suggère que les expressions faciales, par exemple, puissent être associées à des émotions particulières et que ces dernières seraient, par nature, innées. Cette théorie est largement reprise par Ekman, qui réalise en 1972 une expérience inter-culturelle où l'on présentait différentes

photos de personnes exprimant une émotion à des sujets de cultures différentes. Il était alors demandé aux sujets de mettre un mot sur l'émotion. Ekman résume ainsi les résultats de son expérience et des expériences similaires [EO79] : "1. Les observateurs ont labellisé certaines expressions faciales d'émotion de la même manière peu importe leur culture. 2. Les membres de cultures différentes ont les mêmes expressions faciales lorsqu'ils expérimentent la même émotion à moins que des règles culturelles spécifiques interfèrent". Grâce à cela, il a pu déterminer qu'il existait des émotions de base (également appelées émotions basales). Bien que leur nombre puisse varier en fonction de l'auteur, Ekman en compte pour sa part 6 : la colère, le dégoût, la peur, la joie, la tristesse et la surprise (Figure 1.1). Les autres émotions sont alors considérées comme étant composées par ces six émotions de base.



Figure 1.1 – Émotions de base d'Ekman (de gauche à droite : colère, peur, dégoût, surprise, joie, tristesse)

Les travaux d'Ekman et al. [EO79, EFH02] sur les expressions faciales ont également permis de mettre au point une méthode de description des mouvements des muscles du visage. Grâce à cette méthode, les mouvements du visage sont encodés selon une nomenclature spécifique et un degré d'activation (échelle allant de A pour une intensité minimale à E pour une intensité maximale). Par exemple, 1A correspond à la remontée de la partie interne des sourcils avec une intensité minimale et 1E correspond à la remontée de la partie interne des sourcils avec une intensité maximale. En partant du principe que pour chaque émotion correspond une expression faciale, le système FACS est capable d'encoder n'importe quelle émotion. Par exemple, selon le système FACS, une expression de peur est notée $1C + 2C + 4B + 5D + 20B + 26B$ (Figure 1.2). Un tel système peut être utilisé à la fois pour déterminer l'émotion d'un sujet réel grâce à une caméra qui analyse les mouvements du visage, mais également pour animer des agents virtuels.

1.1.2.2 Modèle dimensionnel

Le modèle dimensionnel part de l'hypothèse que les émotions sont la résultante de plusieurs composantes. Le circumplex de Russel [PRP05] (Figure 1.3) propose ainsi de répartir les émotions suivant deux axes orthogonaux : la valence (axe horizontal) et l'activation (axe vertical). La valence permet de classer les émotions en fonction de leur caractère plaisant (par exemple, la joie est une émotion positive et sera donc classée comme plaisante et la tristesse une émotion négative, classée comme déplaisante). L'axe d'activation représente le niveau d'excitation corporelle et donc l'intensité de l'émotion. L'avantage d'une telle

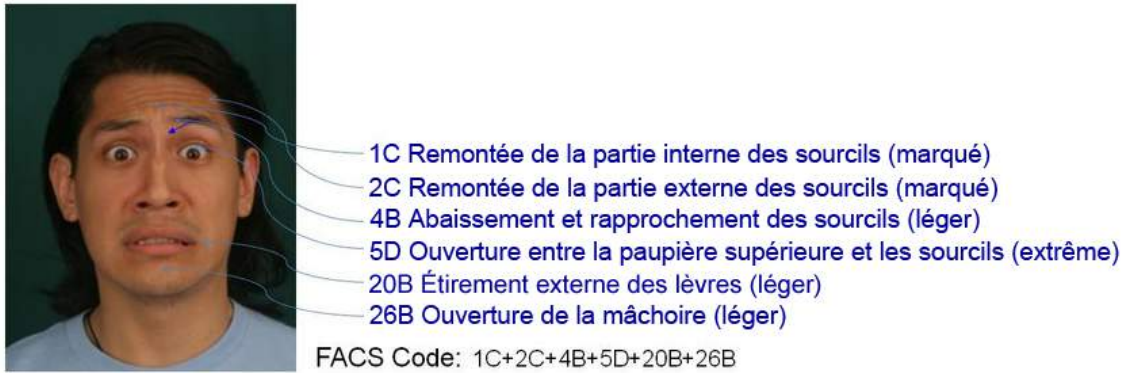


Figure 1.2 – Exemple d’encodage FACS d’une expression de peur. (©David Matsumoto)

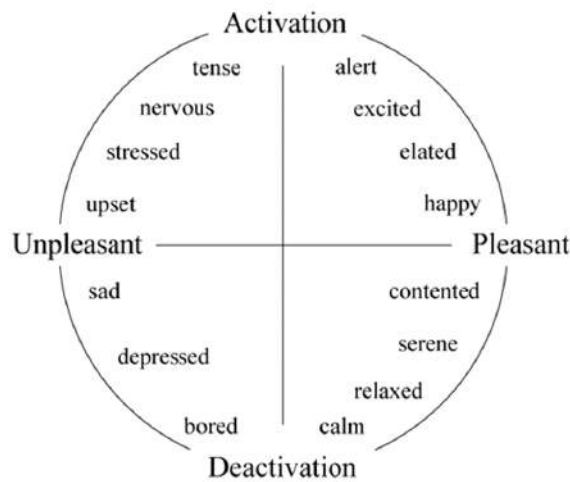


Figure 1.3 – Circumplex : modèle dimensionnel de Russel [PRP05].

représentation est qu’elle permet de représenter une infinité d’émotions en jouant seulement sur ces deux paramètres. D’autres dimensions ont par ailleurs été parfois ajoutées à ces deux dimensions comme par exemple celle de contrôle (Figure 1.4).

1.1.3 Expression et perception des émotions

Comme le montre Darwin dans "L’expression des émotions chez l’Homme et les animaux" [Dar72], les émotions peuvent transparaître à travers de nombreuses réponses physiologiques telles que les expressions faciales par exemple. Il réalise alors le premier corpus de postures "émotionnelles" (Figure 1.5). On peut remarquer que la plupart des émotions qui y figurent sont maintenant considérées comme des émotions de base. Depuis, il a été démontré que les émotions provoquent effectivement des réponses physiologiques aussi bien au niveau interne qu’au niveau externe. Par exemple, lors d’une étude réalisée grâce à l’imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, il a été montré que la vue d’expressions corporelles (visage flouté) exprimant la peur activait les régions cérébrales du gyrus fusiforme et de l’amygdale [HdG03]. Au niveau externe, ces réponses peuvent s’exprimer aussi bien à travers la communication verbale ou non verbale comme le regard, les expressions faciales, le ton de la voix, les expressions corporelles ou les gestes [KBB12].

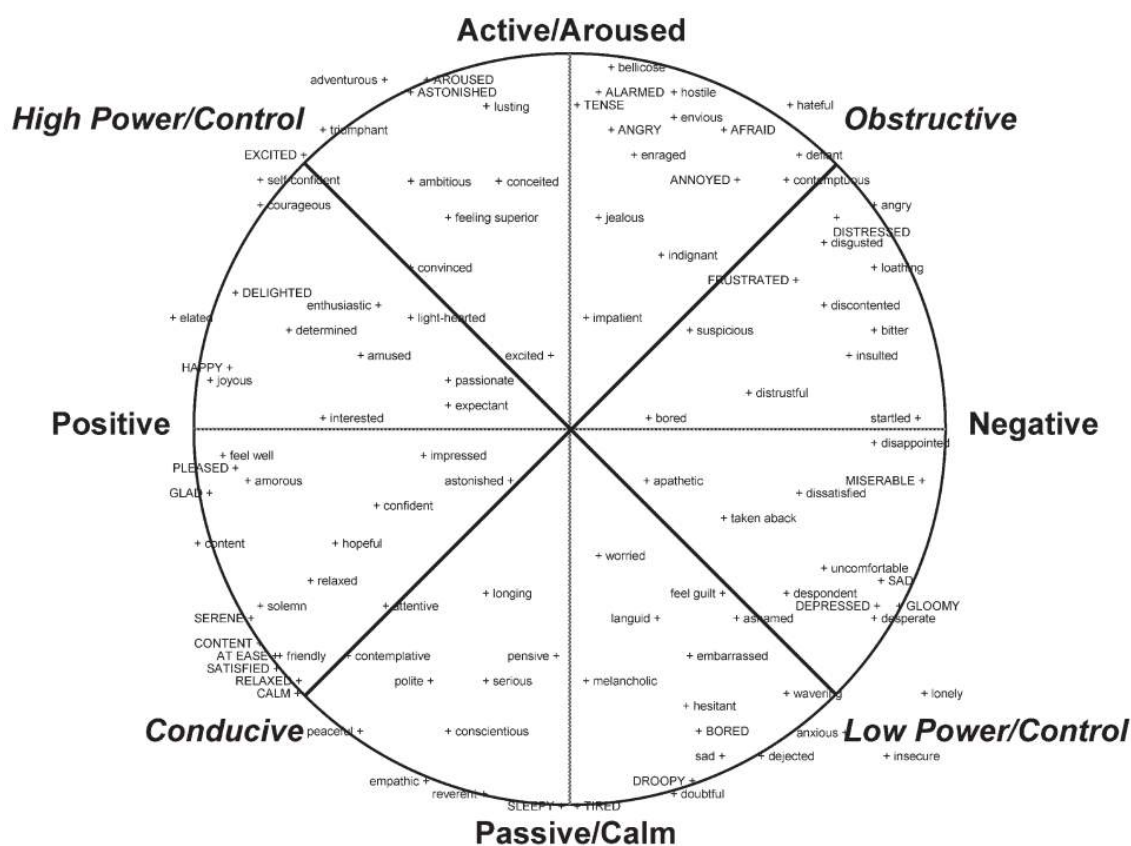


Figure 1.4 – Circumplex : modèle dimensionnel complexifié.

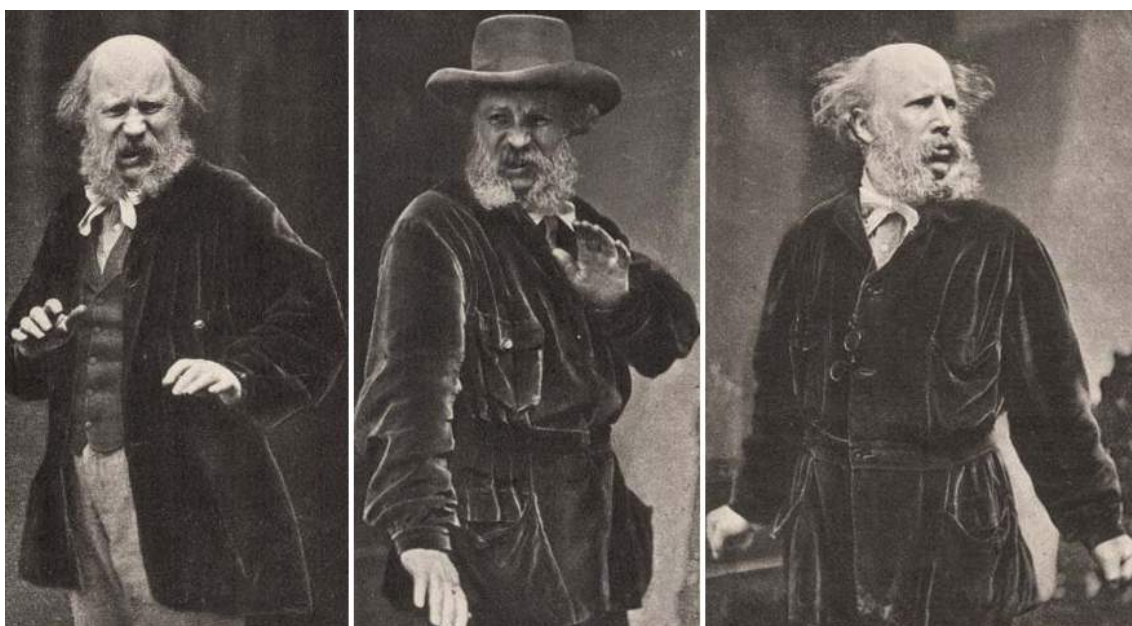


Figure 1.5 – Expression des émotions par Darwin [Dar72].

Jusqu'à il y a peu, l'étude de l'expression des émotions à travers les expressions faciales était la plus courante [Iza71, EO79, BSHKS11], mais les études les plus récentes tendent à montrer que la prise en compte du corps dans sa globalité est importante [ATD07, dG09]. Ainsi, de nombreuses études ont montré que les individus étaient ca-

pables de percevoir les émotions à partir de postures statiques [Wal98, Cou04] ou de corps animés [CG07, ROCG09, BOG⁺13]. Toutefois, comme le note Coulson [Cou04], "les instantanés [de corps animés, nda] peuvent parfois apporter une grande quantité d'informations utiles, mais d'autres fois, elles peuvent être insignifiantes voire même trompeuses". On peut également souligner que la reconnaissance des émotions à partir de corps animés est indépendante de la complexité de l'animation. Un sujet reconnaîtra aussi bien des émotions à partir d'animations en points (point-light display) [ATD07, ANM⁺11, CMHS06], d'extraits vidéos [CG07, KBH09, MGC87] ou d'animations d'humains virtuels [KBH09, ROCG09]. McDonnell et al. [MJM⁺08] ont ainsi présenté six stimuli différents de la même action à dix sujets : vidéo, animation haute résolution d'un humain virtuel, animation basse définition d'un humain virtuel, personnage de type dessin animé, mannequin articulé en bois et un personnage de zombie (Figure 1.6). A la vue de ces stimuli, une liste de 41 émotions était présentée aux participants et ils devaient indiquer le niveau d'intensité qu'il percevait pour chacune de ces émotions. Au vu de leurs résultats, les auteurs ont démontré que la reconnaissance des émotions est indépendante du stimulus qui leur est présenté.

La Table 1.3 proposée par Kleinsmith [KBB12] propose une vue non exhaustive mais représentative des différentes études sur la perception des émotions à travers les mouvements du corps et les caractéristiques étudiées.

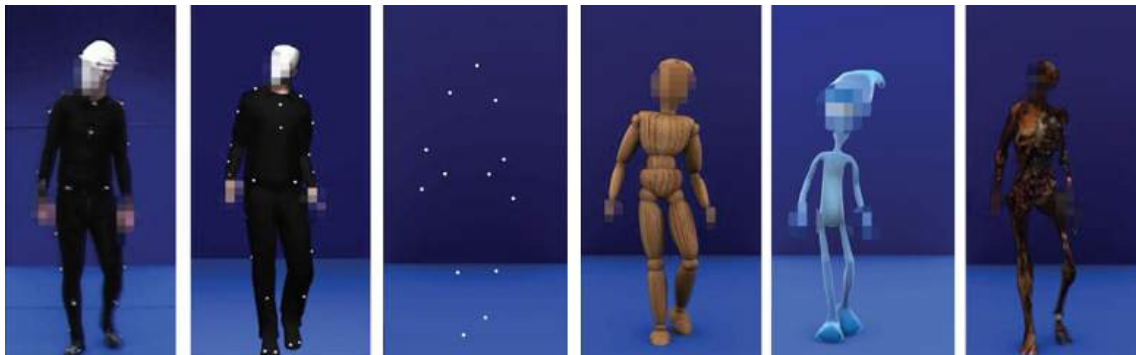


Figure 1.6 – Différents type de stimulus jouant la même émotion (vidéo, animation haute résolution d'un humain virtuel, animation en point d'un humain virtuel, mannequin articulé en bois, personnage de type dessin animé et un personnage de zombie) [MJM⁺08].

Refs	États affectifs ou dimensions étudiés	Posture Mouvement	Joué/Non joué	Stimuli	Caractéristiques étudiées
[ATD07]	Colère, dégoût, peur, joie, tristesse	Mouvement	Joué	Patch & full-light	Mouvements biologiques
[DF07]	Colère, peur, joie, tristesse	Mouvement	Joué	Vidéo	Vitesse, aisance, régularité
[GCF10]	Colère, anxiété, satisfaction, joie, fierté, tristesse, neutre	Mouvement	Joué	Vidéo	Torse, Membres supérieurs, Espace, Énergie, Temps, Flux
[GDC+11]	Amusement, anxiété, froid/chaleureux, colère, désespoir, exaltation, curiosité, panique, plaisir, fierté, soulagement, tristesse	Mouvement	Joué	Vidéo	Tête et mains
[Wal98]	Joie++, joie, tristesse, désespoir, peur, terreur, froid, colère, colère++, dégoût, mépris, honte, culpabilité, fierté, ennui	Posture	Joué	Vidéo	
[Cou04]	Colère, dégoût, peur, joie, tristesse	Posture	Animation procédurale	Images	Haut du corps, épaules, tête, bras
[DM89]	Joie, chagrin, colère, peur, surprise, dégoût, curiosité, honte, mépris, compassion, antipathie, admiration	Mouvement	Joué	Vidéo	Torse, bras, directions verticale et sagittale, force, vitesse
[ROCG09]	Colère, peur, joie, tristesse	Les 2	Joué	Animations	Tête, cou, colonne vertébrale, clavicules, épaules, coudes, poignets, hanche, genoux, chevilles

Table 1.3 – Liste non exhaustive de différentes études portant sur la perception des émotions à travers le mouvement. Adaptée de [KBB12]

1.1.4 Expression des émotions dans la marche

Comme l'a montré Montepare [MGC87], lorsque les individus sont à une distance telle qu'il est difficile de voir leur visage ou d'entendre leur voix, le jugement sur l'état émotionnel d'une personne se fait presque exclusivement sur les informations du mouvement de son corps comme la démarche par exemple. Ainsi, dans le cas de la marche, les émotions agissent sur la démarche de deux manières. D'une part, elles influencent la posture globale définie par les moyennes des angles d'articulations sur un cycle de marche [GCF12, KBH09, ROCG09]. D'autre part, les émotions influencent la cinématique de la marche, en particulier l'amplitude du mouvement des membres ainsi que la vitesse des mouvements du corps [PPS01, ASI03].

Dans leur étude, Roether et al. [ROCG09] partent du constat que la perception de l'état émotionnel des individus est basée sur des caractéristiques simples telles que la vitesse, mais également sur des indices plus subtiles de la posture. Ils se proposent alors d'identifier ces indices pour cinq états émotionnels : neutre, joie, colère, peur et tristesse. Pour cela, ils ont tout d'abord enregistré les mouvements de 25 individus exécutant une tâche de marche expressive le long d'une ligne droite de 5m. L'analyse statistique de ces données a révélé l'existence de caractéristiques posturales et cinématiques spécifiques à chaque émotion. Ainsi, la colère et la joie sont associées à des mouvements larges et rapides tandis que la peur et la tristesse à des mouvements lents et petits. Ils soulignent également que la flexion des membres ainsi que l'inclinaison de la tête permettent de distinguer des émotions ayant des vitesses de mouvement similaire. Ils ont ensuite confirmé leur résultats grâce à une étude en perception (Figure 1.7).

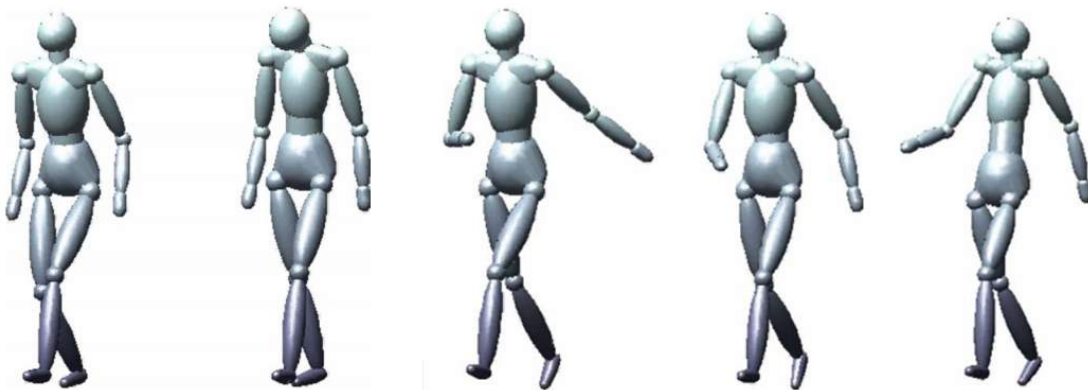


Figure 1.7 – Humain virtuel exprimant (de gauche à droite) la peur, la tristesse, la colère, un état neutre, et la joie. Adaptée de Roether [ROCG09].

Gross et al. [GCF12] partent également du même constat et ont ainsi demandé à 30 sujets d'identifier les marches expressives (colère, tristesse, joie, satisfaction, neutre) de 16 acteurs différents. Les émotions ont été plutôt bien reconnues puisque les résultats montrent des taux de reconnaissance de 72% (colère), 59% (joie), 88% (tristesse), 81% (satisfaction) et 86% (neutre). Ils ont ensuite demandé à 30 autres sujets de noter 6

caractéristiques de la marche expressive observée sur une échelle de 1 à 5 (Figure 1.8). Les résultats obtenus rejoignent ceux de la littérature. Ainsi, la tristesse est caractérisée par des mouvements lents et non énergiques. La colère est caractérisée par des mouvements rapides, tendus et étendus. Selon leurs résultats, la joie partage un grand nombre de caractéristiques similaires à celles de la colère. Les auteurs notent toutefois une différence avec un mouvement du torse plus étendu dans le cas de la joie. Selon eux, l'état neutre partage également des caractéristiques similaires à celles de la peur.

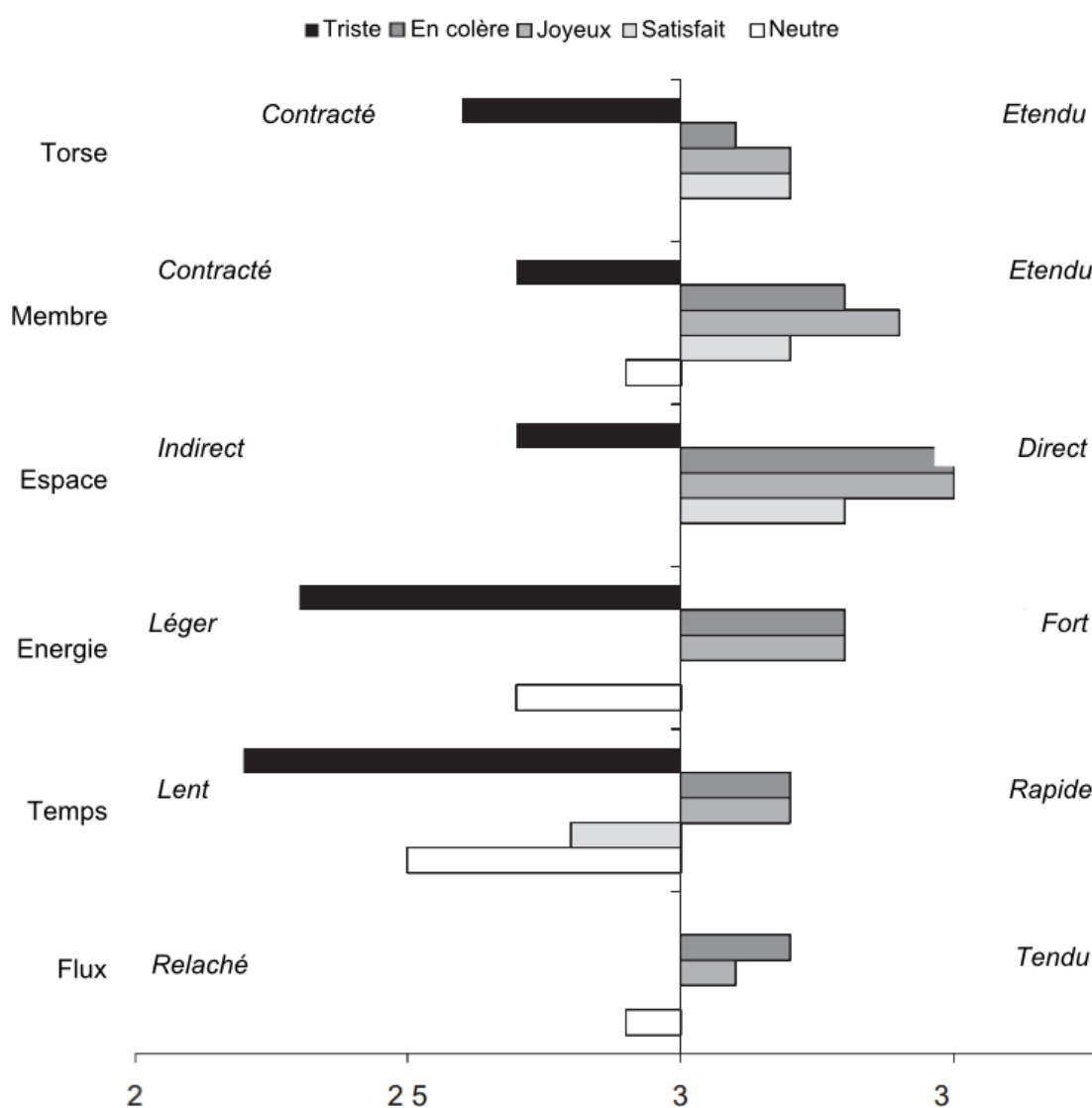


Figure 1.8 – Moyennes des notes obtenues lors de la notation des caractéristiques de marches expressives. Adaptée de Gross et al. [GCF12]

De leur côté, Naugle et al. [NHJ⁺11] ont démontré qu'un état émotionnel peut influencer l'initiation de la marche ainsi que la vitesse. Dans leur expérience, les auteurs ont demandé aux sujets de regarder une image représentant un état émotionnel (neutre, plaisant de faible intensité, déplaisant de faible intensité, plaisant de forte intensité, déplaisant de forte intensité) pendant environ 4s puis de marcher. Leur analyse a montré

qu'un stimuli fortement déplaisant accélère l'initiation de la marche. Ils ont également observé que la vitesse de marche est plus rapide suite à un stimuli plaisant (de faible ou forte intensité).

1.2 Interaction

1.2.1 Interactions sociales

La vie sociale quotidienne est définie par ses interactions avec les autres où la coordination et la synchronisation sociale joue un rôle très important [MRS09, SFCM11]. Verbales ou non, les interactions peuvent générer différents comportements en fonction du contexte, comme par exemple la coopération, la coopération, la compétition, etc. Ferri et collaborateurs [FEC⁺13] affirment que l'expression et la perception de l'état affectif des individus sont fondamentales pour une compréhension sociale appropriée, parce que les actions de la vie sociale sont étroitement liées aux émotions. Ils expliquent que "la nature de la perception des émotions ne peut être complètement comprise en se concentrant sur les facteurs sociaux, culturels, contextuels, individuels ou interpersonnels de façon séparée. La perception d'une émotion est incarnée et sa nature ancrée fournit un socle pour la communication sociale". Par exemple, lorsque des sujets regardent des vidéos d'un homme menaçant ou embêtant une femme, les régions de leur cerveau réagissent différemment en fonction des différentes expressions corporelles [SSGdG10].

Il a également été montré que la communication motrice joue un rôle important dans les interactions puisque les gens sont capables de synchroniser spontanément leurs mouvements même lorsque l'interaction n'est pas explicitement planifiée [SO97, RMS05]. De plus, Sacheli et al. [SCP⁺12] ont observé qu'à l'intérieur de groupes de personnes qui ne se connaissaient pas, il émergeait une coordination spatio-temporelle des actions des individus.

De même que les émotions influencent le comportement humain, elles influencent également les interactions entre humains. Cette influence a été principalement étudiée dans le cadre de tâche manuelles [BSBC08, SCP⁺12, FSG⁺10]. Les auteurs montrent ainsi que la planification et l'exécution d'une tâche sont influencées par les intentions de l'agent dans un contexte social donné [BSBC08]. Le fait que les individus puissent percevoir les états affectifs des autres provoque également des ajustements moteurs [SCP⁺12]. Par exemple, lorsqu'un des agents a une faible estime de son partenaire, leur coordination est perturbée [SCP⁺12].

1.2.2 Interactions dans le cas de la marche

Dans la section précédente, nous avons montré que les interactions jouent un rôle très important dans la vie de tous les jours et qu'elles sont influencées par l'état émotionnel des individus participant à l'interaction. La marche est donc en cela un exemple très intéressant puisqu'elle génère de nombreux types d'interactions qui ont été largement étudiés. Dans

leur étude, Nessler et Gilliland [NG09] ont montré que la synchronisation interpersonnelle involontaire entre deux sujets marchant côte à côte sur des tapis roulant était fortement influencée par la longueur de leurs jambes. Pour cela, ils ont fait marcher 20 paires de sujets hommes et femmes sur deux tapis roulant côte à côte. Les sujets ont marché ensemble pendant 60 secondes selon 6 conditions différentes. Hormis pour la sixième condition, il s'agissait d'altérer les retours visuels ou sonores des sujets. Leurs résultats ont suggéré que les participants ont besoin d'un faible retour sensoriel par rapport à leur partenaire pour qu'une synchronisation involontaire se produise. Par ailleurs, leurs résultats montrent qu'un tel comportement est fortement relié aux propriétés biomécanique des individus (la longueur de leurs jambes dans cette étude).

Dans son article "Interpersonal distances in group walking" [Cos10], Costa présente les résultats d'une étude visant à observer l'organisation spatiale de 1020 groupes d'adolescents et de jeunes adultes en train de marcher. L'expérience s'est déroulée dans cinq endroits différents d'Italie et a consisté à observer les vidéos de piétons marchant sur une portion de trottoir (figure 1.9). Tout d'abord, les résultats mettent en avant une forte influence du genre des piétons dans les dyades et les triades. Ainsi, les femmes marchent plus souvent côte à côte que les hommes. De même, peu importe la taille du groupe, les groupes d'hommes marchent plus vite que les groupes de femmes. Dans le cas de dyades mixtes, les hommes ont tendance à se placer un peu à l'avant dans les 2/3 des cas. Enfin, dans les groupes non mixtes, les résultats ont montré que les membres du groupes marchent moins côte à côte lorsque l'un d'eux est plus grand. Cependant, il semble que cela ne soit pas dû au fait que ce dernier puisse marcher plus vite puisque celui-ci n'est pas forcément à l'avant. Une des possibilités retenue par l'auteur serait alors que la taille ai une influence sur la gestion de l'espace personnel.

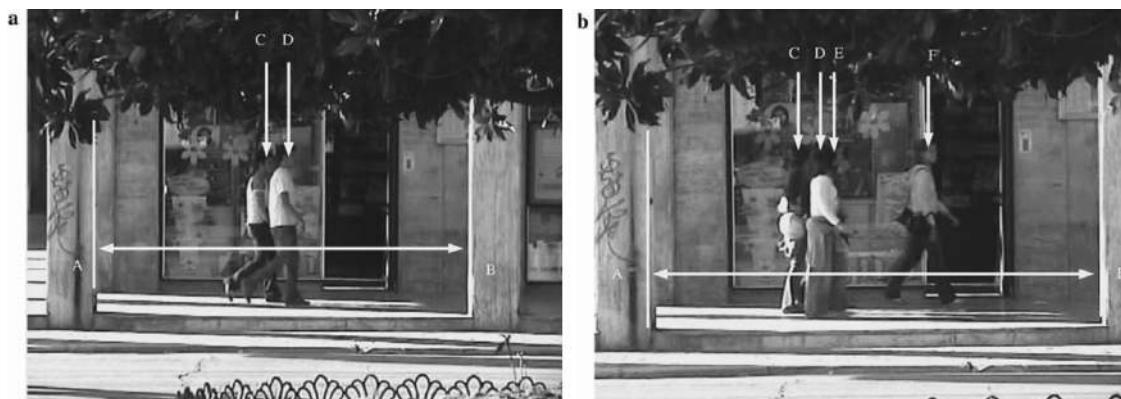


Figure 1.9 – Extraits des vidéos de l'expérience de Costa [Cos10] portant sur l'observation de groupes de piétons. La vitesse des passants étaient estimée entre les points A et B. Pour les dyades, le fait de marcher côte à côte était estimé en calculant la distance entre les positions des têtes (C et D) et pour les groupes plus nombreux, en calculant l'écart-type des distances entre les membres du groupe.

La notion d'espace personnel, aussi appelée proxémie, désigne la distance physique créant une zone de protection entourant chaque individu et qui permet de planifier et d'exécuter des adaptations de la marche tout en préservant la sécurité de l'individu [Tem95].

Comme l'a montré Hall [HH69] dès 1963, cette distance est influencée par les interactions sociales et quatre espaces ont ainsi été distingués (Figure 1.10) :

1. espace intime (de 15cm à 45cm)
2. espace personnel (de 45cm à 1.2m), pour les amis.
3. espace social (de 1.2m à 3.6m), pour les connaissances.
4. espace public (plus de 3.6m)

Comme le rappelle Costa dans son article [Cos10], de nombreuses études ont montré que la distance d'interaction entre deux individus peut être influencée par de nombreux facteurs tels que les différences d'âge [WJ66], de sexe [KE99], de culture [Aie87], de religion [Bal91], de préférence sexuelle [BCET76] ou de statut [LS67].

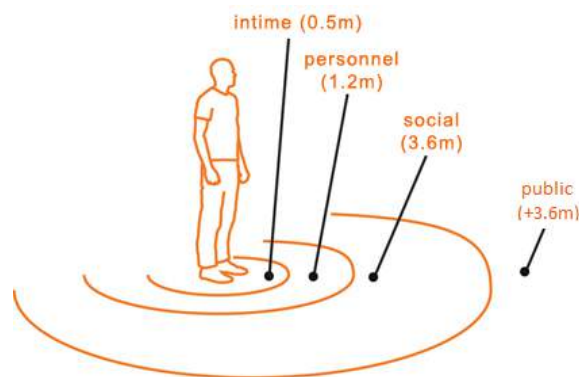


Figure 1.10 – Distances personnelles

Selon Ducourant et al. [DVKB05], la distance interpersonnelle a un effet significatif sur la coordination entre deux marcheurs. Leur expérience a consisté à faire marcher six paires de deux individus face à face en attribuant un rôle de meneur à un des sujets et un rôle de suiveur au deuxième. Les sujets démarraient chaque essai à une certaine distance l'un de l'autre (1, 2 ou 3m) et le but du meneur était de briser la distance interpersonnelle entre les deux marcheurs tandis que le suiveur devait maintenir cette distance. Les résultats ont montré que le suiveur pouvait se coordonner sur le meneur grâce au déplacement global de ce dernier. Cependant, même si aucune synchronisation au niveau segmentaire n'a été observée, les auteurs ont conclu que les sujets étaient capables de produire un comportement similaire à celui de l'autre marcheur au niveau global et que la distance interpersonnelle entre eux avait un effet sur le retard entre leur synchronisation. Ainsi, plus la distance était importante, plus le retard l'était.

1.3 Les humains virtuels expressifs

Dans le domaine de l'animation par ordinateur et de la réalité virtuelle, il est essentiel de concevoir des humains virtuels expressifs. Ceux-ci doivent être animés et réagir comme le feraient des humains réels [WPB93]. Les études soulignent que l'expression des émotions

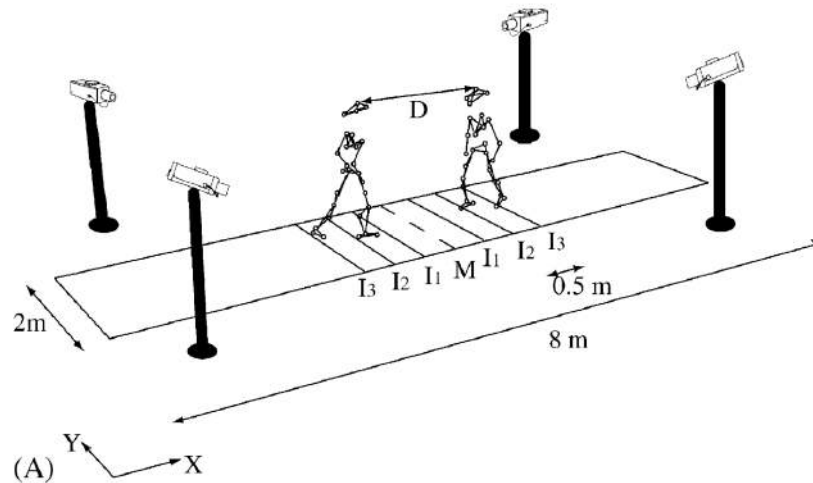


Figure 1.11 – Protocole expérimental de l'expérience de Ducourant et al. [DVKB05]. Les sujets devaient maintenir la distance interpersonnelle D entre eux.

participe grandement au réalisme global du comportement des humains virtuels [FMH04]. Par exemple, McQuiggan et al. [MRL08] ont montré que le fait d'utiliser des humains virtuels empathiques dans une tâche d'enseignement (de type serious game) permet d'augmenter le sentiment de présence des utilisateurs (des adolescents dans leur cas). De leur côté, Melo et al. [dMCG12] ont étudié comment les émotions exprimées par un agent virtuel, à travers des expressions faciales, peuvent influencer les négociations entre ce dernier et des sujets réels. Dans cette étude, les sujets avaient pour objectif de négocier la vente d'un abonnement téléphonique à un agent virtuel en essayant de jouer sur trois paramètres : le prix du téléphone, la durée de la garantie et la durée du contrat. La consigne qui leur était donnée était de négocier jusqu'à ce que l'une des parties accepte la proposition de l'autre. Au début de l'expérience, les sujets faisaient une première offre à l'agent virtuel. L'agent virtuel répondait alors en exprimant une des cinq émotions suivantes : neutre, joie, tristesse, colère et culpabilité (Figure 1.12). Contrairement à ce qui leur avait été dit lors des consignes, l'expérience prenait en réalité fin lorsque le sujet formulait une nouvelle offre. En comparant l'offre de départ des sujets à leur offre finale, les auteurs ont observé que l'émotion exprimée par l'agent virtuel avait influencé l'offre finale. Ainsi, les sujets ont concédé plus d'avantages aux agents exprimant la colère qu'à ceux exprimant la joie. Il semble en effet, que les sujets ont concédé des avantages plus facilement aux agents en colère afin d'éviter que la négociation ne soit trop longue ou ne tombe dans l'impasse. De même, d'après les questionnaires remplis lors de l'expérience, les sujets s'attendent à ce que les agents virtuels acceptent plus facilement une offre si ces derniers ont exprimé la joie plutôt que la tristesse, la colère ou la culpabilité. Les résultats ont également montré que les sujets, s'ils en avaient eu la possibilité, auraient été plus enclin à négocier de nouveau avec un agent souriant plutôt qu'avec un autre.

L'importance de l'expressivité des humains virtuels a alors conduit de nombreuses études à s'intéresser à la manière dont les émotions peuvent être communiquées. D'une

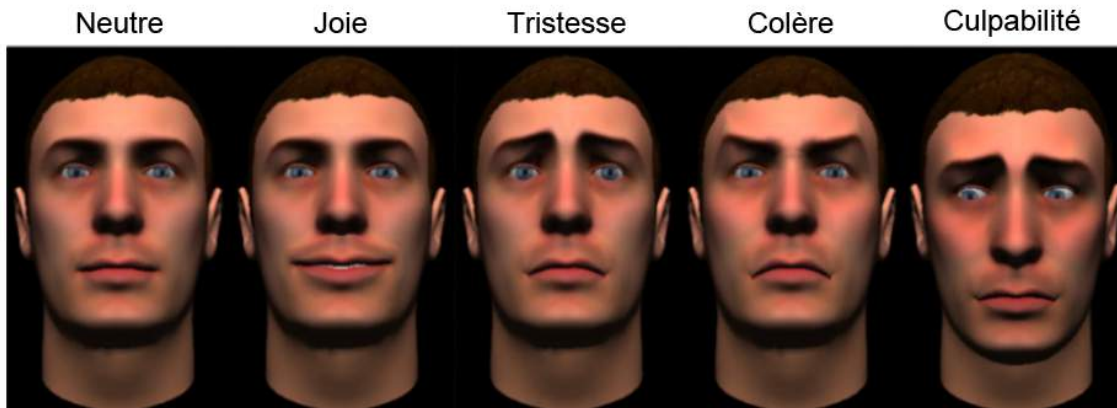


Figure 1.12 – Expressions faciales expressives utilisées comme stimuli dans l’expérience de Melo et al. [dMCG12].

part, de nombreuses études se sont intéressées à l’expression des émotions à travers les expressions faciales [MRL08, FMH04, ONBP12]. Ainsi, Fabri et al. [FMH04] ont utilisé le système de codage FACS [EFH78] (voir Section 1.1.2.1) pour animer les expressions faciales d’un humain virtuel. Cependant, afin d’obtenir une réaction positive des sujets face à l’humain virtuel ¹, les auteurs ont décidé d’utiliser un modèle virtuel possédant un nombre limité de contrôleurs faciaux (Figure 1.13) et par conséquent une version simplifiée de FACS. Pour tester l’expressivité de leur humain virtuel, les auteurs ont mené une étude en perception. Ils ont ainsi présenté à 29 sujets, 28 photographies ainsi que 28 représentations virtuelles de ces photographies (Figure 1.13). Les sujets ont dû déterminer l’émotion présentée à l’écran. Les résultats indiquent que, bien que les auteurs aient utilisé un modèle simplifié de FACS, la plupart des émotions sont bien reconnues (surprise, la colère, la joie, la tristesse et l’état neutre). Les émotions les moins bien reconnues (peur et dégoût) sont des émotions pour lesquelles les expressions faciales possèdent des caractéristiques communes avec d’autres émotions, induisant ainsi les sujets en erreur. Malgré tout, pour les auteurs, l’utilisation d’un tel système d’encodage des émotions doit être à la base de la conception d’humains virtuels expressifs.

Dans leur étude, Ochs et al. [ONBP12] abordent le problème des émotions partageant des caractéristiques communes avec d’autres. Comme les auteurs le soulignent, le sourire peut communiquer des intentions différentes en fonction des autres caractéristiques de l’expression faciale. Les auteurs proposent alors un algorithme permettant de distinguer un sourire d’amusement, d’un sourire de politesse ou de gêne. Leur algorithme se base sur l’apprentissage d’un corpus de sourires généré par 348 participants. Ces sourires ont ensuite été classés grâce à un arbre de décision chargé d’extraire le minimum de caractéristiques nécessaires pour reconnaître les émotions. Les sourires générés par leur algorithme ont ensuite été validés par une étude en perception.

¹Selon la théorie de la vallée dérangeante (de l’anglais uncanny valley [MT81]), un humain virtuel extrêmement réaliste au niveau du graphisme mais qui ne bouge pas de manière extrêmement réaliste peut être rejeté par les utilisateurs. Par conséquent, pour qu’un humain virtuel soit bien accepté, il faut que le réalisme de ses mouvements coïncide avec son réalisme graphique.

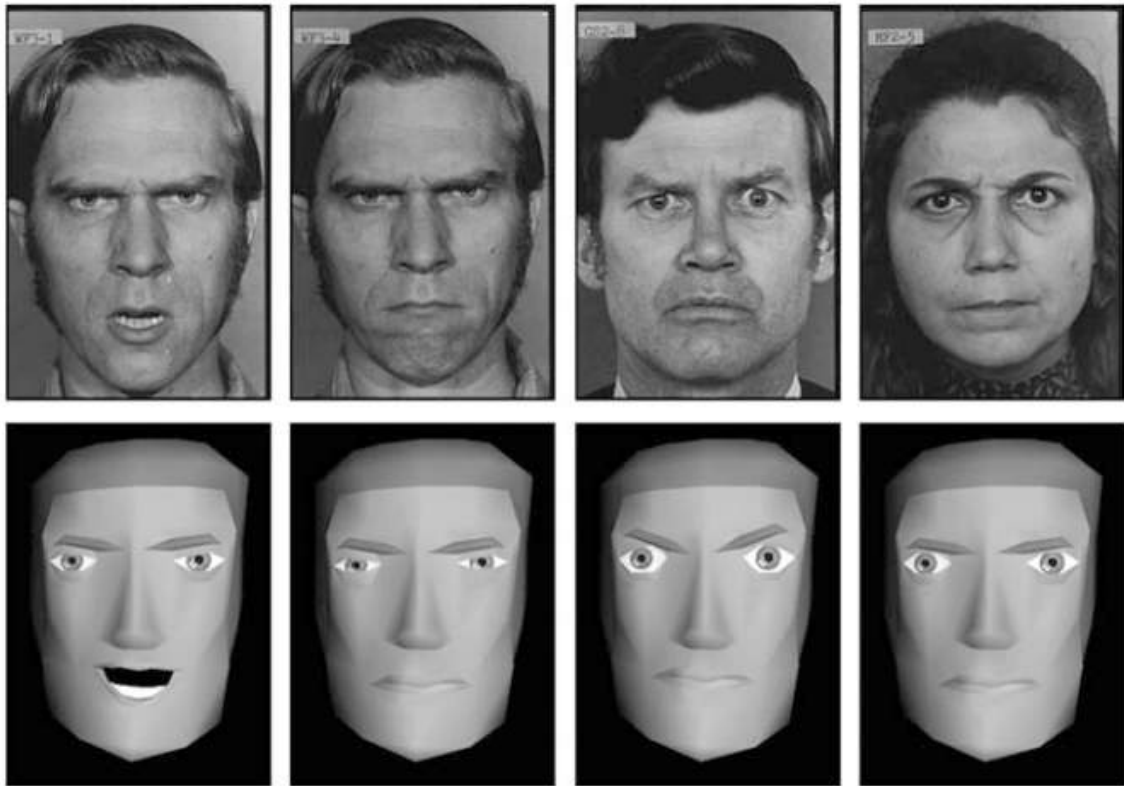


Figure 1.13 – Conception de stimuli à partir de photographies d’expressions faciales et du langage FACS. Les auteurs ont utilisé des photographies d’expressions faciales (en haut) pour pouvoir appliquer des expressions faciales à un humain virtuel grâce à la méthode FACS. Adaptée de [FMH04]

D’autre part, d’autres études se sont penchées sur la conception d’humains virtuels capables d’exprimer des émotions à travers les mouvements du corps d’une manière plus générale [Pel09, NHP11, EE12]. Deux approches sont alors généralement utilisées : l’animation à partir de capture de mouvements ou l’animation procédurale. Dans le premier cas, les émotions sont jouées par des acteurs. Par exemple, Ennis et Egges [EE12] ont mené une étude en perception portant sur la reconnaissance de 15 paires d’émotions (version positive et négative d’une même émotion, par exemple : admiration-dégoût). Les stimuli de l’expérience ont été créés à partir de la capture d’un seul acteur puis ont été rejoués par un humain virtuel de type mannequin (Figure 1.14). Ils ont ensuite demandé à 17 participants de reconnaître l’émotion exprimée par l’humain virtuel en proposant trois choix : l’émotion jouée, l’émotion opposée ou aucune des 2. Les résultats de l’expérience ont montré que, contrairement aux émotions positives, la plupart des émotions négatives étaient bien reconnues. Selon les auteurs, le fait que les émotions positives soient moins bien reconnues est dû au fait que celles-ci sont inversées avec d’autres.

Dans le deuxième cas, l’animation des émotions est générée de manière procédurale. Niewiadomski et al. proposent ainsi une approche séquentielle multimodale [NHP11]. Les émotions sont créées à partir d’un langage (appelé Multimodal Sequential Expressions Language) permettant d’agir sur les mouvements du corps ainsi que sur leur ordonnance-

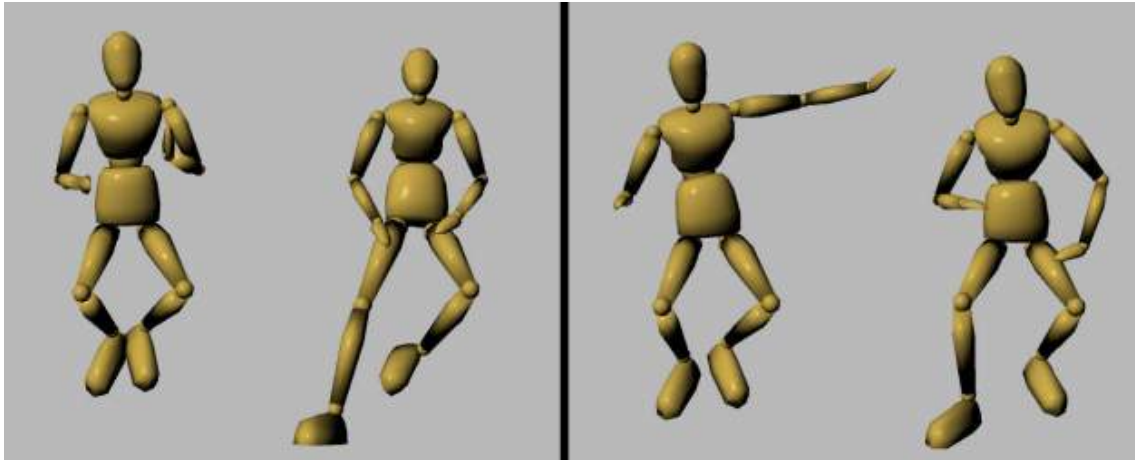


Figure 1.14 – Stimuli utilisés dans l’expérience de Ennis et Egges [EE12].

ment et leur durée. Il est par exemple possible de contrôler les expressions faciales (grâce à FACS), le regard, l’orientation de la tête, les geste des membres supérieurs ainsi que l’orientation du torse. Les différents mouvements sont ensuite ordonnées comme illustré Figure 1.15. Pour évaluer leur méthode, les auteurs ont procédé à plusieurs études en perception. Dans un premier temps, les sujets ont dû reconnaître huit émotions générées grâce à leur méthode : colère, anxiété, joie, honte, peur panique, fierté, soulagement et nervosité. Les résultats ont souligné de bon taux de reconnaissance, en particulier pour la colère, la joie, la peur et le soulagement. Les auteurs pensent que les émotions les mieux reconnues sont également celles qui possèdent le plus de modalités par rapport aux émotions principalement exprimées à travers les expressions faciales. Dans un deuxième temps, les résultats ont montré que le taux de reconnaissance est meilleur lorsque l’émotion est exprimé à travers plusieurs modalités. Les auteurs notent cependant que la qualité des émotions générées dépend beaucoup de la façon dont elles ont été codées.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu des différents domaines concernés par cette thèse. Dans un premier temps, nous avons cherché à définir ce qu’est une émotion et les caractéristiques qui permettent de distinguer une émotion des autres états affectifs (comme l’humeur par exemple). Nous avons vu que deux grandes approches se distinguent : l’approche biologique soutenue par Ekman et l’approche cognitive soutenue par Scherer. La première émet l’hypothèse que les émotions sont innées à l’Homme et qu’elles se déclenchent suite à un déclencheur spécifique. La deuxième part du principe que les émotions sont les résultantes d’un processus cognitif déclenché par un stimulus interne ou externe. Nous nous sommes ensuite intéressé à savoir quelles sont les émotions. Pour cela, nous avons présenté les deux modèles les plus courants : le modèle discret et le modèle dimensionnel. Le modèle discret, proposé par Ekman, suggère qu’il existe six émotions de base (colère, dégoût, peur, joie, tristesse et surprise) et que les autres sont des composantes

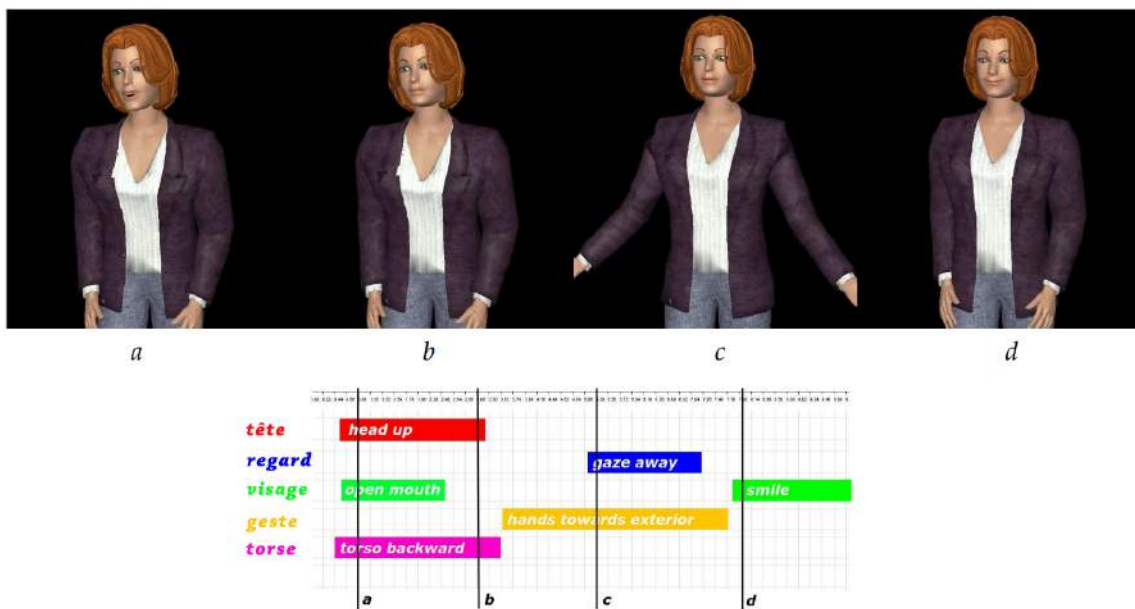


Figure 1.15 – Animation procédurale d’un humain virtuel par une approche séquentielle multimodale. Les mouvements du corps permettant d’exprimer une émotion sont ordonnés grâce à un langage spécifique. Adaptée de [NHP11].

de ces émotions. Le modèle dimensionnel, de Russel, émet l’hypothèse que les émotions sont réparties autour de deux axes orthogonaux : valence et activation. Chaque émotion est ensuite placée en fonction d’une certaine valeur de valence et d’activation. Enfin, nous avons montré comment les émotions pouvaient s’exprimer à travers les expressions faciales mais également à travers les mouvements du corps. Dans le cas de la marche, les émotions agissent à la fois sur la posture ainsi que sur la cinématique de la marche. On peut constater que la plupart des expériences sur la marche se font dans le cadre d’une marche en ligne droite.

Dans un deuxième temps, nous avons pointé le rôle essentiel des émotions dans les interactions sociales. En effet, les études ont souligné le fait que des comportements de coordination, par exemple, peuvent être observés dans des contextes émotionnels particuliers. De nombreuses études se sont également intéressées aux interactions pendant la marche comme par exemple dans le cas de la synchronisation entre marcheurs ou de la proxémie. Concernant la proxémie, les études ont mis en évidence l’influence de nombreux facteurs sur ce paramètre. Cependant, à notre connaissance, aucune étude ne s’est intéressée aux facteurs émotionnels lors d’interactions entre deux marcheurs.

Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons présenté les diverses avancées dans le domaine des humains virtuels expressifs. Suite à la mise en avant de leur importance, de nombreux travaux se sont penchés sur leur conception. Beaucoup d’entre eux se sont concentrés sur l’expression des émotions à travers les expressions faciales (notamment grâce au système FACS). Malgré tout, un certain nombre d’études portent sur l’utilisation du corps dans sa globalité. Deux approches sont alors couramment utilisées : l’animation par capture de mouvement ou l’animation procédurale. La première a l’avantage d’être

extrêmement réaliste mais coûteuse en temps et matériel. La seconde permet une plus grande variété d'émotions mais dont le réalisme dépend de la précision avec laquelle a été encodée l'émotion.

Influence des émotions sur une marche non contrainte : protocole général



Figure 2.1 – Dispositif expérimental pour la capture de mouvement de deux acteurs dans la salle Métivier (du centre IRISA/INRIA Rennes). Les caméras du système de capture Vicon MX-40 sont disposées tout autour de la salle. On aperçoit le marquage de la zone de capture au sol.

2.1 Introduction

L'évaluation de l'impact des facteurs émotionnels lors d'interactions physiques entre humains réels et humains virtuels est une question qui, à notre connaissance, n'a pas encore été étudiée. Cependant, avant de pouvoir envisager la question des interactions entre un humain réel et un humain virtuel, il faut d'abord s'intéresser à l'impact des facteurs émotionnels lors d'interactions physiques entre deux humains réels. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place un protocole expérimental qui permette des interactions physiques naturelles entre deux humains réels. Dans le cadre de cette thèse, nous avons développé une

nouvelle approche expérimentale. Celle-ci a consisté à faire marcher des acteurs de manière non contrainte dans différents états émotionnels. Dans un premier temps, il a été demandé aux acteurs de marcher seul. Dans un deuxième temps, il leur a été demandé de marcher ensemble afin de pouvoir étudier l'influence des émotions sur la cinématique de leurs interactions. Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord le protocole expérimental qui a été mis en place pour obtenir les données. Ensuite, nous décrirons le dispositif matériel mis en place et enfin, nous terminerons en décrivant le processus de traitement des données avant leur analyse.

2.2 Protocole expérimental

2.2.1 Population d'étude

Nous avons recruté deux comédiens (hommes) professionnels âgés de 35 et 36 ans. Les deux comédiens avaient un physique similaire (Figure 2.2) ce qui a permis d'éviter un éventuel effet de la taille sur l'organisation spatiale entre les marcheurs comme l'a observé Costa dans son étude [Cos10]. Ils ont été rémunéré pour leur participation à l'expérience et ont rempli un consentement de participation conformément à la déclaration d'Helsinki.

L'utilisation d'acteurs pour réaliser ce genre d'étude a été longuement discutée dans le livre de Scherer et al. [SB10]. Les auteurs en concluent que l'utilisation de stimuli créés grâce à des acteurs ne permet certes pas d'étudier des émotions dites spontanées, mais permet néanmoins d'étudier les réactions face à des signaux (expressions faciales, voix, expression corporelles, etc.) associés à des émotions.

Enfin, étant donné le caractère exploratoire de nos expériences, nous n'avons fait appel qu'à deux comédiens afin de pouvoir dégager les tendances qui se dégagent de l'interaction entre deux marcheurs.

2.2.2 Tâche

Dans chacune des tâches de notre expérience, les acteurs ont marché à l'intérieur de la zone de capture dans un état émotionnel défini au préalable. Leur unique consigne était de marcher à l'intérieur de la zone matérialisée au sol par des bandes, sans jamais en sortir. Aucune indication n'a été donnée quand à leur trajectoire, vitesse ou manière de marcher. Nous avons étudié deux situations de marche :

1. Marche seul : un acteur marche seul. Cette situation a permis de déterminer la validité du protocole expérimental proposé. En effet, la majorité des observations de la littérature concernant l'effet des émotions sur la marche se sont faites sur un seul marcheur à la fois. Le fait d'avoir une situation de marche seul permettra donc de s'y comparer. Dans cette situation, nous avons réalisé 2 essais de 30 secondes pour chacun des états émotionnels étudiés et pour chaque acteur.



Figure 2.2 – Extrait d’une séquence vidéo montrant les 2 comédiens côte à côte.

2. Marche en groupe : les deux acteurs marchent ensemble. Dans cette situation, nous avons étudié l’influence des émotions sur les interactions entre les deux marcheurs. Ici, la consigne donnée aux acteurs était de marcher ensemble sans plus d’indications. Nous avons réalisé 3 essais d’1 minute pour les états neutre, de colère (avec ou sans dialogue et transitive ou non) et de peur (transitive ou non).

Au début de chaque essai, l’expérimentateur a annoncé l’émotion que les comédiens devaient jouer (en spécifiant également s’ils pouvaient parler et si l’émotion était transitive ou non). Ces derniers ont eu le temps qu’ils désiraient pour se préparer et se mettre en condition. Les deux comédiens étant des professionnels, ils étaient habitués à faire de l’improvisation et se mettaient ainsi d’accord sur une situation de départ. A leur signal, la capture commençait. Dans chacune de ces situations, différents états émotionnels ont été étudiés.

2.2.3 États émotionnels

Nous nous sommes intéressés à 3 émotions : la joie, la colère et la peur ainsi qu’à un état dit neutre. Ces émotions font partie des émotions de base d’Ekman [E⁺92] et sont habituellement utilisées dans les études du domaine [dG09]. En fonction de l’émotion considérée, il pouvait y avoir des variations. Ainsi, pour la colère et la peur, il existait une condition de transitivité dans les situations où les deux acteurs étaient présents. Dans le cas de la colère, si celle-ci était transitive, cela voulait dire que cette colère était dirigée contre l’autre sujet. Dans le cas contraire, la colère avait pour origine une raison extérieure quelconque. De même, si la peur était transitive, cela voulait dire que le sujet jouant l’émotion avait peur de l’autre sujet. De plus, dans le cas de la colère, une condition de

Situations émotionnelles	Nb répétitions	Durée	Total répétition	Durée totale
4 Neutre Joie Colère Peur	2	30''	= 4 * 2 = 8 par acteur (soit 16 en tout)	= 8 * 30'' = 4' par acteur (soit 8' en tout)

Table 2.1 – Ensemble des situations étudiées dans le cas de la marche seul.

	Situations émotionnelles		Nb répétitions	Durée	Total répétition	Durée totale
	Acteur 1	Acteur 2				
6	Colère (NTr, SD) Colère (NTr, AD) Colère (Tr, SD) Colère (Tr, AD) Peur (NTr) Peur (Tr)	Neutre	3	1'	= 6 * 3 = 18	= 18 * 1' = 18'
6	Neutre	Colère (NTr, SD) Colère (NTr, AD) Colère (Tr, SD) Colère (Tr, AD) Peur (NTr) Peur (Tr)	3	1'	= 6 * 3 = 18	= 18 * 1' = 18'
8	Neutre Joie Colère (NTr, AD) Colère (Tr, SD) Colère (Tr, AD) Peur (NTr) Peur (Tr)	Neutre Joie Colère (NTr, AD) Colère (Tr, SD) Colère (Tr, AD) Peur (NTr) Peur (Tr)	3	1'	= 8 * 3 = 24	= 24 * 1' = 24'

Table 2.2 – Ensemble des situations étudiées dans le cas de la marche en groupe. NTr=Non Transitif, Tr=Transitif, SD=Sans Dialogue, AD=Avec Dialogue.

dialogue était également ajoutée dans les situations de marche en groupe. Les acteurs se mettaient alors d'accord sur une situation de départ et improvisaient pendant la capture. Ils pouvaient ensuite commencer à parler dès que la capture commençait.

L'ensemble des situations étudiées est résumé dans les Tables 2.1 et 2.2.

Comme on peut le constater dans la Table 2.1, dans le cas de la marche seul, chaque acteur a réalisé 8 captures d'une durée totale de 4 minutes. Soit un total de 16 captures tout acteur confondu pour un total de 8 minutes. Dans le cas de la marche en groupe 2.2, nous avons 20 situations (6 + 6 + 8) d'une durée d'1 minute qui ont été répétées 3 fois, soit un total de 60 captures d'une durée totale de 60 minutes. Au final, nous avons donc capturé 76 situations pour une durée de capture totale d'1 heure et 8 minutes.

2.2.4 Méthodologie générale

La campagne de capture de mouvement s'est déroulée dans la salle Métivier du Centre IRISA/Inria Rennes (Figure 2.1). Les dimensions de cette salle hors estrade et hors escalier sont de 10m x 10m. Afin de capturer le mouvement des acteurs, nous avons utilisé le

système optoélectronique de capture de mouvement Vicon MX-40 doté de 12 caméras synchronisées à 120Hz. Les caméras ont été réparties tout autour de la salle (un cercle de 8m de diamètre environ) afin de créer la zone de capture la plus grande possible (Figure 2.3).

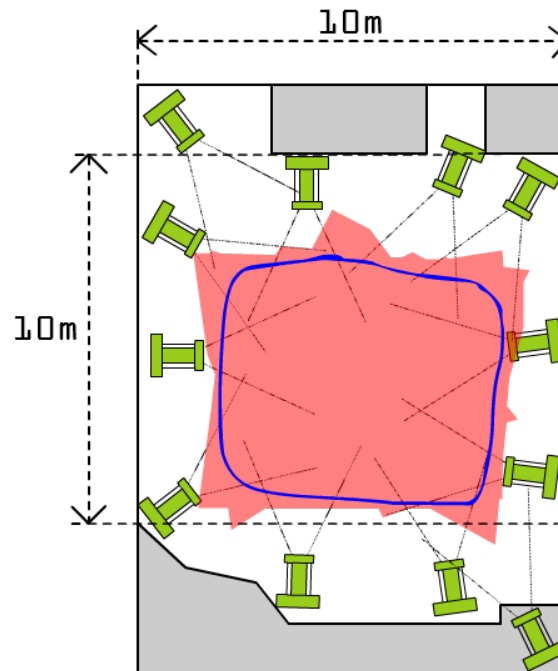


Figure 2.3 – Disposition du système de capture de mouvement à l'intérieur de la salle Métivier. La zone rouge représente les champs de vision des caméras.

Chaque participant a été équipé de 43 marqueurs placés sur des points anatomiques standardisés (Figure 2.4 et Table 2.3). Cette disposition de marqueur permet de reconstruire l'intégralité du corps du participant et ainsi pouvoir analyser chacun de ses mouvements en fonction des besoins.

La première étape lors d'une session de capture de mouvement est de créer un fichier de calibration (Range Of Motion) pour chaque participant. Ce fichier permet de connaître la distance des marqueurs entre eux et ainsi de pouvoir faire correspondre un squelette sur les données lors de l'étape de reconstruction. A la fin de cette campagne expérimentale, nous avons enregistré 146 fichiers de marche expressive.

2.3 Traitement des données cinématiques

2.3.1 Reconstruction des données

Les données ont été reconstruites en utilisant le logiciel Vicon IQ®. La reconstruction de chaque capture est semi-automatique. La première étape consiste à reconstruire les fichiers de calibration qui ont été générés au début des sessions de capture de mouvement. Ceci permet de construire un squelette qui peut être appliqué sur les données des fichiers de capture. La deuxième étape consiste à reconstruire chaque capture une par une. En théorie, cette étape devrait être automatique, cependant, en fonction de la qualité des

Table 2.3 – Repères anatomiques pour le placement des marqueurs externes.

Marqueurs	Repères anatomiques
RFHD, LFHD	Os frontal côtés droit et gauche
RBHD, LBHD	Os occipital côtés droit et gauche
C7	Processus épineux de la 7 ^{ème} vertèbre cervicale
T10	Processus épineux de la 10 ^{ème} vertèbre thoracique
CLAV	Incisure jugulaire du sternum
STRN	Processus xyphoïde
RBAC	Marqueur dissymétrique sur la scapula droite
RSHO, LSHO	Acromion droit et gauche
RUPA, LUPA	Marqueurs dissymétriques sur le bras droit et gauche
RHUM, LHUM	Épicondyle médial huméral droit et gauche
RRAD, LRAD	Tête du radius droit et gauche
RWRA, LWRA	Processus styloïde radial droit et gauche
RWRB, LWRB	Processus styloïde ulnaire droit et gauche
RFWT, LFWT	Épine iliaque antéro-supérieure droite et gauche
RBWT, LBWT	Épine iliaque postéro-supérieure droite et gauche
RKNE, LKNE	Condyle latéral fémoral droit et gauche
RKNI, LKNI	Condyle médial tibial droit et gauche
RTHI, LTHI	Marqueurs dissymétriques sur la cuisse droite et gauche
RANE, LANE	Malléole externe droite et gauche
RANI, LANI	Malléole interne droite et gauche
RHEE, LHEE	Pternion droit et gauche
RTOE, LTOE	Acropodion droit et gauche
RTAR, LTAR	Pliure latérale du pied droit et gauche

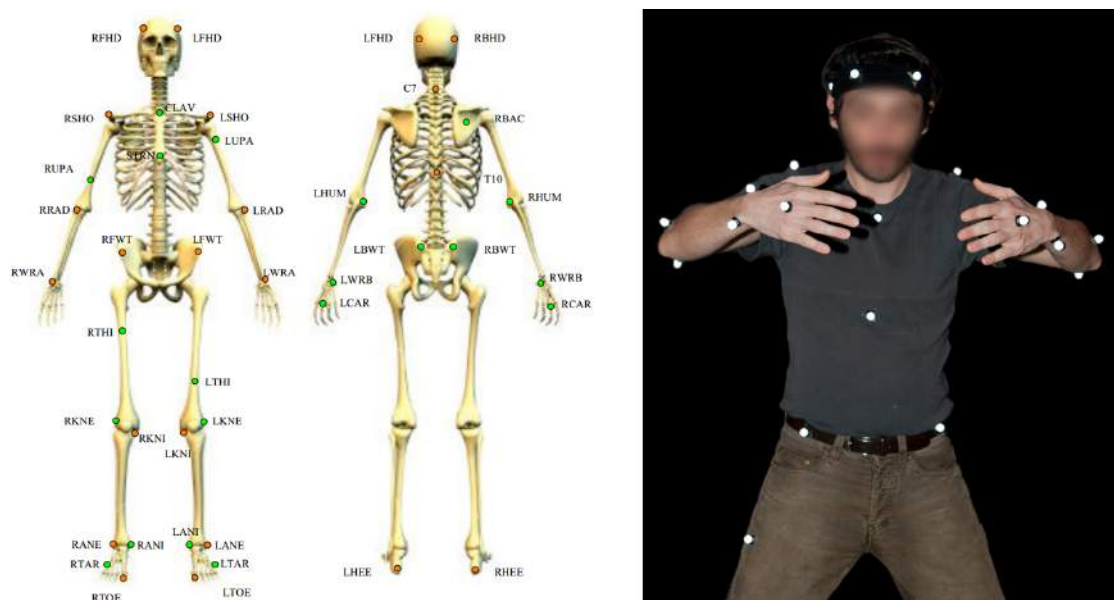


Figure 2.4 – Placement des marqueurs. A gauche : ensemble des marqueurs appliqués sur un sujet. A droite : comédien portant des marqueurs.

données acquises, une retouche manuelle est parfois nécessaire. Dans notre cas, nous avons eu à faire face à 3 types d'erreur :

1. **Sortie de zone** : bien qu'il y ait eu un marquage au sol, les acteurs sont parfois sortis de la zone de capture. Ceci a entraîné des pertes de données (Figure 2.6). Bien souvent, seule une partie du corps n'a pu être reconstruite à ces instants entraînant la perte des données à ces instants.
2. **Inversion de marqueurs** : survient lorsque le logiciel inverse deux marqueurs proches comme par exemple le côté droit et gauche du poignet. Ce problème est assez facile à régler et n'entraîne aucune perte de donnée.
3. **Perte de marqueur(s)** : survient lorsqu'un des marqueurs tombe durant la capture. Ceci n'entraîne pas obligatoirement la perte de données. En effet, dans Vicon IQ, il est possible de créer des corps rigides ("rigid body") à partir d'un groupe de marqueurs dont les positions relatives ne changent pas. Par exemple, dans notre cas, nous plaçons quatre marqueurs sur la tête (LFHD, RFHD, LBHD, RBHD) dont les positions relatives ne changeront pas au cours de la capture. Ainsi, si un de ces 4 marqueurs vient à disparaître, il est possible de recalculer la position de ce marqueur grâce à celles des 3 autres. Dans le cas où ce marqueur ne fait pas partie d'un groupe de marqueurs (cas de l'index par exemple), les données sont perdues.

2.3.2 Calcul des paramètres cinématiques

Avant de procéder à tout traitement, les données de chaque marqueur ont été précédemment filtrées par un filtre passe-bas Butterworth de 3^{ème} ordre à 2Hz (2 passes) permettant

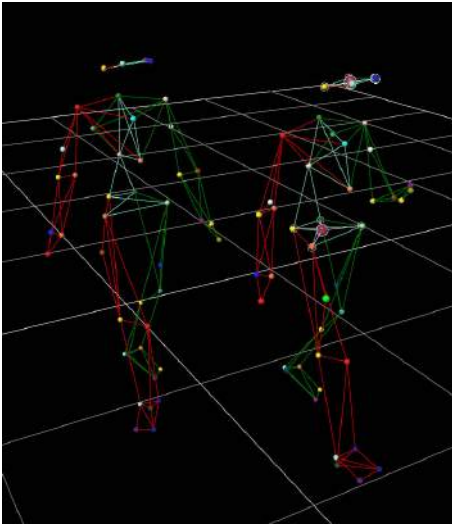


Figure 2.5 – Sujet intégralement re-construit dans le logiciel Vicon IQ.

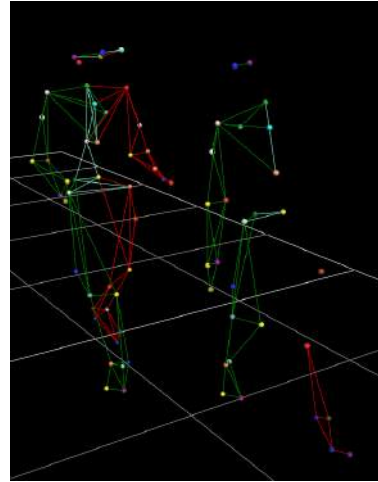


Figure 2.6 – Disparition de marqueurs lorsqu'un des sujets sort de la zone de capture.

ainsi d'éliminer l'effet d'oscillation des pas sur la trajectoire globale. La position des participants est considérée comme étant celle du milieu de leurs épaules sur le plan horizontal. La vitesse, l'accélération et le jerk ont été calculés comme étant les première, deuxième et troisième dérivées de la position des comédiens. La courbure des trajectoires a été calculée selon la formule :

$$C(t) = \frac{\det(V(t), A(t))}{V(t)^3} \quad (2.1)$$

avec $V(t)$ la vitesse instantanée et $A(t)$ l'accélération du marcheur.

Dans le cas de la marche en groupe, nous avons également calculé la distance euclidienne entre les sujets ainsi que l'angle entre eux. Il s'agit de l'angle formé par la perpendiculaire à la normale à la trajectoire du groupe projeté sur le plan horizontal et du vecteur joignant les deux sujets (également projeté sur le plan horizontal) (Figure 2.7).

Au niveau segmentaire, nous nous sommes concentrés sur plusieurs paramètres (Figure 2.8) :

- inclinaison de la tête : inclinaison de la tête d'un sujet par rapport au plan horizontal.
- inclinaison de la colonne : inclinaison de la colonne vertébrale d'un sujet par rapport à l'axe vertical.
- amplitude angulaire des coudes : amplitude de l'angle formé par le bras et l'avant bras d'un sujet.
- amplitude angulaire de l'épaule : amplitude de l'angle formé par la colonne vertébrale et le bras d'un sujet.
- longueur et fréquence des pas : la détection des pas a été réalisée en utilisant la méthode proposée par Fusco et Crétual [FC08].

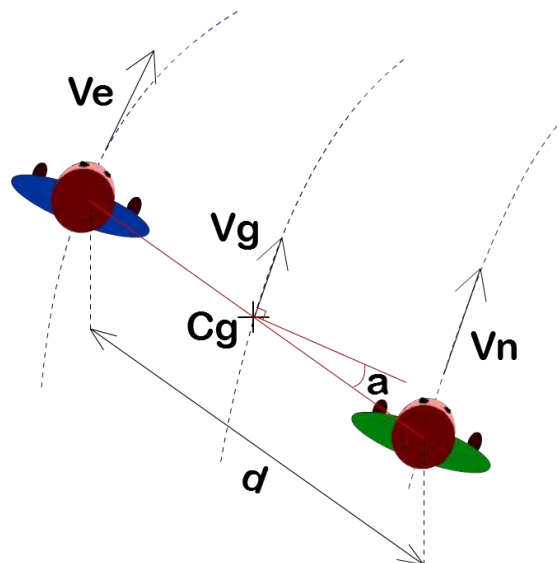


Figure 2.7 – Mesures cinématiques. C_g : position du groupe calculée comme étant le milieu du segment reliant les 2 sujets. V_e : vitesse du sujet jouant l'émotion. V_n : vitesse du sujet neutre. V_g : vitesse du groupe. d : distance entre les 2 sujets. a : angle entre les 2 sujets.

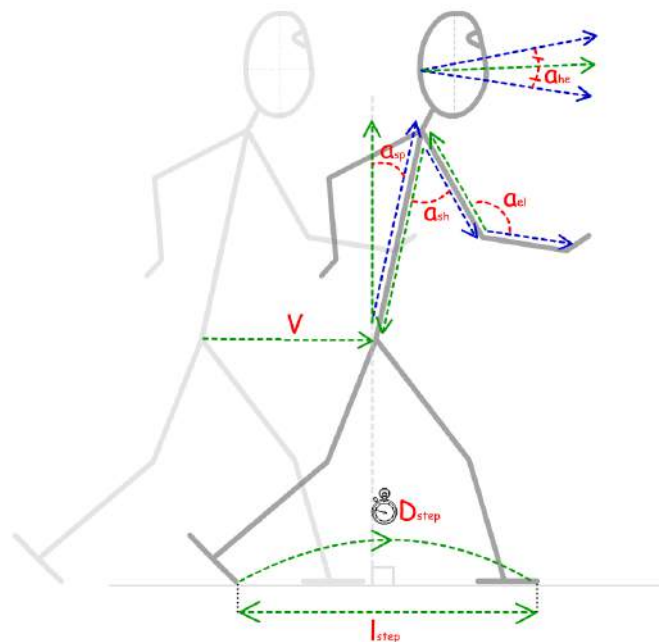


Figure 2.8 – Paramètres segmentaires

2.3.3 Analyse statistique

Nous ne cherchons pas à analyser les valeurs instantanées pour chaque paramètre cinématique observé, mais à montrer les effets des émotions sur le comportement général lors d'interactions physiques. Pour mettre en lumière ces effets, nous avons focalisé principalement notre attention sur les valeurs moyennes des paramètres cinématiques. Cependant, pour mettre en avant des phénomènes de synchronisation, nous avons également réalisé

une analyse temporelle de certaines données.

L'analyse statistique qui s'en est suivie est donc basée sur les moyennes des paramètres étudiés à travers des fenêtres successives de 1s ce qui correspond à un cycle de marche [KWJ85]. Ces calculs ont été réalisés sous Matlab. De plus, comme nous l'avons expliqué précédemment (Section 2.3.1), les acteurs étant parfois sortis de la zone de capture, nous n'avons considéré que les fenêtres dans lesquelles tous les marqueurs étaient présents. Le test de normalité de Kolmogorov-Smirnov a montré que les données ne suivaient pas une distribution normale. Nous avons donc utilisé des tests statistiques non-paramétriques. L'influence des émotions a ainsi été évaluée grâce au test de Kruskal-Wallis et les comparaisons par paires sont basées sur le test de Mann-Whitney. Tous les tests statistiques ont été effectués à l'aide du logiciel de statistique SPSS 20.0 (©IBM).

2.4 Discussion/Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthodologie générale que nous avons mis en place afin d'étudier l'influence des émotions sur les interactions entre deux marcheurs réels. Pour se faire, nous utilisons une approche expérimentale basée sur la capture de mouvement. Bien qu'il s'agisse d'une approche complexe et coûteuse en temps, cette dernière offre de nombreux atouts. Tout d'abord, grâce au jeu de 43 marqueurs, nous pouvons connaître précisément la position de chaque segment du corps d'un acteur tout au long d'une situation expérimentale. Ceci nous permet de pouvoir calculer avec une grande précision n'importe quel mouvement du corps comme par exemple l'inclinaison de la colonne, la longueur des pas, etc. Cela nous permet également d'animer des humains virtuels. Enfin, cette technique a été régulièrement utilisée dans des études similaires [KBH09].

La tâche que nous faisons réaliser aux acteurs est une tâche de locomotion. Cette tâche que l'on peut qualifier d'action quotidienne combine plusieurs avantages. D'une part, la marche est une tâche qui est couramment étudiée dans l'étude des émotions [KBH09, CG07, GCF12, ROCG09] et cela nous permettra de pouvoir comparer nos résultats avec ceux obtenus précédemment dans la littérature. D'autre part, la marche est une action simple qui ne nécessite aucun matériel supplémentaire et qui permet de réaliser de nombreuses situations d'interaction.

Dans toutes les situations de marche étudiées, nous avons demandé aux acteurs de se placer dans différents états émotionnels. Tout d'abord, l'état neutre doit être considéré comme la situation de contrôle. Ensuite, la joie, la colère et la peur ont été étudiées. Il s'agit d'émotions de base au sens d'Ekman [E⁺92]. Ces émotions sont généralement utilisées dans les études du domaine [dG09] et ceci nous donne une base de comparaison pour nos résultats.

De même, les paramètres que nous avons observé dans le cadre de la marche seul (vitesse, jerk, inclinaison du tronc, inclinaison de la tête, amplitude des membres) sont des paramètres régulièrement étudiés dans la littérature. Là encore, l'idée est de pouvoir se

comparer aux études précédentes.

Validation de la démarche expérimentale



Figure 3.1 – Validation des données de marche expressive (a) par une étude en perception (b)

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en place un protocole expérimental qui nous a permis d'obtenir des données cinématiques de marche expressive seul et en groupe. A la différence des expériences décrites dans la littérature, nous n'avons pas contraint la marche des acteurs. Ces derniers ont eu pour unique contrainte de rester dans la zone de capture. Dans ce chapitre, nous voulons valider notre démarche expérimentale afin de nous assurer que les observations qui en découlent soient cohérentes avec la littérature. Nous avons procédé de deux manières. D'une part, nous voulons nous assurer que les émotions jouées par les acteurs soient bien perçues. Pour cela, nous avons mis en place une étude en perception. D'autre part, nous voulons comparer l'analyse cinématique de la marche individuelle avec les résultats présentés dans les études passées.

Dans la section suivante, nous présentons le protocole et les résultats de notre expérience en perception. Dans la section 3.4, nous détaillons les résultats de l'analyse cinématique de la marche individuelle. Enfin nous discutons nos résultats en les comparant avec la littérature avant de conclure.

3.2 Étude en perception

Une des conditions pour engager l'analyse cinématique des données de marche passe par la validation de notre jeu de données. En effet, il faut nous assurer que les émotions jouées par les acteurs soient effectivement celles que nous leur avons demandé d'exprimer. Pour se faire, nous avons mis en place une étude en perception afin d'évaluer si des observateurs naïfs sont capables de reconnaître les émotions jouées par les acteurs. Dans le cas de la marche en ligne droite, les études précédentes ont montré que nous étions capables de percevoir les émotions de marcheurs expressifs [CG07, ROCG09]. Notre étude en perception a pour but de montrer que le fait que la marche soit non contrainte n'a aucune incidence sur la perception des émotions des acteurs par rapport à une marche en ligne droite.

3.2.1 Protocole expérimental

3.2.1.1 Population d'étude

20 sujets (5 femmes et 15 hommes) âgés de 23 à 37 ans (moyenne = 26.7 ans \pm 4.1) ont participé à cette étude en perception. Ils ont été recruté au sein du laboratoire par voie d'affichage et ont tous rempli un consentement de participation conformément à la déclaration d'Helsinki.

3.2.1.2 Stimuli

Pour créer les stimuli, nous avons sélectionné aléatoirement 2 séquences de 4 secondes de chaque état émotionnel dans les situations de marche seul et en groupe (cf Section 2.2.2). Les situations de marche expressive seul nous permettent de déterminer si les émotions jouées par les acteurs sont bien reconnues et ce malgré le fait que les acteurs aient suivi des trajectoires non contraintes. Les situations de marche expressive en groupe nous permettent de déterminer si le fait que le sujet marche avec un autre sujet, qui n'est pas forcément dans le même état émotionnel, influe sur la perception de son état émotionnel. Chaque séquence a été exportée du logiciel Vicon IQ™ vers le logiciel d'animation 3D Motion™. Celui-ci nous a permis d'appliquer un squelette ainsi qu'un personnage (plasticman) sur les données utilisées. L'humain virtuel que nous avons choisi ne possède aucun détail de visage ce qui nous assure que les participants utilisent les indices véhiculés par l'ensemble du corps et non les mouvements faciaux pour déterminer l'émotion jouée à l'écran. La caméra filmant les stimuli était orientée de telle façon, que le personnage virtuel finissait la séquence de face. Il pouvait ainsi démarré de profil au début et finir de face à la fin de la séquence ou être de face tout au long de la séquence.

Nous avons ainsi créé 3 types de stimuli :

1. Le stimulus de marche seul présente un humain virtuel de couleur rouge (Figure 3.2 a)

2. Le stimulus de marche en groupe où un humain virtuel est rouge (marcheur expressive) et l'autre blanc (marcheur neutre)(Figure 3.2 b).
3. Le stimulus de marche en groupe où les deux humains virtuels sont rouges (ils ont alors la même émotion, Figure 3.2 c)

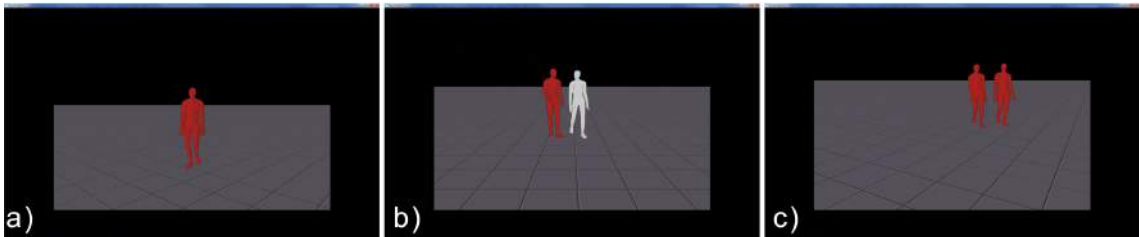


Figure 3.2 – Stimuli de l'étude en perception. Pour chacun des stimuli, le sujet doit déterminer l'émotion du/des personnage(s) en rouge uniquement. a) marche seul. b) marche en groupe (1 seul acteur expressif). c) marche en groupe (2 acteurs expressifs).

3.2.1.3 Tâche

Durant l'expérience, les sujets sont assis face à un écran de 24 pouces (Figure 3.1). Ils doivent y regarder des animations d'humains virtuels en train de marcher. L'objectif est de déterminer l'émotion du ou des humains virtuels de couleur rouge. Les émotions jouées sont la joie, la colère (non transitive et sans dialogue), la peur (non transitive) ainsi qu'un état neutre. Les stimuli sont répétés 5 fois et présentés dans un ordre aléatoire afin de contrebalancer un éventuel effet d'apprentissage. Pendant l'expérience, les stimuli sont joués en boucle jusqu'à ce que le participant sélectionne une réponse sur l'interface présente à l'écran (Figure 3.3). La question à laquelle ils doivent répondre est : "quelle est l'émotion exprimée par le personnage qui marche?". Cinq réponses leur sont proposées : *neutre*, *joie*, *colère*, *peur* et *je ne sais pas*. Excepté pour la réponse *je ne sais pas*, les participants doivent ensuite indiquer le niveau de confiance de leur réponse sur une échelle allant de 1 à 7 (1 : pas confiant du tout, 7 : très confiant). Au total, 100 stimuli ont été présentés aux sujets (Table 3.1).

3.2.1.4 Analyse

Le taux de reconnaissance moyen de chaque émotion pour chaque condition de marche a été calculé comme étant la moyenne des taux de reconnaissance de chaque sujet pour chaque émotion dans chaque condition de marche :

$$T_{e,c} = \frac{\sum_{s=1}^N T_{s,e,c}}{N} \quad (3.1)$$

avec N le nombre de sujet (20) et $T_{e,c}$ le taux de reconnaissance de l'émotion e dans la condition de marche c .

Condition	Situations émotionnelles Émotion (Non transitive et sans dialogue)	Nb séquences	Nb répétitions	Durée
Marche seul	Neutre Joie Colère Peur	2	5	5"
Marche groupe	Colère - Neutre Peur - Neutre Neutre - Neutre Joie - Joie Colère - Colère Peur - Peur	2	5	5"

Table 3.1 – Ensemble des stimuli présentés aux sujets.

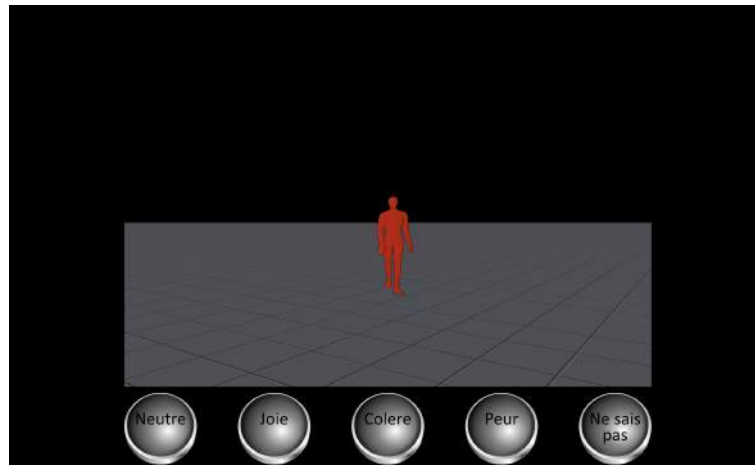


Figure 3.3 – Capture d’écran de l’interface de l’étude en perception. Au centre se joue l’animation et en bas de l’écran sont affichées les réponses possibles données au sujet pour qualifier la marche expressive observée.

Ensuite, pour pouvoir interpréter les taux de reconnaissance, nous devons déterminer le niveau de hasard du test. Celui-ci correspond à l’intervalle dans lequel la probabilité que le taux de reconnaissance soit dû au hasard est de 95%. Il se calcule selon la formule suivante :

$$Niveau\ de\ hasard = \frac{100}{N_{choix}} \pm 2\sqrt{\frac{0.25}{N_{echantillon} + 1}} * 100 \quad (3.2)$$

Dans cette étude, l’intervalle de hasard se situe entre 0% et 38%.

Enfin, afin de comparer les moyennes entre elles et étudier l’impact des émotions sur le taux de reconnaissance, une ANOVA à mesures répétées a été utilisée. Les comparaisons par paires ont été calculées grâce à des tests post-hoc de Bonferonni.

3.2.2 Résultats

3.2.2.1 Marche seul

Dans le cas d'un acteur expressif marchant seul, la moyenne globale du taux de reconnaissance des émotions (Figure 3.4 a) est de $91.9\% \pm 2.5$ (neutre : $91.0\% \pm 12.1$; joie : $91.5\% \pm 23.0$; colère : $90.0\% \pm 10.8$; peur : $95\% \pm 11.0$) ce qui est largement au-dessus du niveau de hasard. Les émotions n'ont eu aucun effet sur les taux de reconnaissance puisque l'anova ne révèle aucune différence significative entre les différents taux ($F(2, 37) = 0.451, p = 0.638$). Comme on peut le constater Table 3.2, aucune des émotions n'a été confondue en particulier avec une autre.

Les participants sont plutôt confiants quant à leurs réponses : le niveau de confiance moyen (Figure 3.4 b) est de $5.7/7$ (neutre : $5.4/7$, joie : $6.2/7$, colère : $5.6/7$ et peur : $5.6/7$). L'anova nous révèle qu'il existe un effet des émotions sur le niveau de confiance ($F(2, 48) = 7.19, p = 0.001, \eta^2 = 0.286$). Les comparaisons par paires indiquent uniquement une différence significative entre la joie et les autres émotions (joie-neutre : $p < 0.005$, joie-colère : $p < 0.01$ et joie-peur : $p < 0.05$). Les participants sont donc plus sûrs de leur réponse lorsqu'il s'agit de la joie.

Le temps de réponse moyen (Figure 3.4 c) est de $5.2s \pm 0.8$ (neutre : $6.2s \pm 1.4$, joie : $4.3s \pm 1.3$, colère : $5.8s \pm 1.6$ et peur : $4.8s \pm 2.9$) avec un effet principal important des émotions ($F(2, 37) = 6.44, p < 0.005, \eta^2 = 0.682$). Ainsi, la joie est plus rapidement reconnue que les autres émotions.

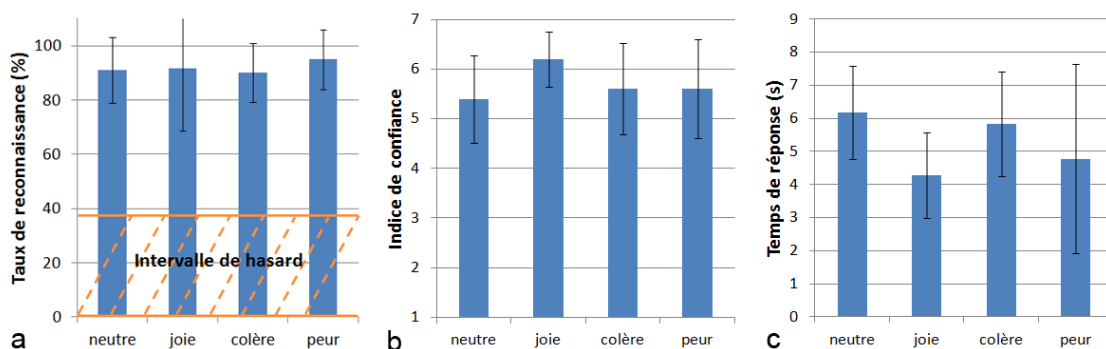


Figure 3.4 – Taux de reconnaissance moyens des émotions dans le cas de la marche seul, indices de confiance moyens et temps de réponses moyens.

3.2.2.2 Marche en groupe

Pour la marche en groupe, il faut distinguer deux cas : celui où les participants ont dû déterminer l'émotion des deux humains virtuels (qui expriment la même émotion) et celui où ils ont dû reconnaître l'émotion d'un seul des humains virtuels (l'autre étant neutre). Dans les deux cas, les résultats sont plus nuancés que pour la marche seul.

		Émotion jouée			
		Neutre	Joie	Colère	Peur
Émotion reconnue	Neutre	91.0 ± 12.1	6.0 ± 22.34	5.5 ± 7.59	1.0 ± 3.08
	Joie	1.0 ± 4.47	91.5 ± 23.0	1.0 ± 3.08	0.0 ± 0.0
	Colère	1.5 ± 6.71	1.0 ± 3.08	90.0 ± 10.76	1.50 ± 6.71
	Peur	4.5 ± 9.99	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	95.0 ± 11.0
	NSP	2.0 ± 4.1	1.5 ± 4.89	3.5 ± 9.88	2.5 ± 5.5

Table 3.2 – Matrice de confusion. Répartition des réponses données (émotion reconnue en %) en fonction des émotions jouées dans le cas de la marche seul.

3.2.2.2.a Reconnaissance de l’émotion de deux humains virtuels

Lorsqu’il fallait reconnaître l’émotion des deux acteurs, la moyenne globale du taux de reconnaissance (Figure 3.5 a) n’est plus que de 65.8% ± 15.1 (neutre : 62.0% ± 35.6 ; joie : 52.5% ± 27.1 ; colère : 61% ± 35.8 ; peur : 87.5% ± 25.5). Dans cette situation, l’émotion à reconnaître a une influence sur son niveau de reconnaissance ($F(3, 76) = 4.64, p = 0.005$). Les tests par paires nous indiquent une différence significative entre la peur et la joie ($p < 0.005$). La joie est ainsi l’émotion la moins bien reconnue et la peur, au contraire, la mieux reconnue. Comme on peut le voir Table 3.3, l’état neutre a été parfois confondu avec la peur, la joie avec l’état neutre et la colère avec l’état neutre ou "Ne sais pas".

Les participants sont plutôt confiants (Figure 3.5 b) dans leur réponse : le niveau de confiance moyen est de 5.1/7 (neutre : 4.8/7, joie : 5.1/7, colère : 5.2/7 et peur : 5.3/7). L’anova ne révèle ici aucun effet des émotions sur le niveau de confiance ($F(2, 42) = 0.05, p = 0.951$).

Enfin, le temps de réponse moyen (Figure 3.5 c) est de 7.6s ± 1.0 (neutre : 8.0s ± 3.3, joie : 8.1s ± 2.3, colère : 8.4s ± 1.8 et peur : 6.1s ± 2.6) avec un effet principal des émotions ($F(2, 39) = 6.25, p < 0.005, \eta^2 = 0.247$). Les comparaisons par paire montrent des différences entre la peur et les autres émotions. La peur est donc plus rapide à être reconnue.

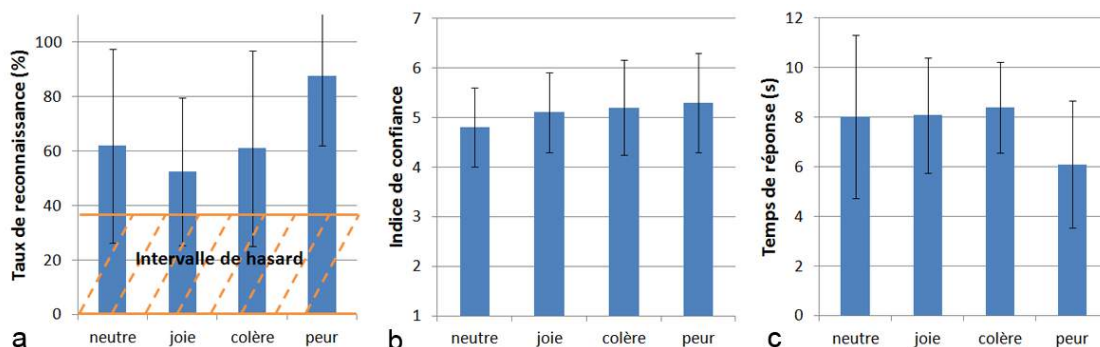


Figure 3.5 – Taux de reconnaissance moyens des émotions dans le cas de la marche en groupe (2 acteurs expressifs), indices de confiance moyens et temps de réponses moyens.

		Émotion jouée			
		Neutre	Joie	Colère	Peur
Émotion reconnue	Neutre	62.0 ± 35.63	29.0 ± 25.53	15.0 ± 20.39	8.0 ± 22.38
	Joie	3.0 ± 13.42	52.5 ± 27.12	8.5 ± 17.55	0.0 ± 0.0
	Colère	1.0 ± 3.08	8.0 ± 10.56	61.0 ± 35.82	0.0 ± 0.0
	Peur	25.5 ± 30.17	0.0 ± 0.0	1.5 ± 3.66	87.5 ± 25.52
	NSP	8.5 ± 13.87	10.5 ± 20.89	14.0 ± 18.47	4.5 ± 11.91

Table 3.3 – Répartition des réponses données (émotion reconnue en %) en fonction des émotions jouées dans le cas de la marche en groupe lorsque les 2 acteurs jouent l'émotion.

		Émotion jouée	
		Colère	Peur
Émotion reconnue	Neutre	33.5 ± 26.01	9.5 ± 20.38
	Joie	15.0 ± 17.32	0.0 ± 0.0
	Colère	39.5 ± 31.2	2.0 ± 8.94
	Peur	0.0 ± 0.0	86.0 ± 22.34
	NSP	12.0 ± 17.35	2.5 ± 7.16

Table 3.4 – Répartition des réponses données (émotion reconnue en %) en fonction des émotions jouées dans le cas de la marche en groupe lorsqu'un seul acteur joue l'émotion.

3.2.2.2.b Reconnaissance de l'émotion d'un seul humain virtuel

Pour cette situation, seuls les cas de la colère (non transitive et sans dialogue) et de la peur (non transitive) seront considérés. La moyenne globale du taux de reconnaissance est ici de $62.75\% \pm 32.9$. Cependant, le taux de reconnaissance de la colère n'est que de 39.5% . Celui de la peur est de 86% . Toutes ces valeurs restent cependant au-dessus du niveau de hasard. Dans cette situation, l'émotion influence la reconnaissance des émotions ($t = -5.16, p < 0.001$).

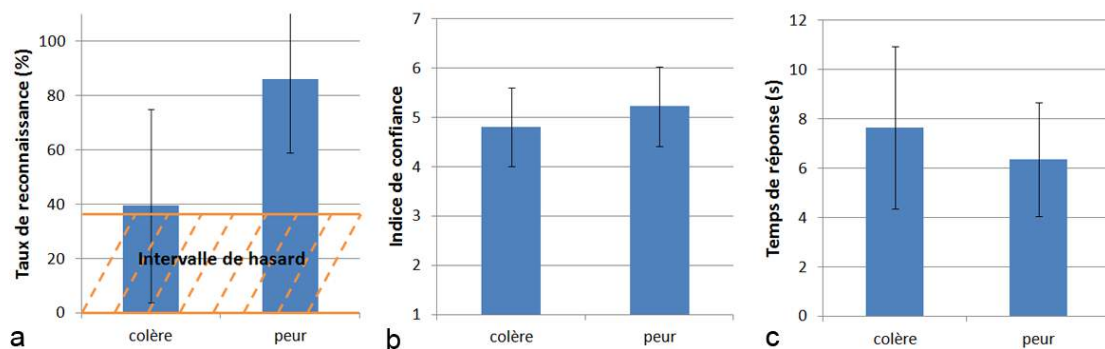


Figure 3.6 – Taux de reconnaissance moyens des émotions dans le cas de la marche en groupe (1 acteur expressif), indices de confiance moyens et temps de réponses moyens

3.3 Étude en perception : nouvelle étude du cas de la marche en groupe

Comme nous l'avons constaté dans la section précédente, contrairement au cas de la marche seul, le taux de reconnaissance des émotions chute fortement lorsque les sujets ont eu à reconnaître l'émotion de deux acteurs marchant en groupe ainsi que celle d'un acteur marchant en groupe avec un acteur neutre. Pour tenter de trouver une explication à cela, nous avons décidé de mener une deuxième étude en perception afin de pouvoir expliquer ces taux de trouver une explication à cette chute.

3.3.1 Protocole expérimental

3.3.1.1 Population d'étude

15 sujets (3 femmes et 12 hommes) âgés de 21 à 39 ans (moyenne = 27.6 ans \pm 5.6) ont participé à cette étude en perception. Ils ont été recruté au sein du laboratoire par voie d'affichage et ont tous rempli un consentement de participation conformément à la déclaration d'Helsinki.

3.3.1.2 Stimuli

Pour créer les stimuli, nous avons procédé de la même manière que dans la première étude en perception. Nous avons sélectionné aléatoirement 2 séquences de 4 secondes de chaque état émotionnel dans les situations de marche en groupe (cf Section 2.2.2). Chaque séquence a été exportée du logiciel Vicon IQ™ vers le logiciel d'animation 3D Motion™. Celui-ci nous a permis d'appliquer un squelette ainsi qu'un personnage (plasticman) sur les données utilisées. L'humain virtuel que nous avons choisi ne possède aucun détail de visage ce qui nous assure que les participants utilisent les indices véhiculés par l'ensemble du corps et non les mouvements faciaux pour déterminer l'émotion jouée à l'écran. La caméra filmant les stimuli était orientée de telle façon, que le personnage virtuel finissait la séquence de face. Il pouvait ainsi démarré de profil au début et finir de face à la fin de la séquence ou être de face tout au long de la séquence.

A partir de chaque séquence, nous avons créé plusieurs stimuli. Dans le cas d'émotions symétriques, nous ainsi créé 5 types de stimuli. Dans chacun de ces stimuli, les deux acteurs expriment la même émotion.

1. Un stimuli où les deux acteurs sont visibles (Figure 3.7 a)
2. Un stimuli où les deux acteurs sont visibles et où un l'acteur 1 est en bleu et l'acteur 2 en blanc (Figure 3.7 b).
3. Un stimuli où les deux acteurs sont visibles et où un l'acteur 1 est en blanc et l'acteur 2 en bleu (Figure 3.7 c).

4. Un stimuli où seul l'acteur 1 est visible (Figure 3.7 d).
5. Un stimuli où seul l'acteur 2 est visible (Figure 3.7 e).

Dans le cas d'émotions asymétriques, nous avons créé 4 types de stimuli :

1. Un stimuli où les deux acteurs sont visibles et où un acteur est expressif (en bleu) et l'autre neutre (en blanc) (Figure 3.7 b).
2. Un stimuli où les deux acteurs sont visibles et où un acteur est expressif (en blanc) et l'autre neutre (en bleu) (Figure 3.7 c).
3. Un stimuli où un seul des deux acteurs est visible et où il exprime une émotion (Figure 3.7 d).
4. Un stimuli où un seul des deux acteurs est visible et où il est neutre (Figure 3.7 e).

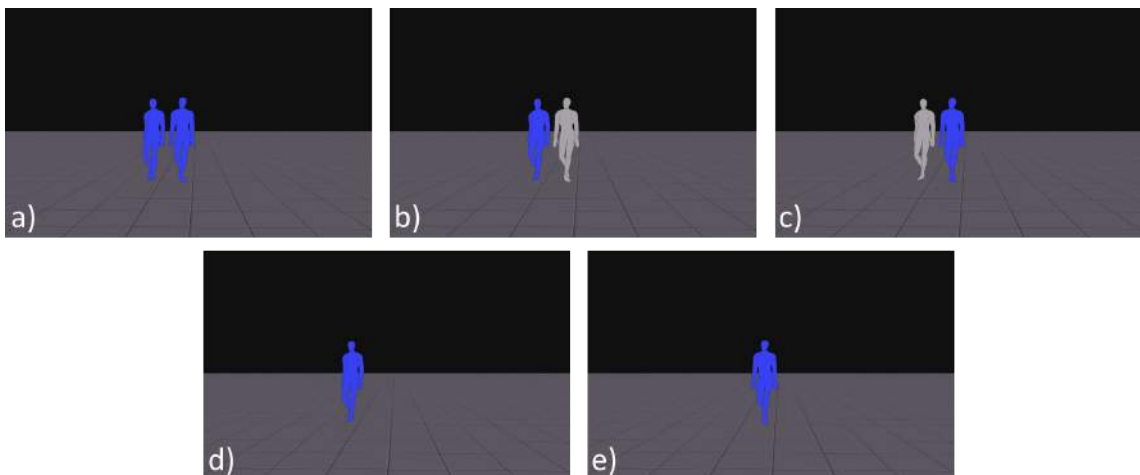


Figure 3.7 – Stimuli de la deuxième étude en perception. Pour chacun des stimuli, le sujet doit déterminer l'émotion du/des personnage(s) en bleu uniquement.

3.3.1.3 Tâche

Durant l'expérience, les sujets sont assis face à un écran de 24 pouces (Figure 3.1). Ils doivent y regarder des animations d'humains virtuels en train de marcher. L'objectif est de déterminer l'émotion du ou des humains virtuels de couleur bleue. Les émotions jouées sont la joie, la colère (qui pouvait être transitive ou non), la peur (transitive ou non) ainsi qu'un état neutre. Les stimuli sont répétés 3 fois et présentés dans un ordre aléatoire afin de contrebalancer un éventuel effet d'apprentissage. Pendant l'expérience, les stimuli sont joués en boucle jusqu'à ce que le participant sélectionne une réponse sur l'interface présente à l'écran (Figure 3.3). La question à laquelle ils doivent répondre est : "quelle est l'émotion exprimée par le personnage qui marche?". Cinq réponses leur sont proposées : *neutre, joie, colère, peur* et *je ne sais pas*. Au total, 276 stimuli ont été présentés aux sujet : 5 stimuli par situation symétrique (2 séquences : neutre, joie, colère non transitive, colère

transitive, peur non transitive, peur transitive) et 4 stimuli par situation asymétrique (2 séquences : colère non transitive, colère transitive, peur non transitive, peur transitive) répétés 3 fois. Soit $(5 * (2 * 6) + 4 * (2 * 4)) * 3 = 276$.

3.3.1.4 Analyse

Le taux de reconnaissance moyen de chaque émotion pour chaque type de stimuli a été calculé comme étant la moyenne des taux de reconnaissance de chaque sujet pour chaque émotion pour chaque type de stimuli :

$$T_{e,st} = \frac{\sum_{s=1}^N T_{s,e,st}}{N} \quad (3.3)$$

avec N le nombre de sujet (15) et $T_{e,st}$ le taux de reconnaissance de l'émotion e dans pour le type de stimuli st .

Afin de comparer les moyennes entre elles et étudier l'impact des émotions sur le taux de reconnaissance, une ANOVA à mesures répétées a été utilisée. Les comparaisons par paires ont été calculées grâce à des tests post-hoc de Bonferonni.

3.3.2 Résultats

Neutre (Figure 3.8)

Concernant l'état neutre lorsque les 2 acteurs sont visibles, le taux de reconnaissance est de $88.3\% \pm 15.1$ lorsqu'on demande l'émotion des deux acteurs, $92.9\% \pm 14.2$ lorsqu'on demande celle de l'acteur 1 uniquement et $76.7\% \pm 15.0$ lorsqu'on demande celle de l'acteur 2 uniquement. L'Anova révèle une différence significative entre ces taux ($F(2, 14) = 7.322, p < 0.005$). Les différences par paires montrent que le taux de reconnaissance de l'émotion de l'acteur 2 est inférieur aux deux autres. Lorsqu'un seul des acteurs est visible, le taux de reconnaissance de l'émotion de l'acteur 1 est de $78.4\% \pm 19.7$ et celle de l'acteur 2 $62.3\% \pm 28.3$. Le test de Student n'indique aucune différence entre ces deux taux ($p = 0.081$). On constate également que le taux de reconnaissance de l'acteur 1 est meilleur lorsque les deux acteurs sont visibles ($t = 2.306, p < 0.005$).

Joie (Figure 3.9)

Concernant la joie lorsque les 2 acteurs sont visibles, le taux de reconnaissance est de $81.4\% \pm 15.9$ lorsqu'on demande l'émotion des deux acteurs, $85.0\% \pm 10.8$ lorsqu'on demande celle de l'acteur 1 uniquement et $52.8\% \pm 28.3$ lorsqu'on demande celle de l'acteur 2 uniquement. L'Anova révèle une différence significative entre ces taux ($F(2, 14) = 18.399, p < 0.001$). Les différences par paires montrent que le taux de reconnaissance de l'émotion de l'acteur 2 est inférieur aux deux autres. Lorsqu'un seul des acteurs est visible, le taux de reconnaissance de l'émotion de l'acteur 1 est de $82.3\% \pm 15.3$ et celle de

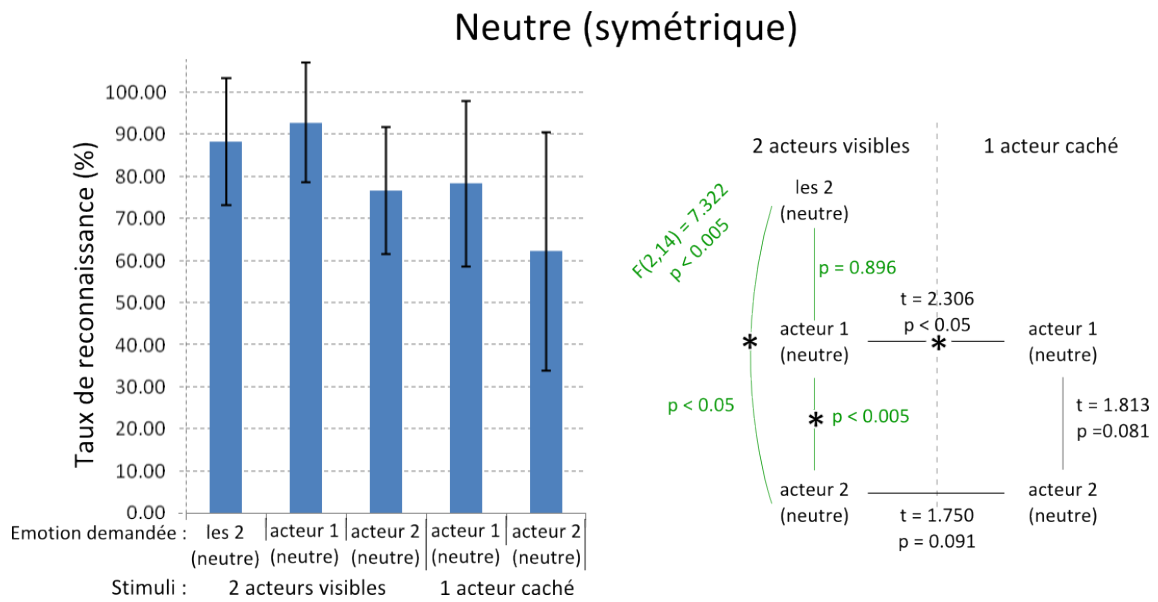


Figure 3.8 – Taux de reconnaissance moyens de l'émotion neutre et résultats des tests statistiques.

l'acteur 2 34.7% ± 27.8. Le test de Student indique une différence entre ces deux taux ($t = 5.821, p < 0.001$).

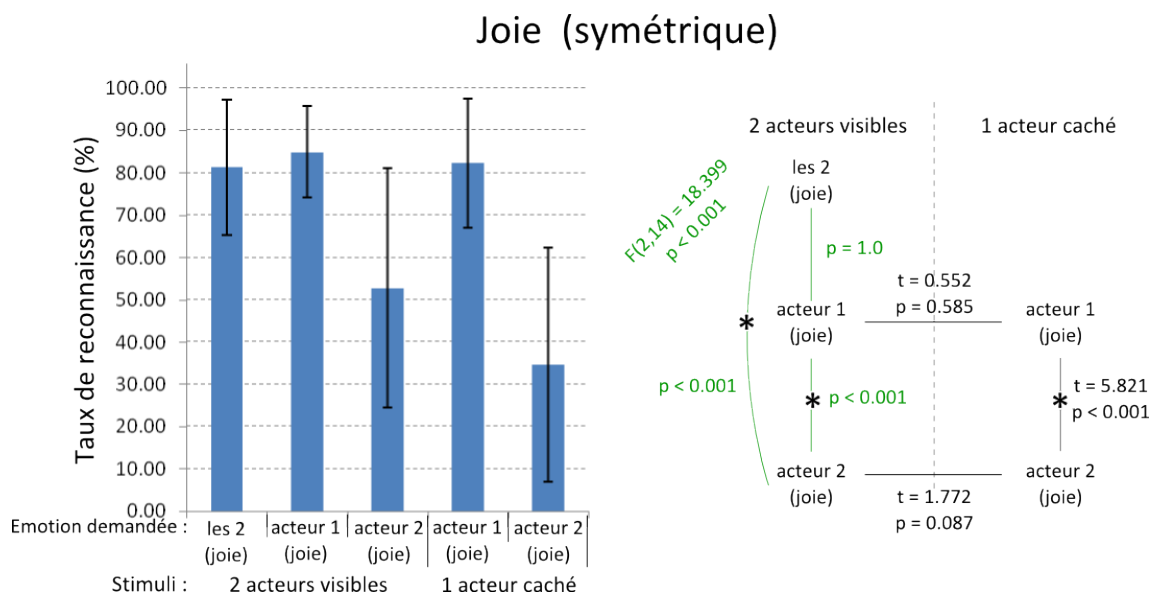


Figure 3.9 – Taux de reconnaissance moyens de l'émotion joie et résultats des tests statistiques.

Colère asymétrique non transitive (Figure 3.10 gauche)

Lorsque les deux acteurs sont visibles, l'émotion de l'acteur expressif est reconnue à un taux de 30.3% ± 27.2. L'acteur neutre est reconnu comme étant en colère à 15.3% ± 18.8 et comme étant neutre à 48.3% ± 30.7. Il existe une différence significative entre le taux de reconnaissance de l'acteur neutre comme étant en colère et celui où il est reconnu comme

étant neutre ($p < 0.001$). L'acteur neutre est donc mieux reconnu comme neutre qu'en colère.

Lorsqu'un des acteurs est caché, l'acteur expressif est reconnu comme étant en colère à $24.7\% \pm 26.7$. Ici encore, l'acteur neutre est mieux reconnu ($p < 0.001$) comme étant neutre ($54.0\% \pm 35.6$) que comme étant en colère ($9.1\% \pm 12.5$).

Colère asymétrique transitive (Figure 3.10 droite)

Lorsque les deux acteurs sont visibles, l'émotion de l'acteur expressif est reconnue à un taux de $61.7\% \pm 26.0$. L'acteur neutre est reconnu comme étant en colère à $22.3\% \pm 31.4$ et comme étant neutre à $48.1\% \pm 28.5$. Le test de Student indique une différence significative entre le taux de reconnaissance de l'acteur neutre comme étant en colère et celui où il est reconnu comme étant neutre ($p < 0.001$). L'acteur neutre est donc mieux reconnu comme neutre qu'en colère.

Lorsqu'un des acteurs est caché, l'acteur expressif est reconnu comme étant en colère à $54.9\% \pm 24.6$. Ici encore, l'acteur neutre est mieux reconnu ($p < 0.001$) comme étant neutre ($51.9\% \pm 19.5$) que comme étant en colère ($13.4\% \pm 15.7$).

Colère symétrique non transitive (Figure 3.11 gauche)

Lorsque les 2 acteurs sont visibles, le taux de reconnaissance est de $68.9\% \pm 33.8$ lorsqu'on demande l'émotion des deux acteurs, $42.6\% \pm 25.1$ lorsqu'on demande celle de l'acteur 1 uniquement et $51.0\% \pm 17.0$ lorsqu'on demande celle de l'acteur 2 uniquement. L'Anova révèle une différence significative entre ces taux ($F(2, 14) = 8.559, p < 0.001$). Les différences par paires montrent que le taux de reconnaissance des deux acteurs est supérieur à celui de chaque acteur pris indépendamment ($p < 0.001$). Lorsqu'un seul des acteurs est visible, le taux de reconnaissance de l'émotion de l'acteur 1 est de $52.9\% \pm 30.1$ et celle de l'acteur 2 $56.1\% \pm 15.6$. On ne constate aucune différence significative ($p = 0.718$).

Colère symétrique transitive (Figure 3.11 droite)

Lorsque les 2 acteurs sont visibles, le taux de reconnaissance est de $63.4\% \pm 25.5$ lorsqu'on demande l'émotion des deux acteurs, $57.3\% \pm 32.3$ lorsqu'on demande celle de l'acteur 1 uniquement et $54.6\% \pm 36.7$ lorsqu'on demande celle de l'acteur 2 uniquement. L'Anova ne révèle aucune différence significative entre ces taux ($F(2, 14) = 0.430, p = 0.655$). Lorsqu'un seul des acteurs est visible, le taux de reconnaissance de l'émotion de l'acteur 1 est de $57.1\% \pm 33.0$ et celle de l'acteur 2 $54.9\% \pm 31.0$. On ne constate aucune différence significative ($p = 0.852$).

Peur asymétrique non transitive (Figure 3.12 gauche)

Lorsque les deux acteurs sont visibles, l'émotion de l'acteur expressif est reconnue à un taux de $50.0\% \pm 42.3$. L'acteur neutre est mieux reconnu ($p < 0.001$) comme étant neutre

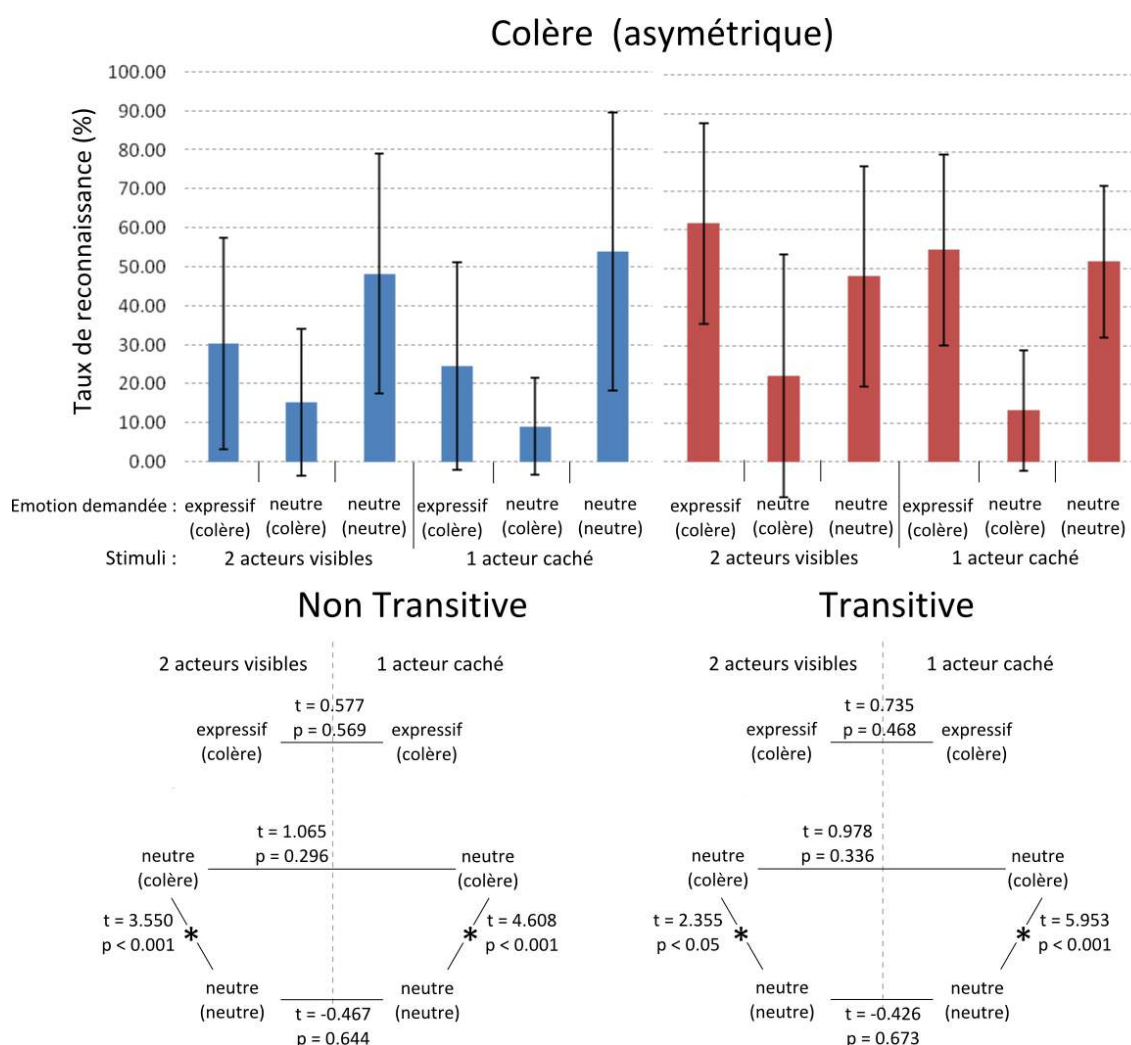


Figure 3.10 – Taux de reconnaissance moyens de l'émotion colère asymétrique et résultats des tests statistiques.

(86.6% ± 22.0) que comme étant dans un état de peur (1.13% ± 4.4). Lorsqu'un des acteurs est caché, l'acteur expressif est reconnu comme étant dans un état de peur à 45.9% ± 37.9. Ici encore, l'acteur neutre est mieux reconnu ($p < 0.001$) comme étant neutre (80.9% ± 25.2) que comme étant dans un état de peur (0.0% ± 0.0).

Peur asymétrique transitive (Figure 3.12 droite)

Lorsque les deux acteurs sont visibles, l'émotion de l'acteur expressif est reconnue à un taux de 58.1% ± 35.0. L'acteur neutre est mieux reconnu ($p < 0.001$) comme étant neutre (88.9% ± 16.2) que comme étant dans un état de peur (1.13% ± 4.4). Lorsqu'un des acteurs est caché, l'acteur expressif est reconnu comme étant dans un état de peur à 58.9% ± 36.1. Ici encore, l'acteur neutre est mieux reconnu ($p < 0.001$) comme étant neutre (91.1% ± 13.8) que comme étant dans un état de peur (0.0% ± 0.0).

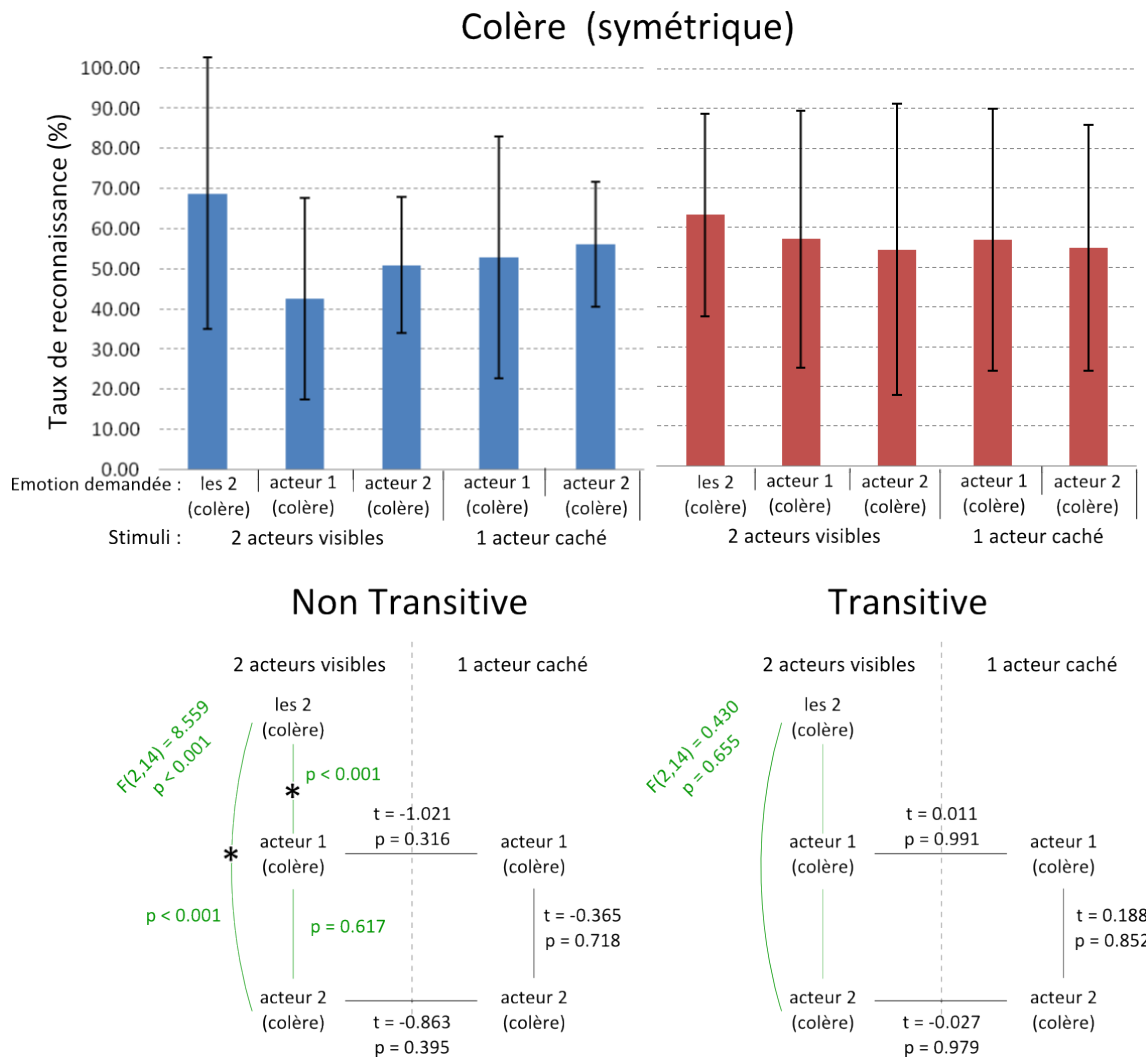


Figure 3.11 – Taux de reconnaissance moyens de l’émotion colère symétrique et résultats des tests statistiques.

Peur symétrique non transitive (Figure 3.13 gauche)

Lorsque les 2 acteurs sont visibles, le taux de reconnaissance est de $70.5\% \pm 24.6$ lorsqu’on demande l’émotion des deux acteurs, $67.7\% \pm 24.4$ lorsqu’on demande celle de l’acteur 1 uniquement et $61.2\% \pm 31.3$ lorsqu’on demande celle de l’acteur 2 uniquement. L’Anova ne révèle aucune différence significative entre ces taux ($F(2,14) = 0.731, p = 0.491$). Lorsqu’un seul des acteurs est visible, le taux de reconnaissance de l’émotion de l’acteur 1 est de $82.3\% \pm 18.2$ et celle de l’acteur 2 $71.1\% \pm 29.6$. On ne constate aucune différence significative ($p = 0.222$).

Peur symétrique transitive (Figure 3.13 droite)

Lorsque les 2 acteurs sont visibles, le taux de reconnaissance est de $96.6\% \pm 7.0$ lorsqu’on demande l’émotion des deux acteurs, $92.1\% \pm 10.7$ lorsqu’on demande celle de l’acteur 1 uniquement et $72.9\% \pm 29.5$ lorsqu’on demande celle de l’acteur 2 uniquement. L’Anova

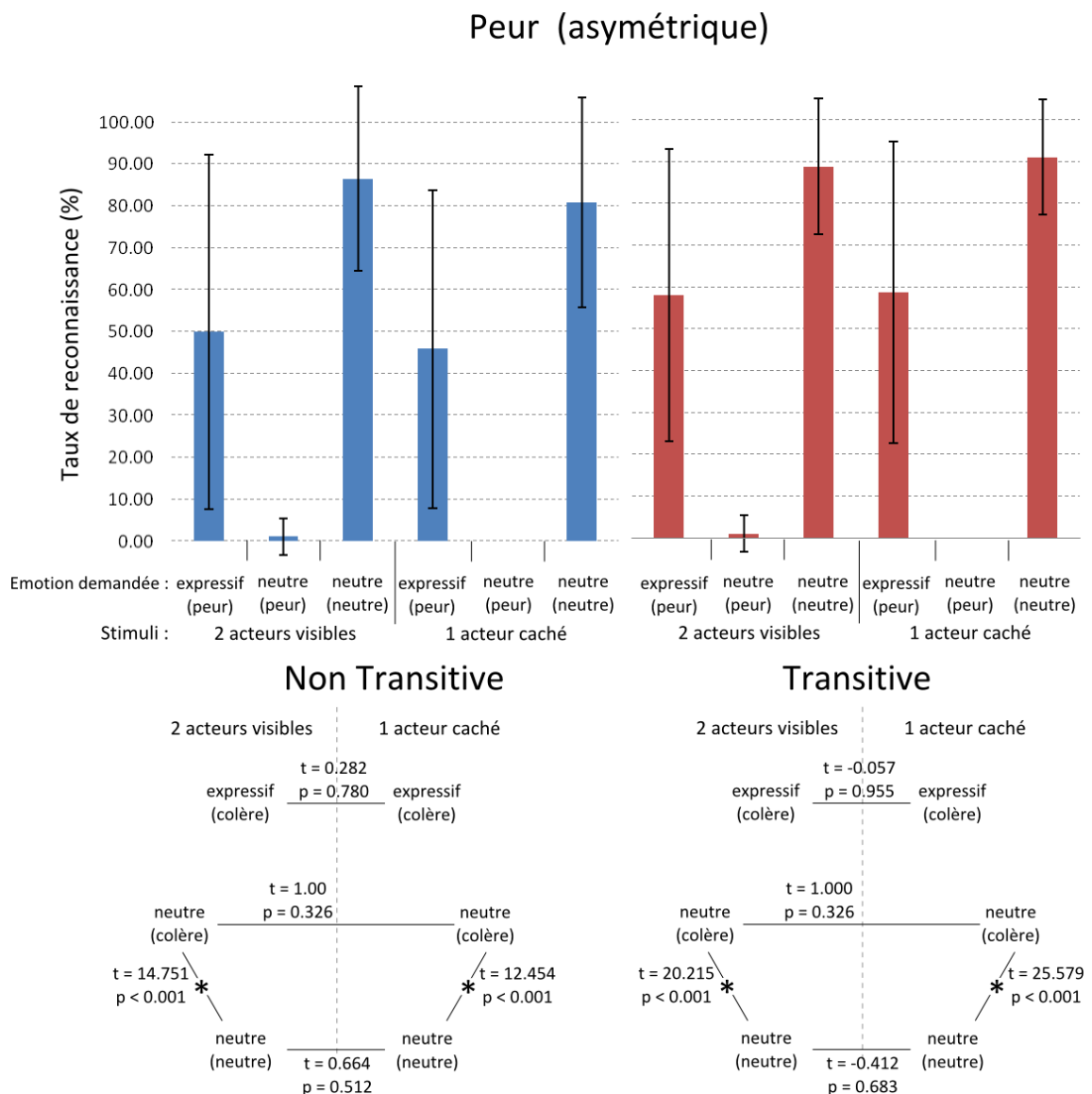


Figure 3.12 – Taux de reconnaissance moyens de l’émotion peur asymétrique et résultats des tests statistiques.

révèle une différence significative entre ces taux ($F(2, 14) = 6.956, p < 0.005$). Les différences par paires montrent que l’émotion de l’acteur 2 est moins bien reconnue que celle de l’acteur 1 et que celle des 2 acteurs ensemble. Lorsqu’un seul des acteurs est visible, le taux de reconnaissance de l’émotion de l’acteur 1 est de $98.9\% \pm 4.4$ et celle de l’acteur 2 $62.5\% \pm 30.0$. Le test de Student indique que l’émotion de l’acteur 1 est mieux reconnue que celle de l’acteur 2 ($p < 0.001$).

3.4 Analyse cinématique

Notre analyse cinématique se focalise sur deux types de paramètres (Figure 3.14) : les paramètres cinématiques de la marche (vitesse, jerk et courbure) et les trajectoires articulaires (inclinaison de la colonne et de la tête, amplitude des membres supérieurs et les

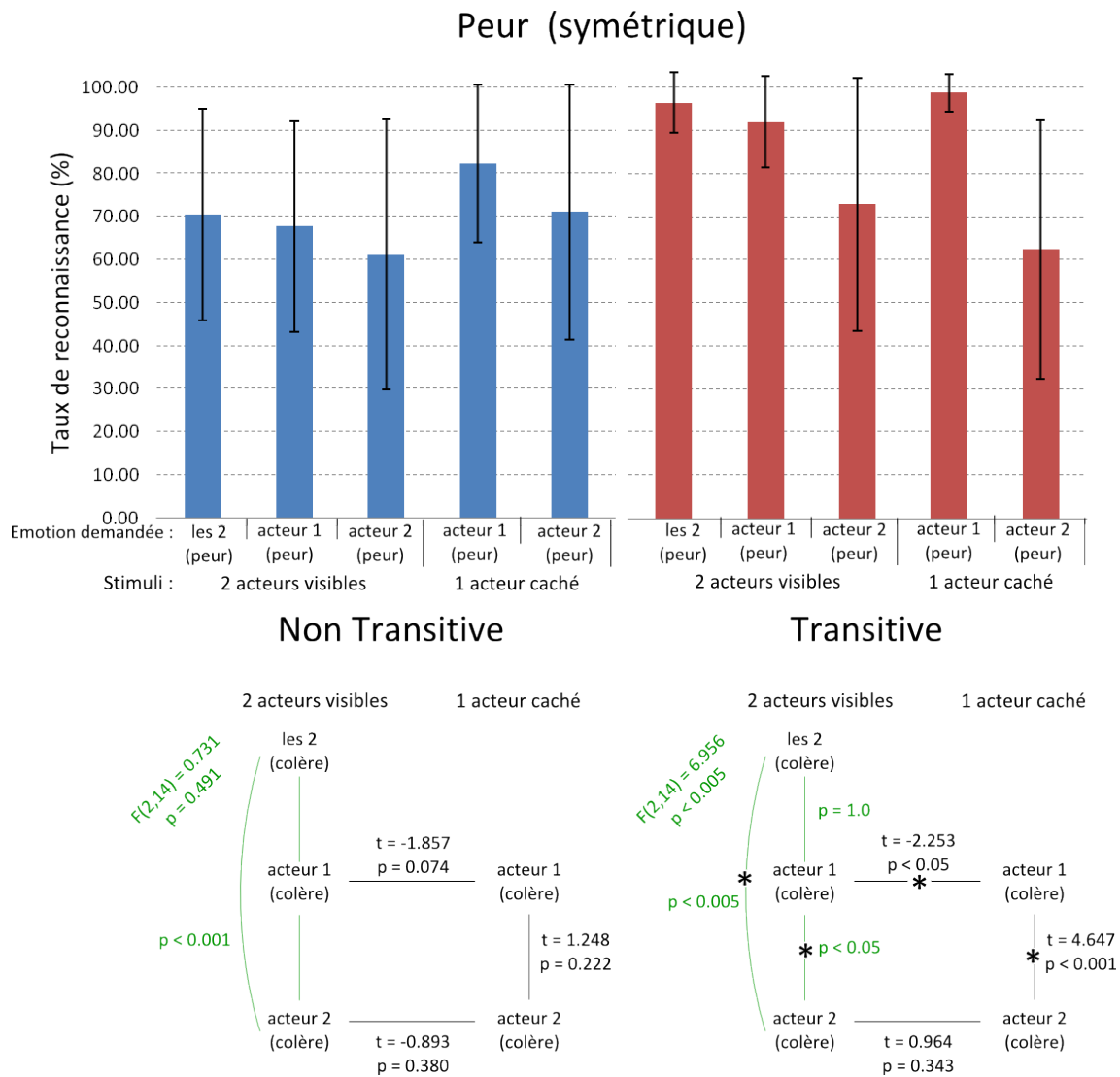


Figure 3.13 – Taux de reconnaissance moyens de l’émotion peur symétrique et résultats des tests statistiques.

pas). Tous ces paramètres sont des paramètres couramment étudiés dans la littérature et vont nous permettre de comparer nos résultats.

Tout d’abord, les paramètres cinématiques de la marche que nous allons étudier se base sur l’étude des trajectoires des marches capturées (Figure 3.15). On remarquera au premier abord, une plus grande longueur de trajectoire dans le cas de la joie (Figure 3.15 b) et de la colère (Figure 3.15 c). Ces mêmes trajectoires semblent également plus lisses. On notera enfin que dans le cas de la colère, le marcheur a utilisé une plus grande partie de la zone de capture.

La vitesse moyenne des acteurs, le jerk ainsi que la courbure sont visibles Figure 3.16. Les tests statistiques révèlent une différence significative entre les différentes vitesses de marche ($H(3, 493) = 235.38, p < 0.001$) et le jerk ($H(3, 493) = 253.35, p < 0.001$). Ainsi, dans des états de joie ou de colère, la marche est plus rapide ($V_{joie} = 1.43m.s^{-1} \pm 0.21$, $V_{colère} = 1.33m.s^{-1} \pm 0.21$) et plus saccadée ($J_{joie} = 6.71m.s^{-3} \pm 1.70$, $J_{colère} = 5.74m.s^{-3} \pm$

		Neutre	Joie	Colère	Peur	Kruskal-Wallis
Vitesse ($m.s^{-1}$)		1.10 (± 0.13)	1.43 (± 0.21)	1.33 (± 0.21)	0.95 (± 0.13)	H(3, 493) = 235.377 , $p < 0.001$
Jerk ($m.s^{-3}$)		4.32 (± 0.73)	6.71 (± 1.70)	5.74 (± 1.19)	3.91 (± 1.10)	H(3, 493) = 253.346 , $p < 0.001$
Courbure (m^{-1})		0.53 (± 0.53)	0.48 (± 0.43)	0.62 (± 0.80)	0.05 (± 0.53)	H(3, 540) = 0.280 , $p = 0.964$
Cycle de marche	Longueur (m)	0.68 (± 0.33)	0.75 (± 0.25)	0.71 (± 0.24)	0.64 (± 0.3)	H(3, 844) = 80.69 , $p < 0.001$
	Durée (s)	0.63 (± 0.26)	0.53 (± 0.16)	0.54 (± 0.16)	0.69 (± 0.32)	H(3, 844) = 218.99 , $p < 0.001$
Inclinaison de la tête ($^{\circ}$)		16.92 (± 8.45)	13.19 (± 15.89)	8.39 (± 11.68)	12.72 (± 7.74)	H(3, 493) = 35.673 , $p < 0.001$
Inclinaison de la colonne ($^{\circ}$)		9.57 (± 5.47)	13.28 (± 4.01)	13.46 (± 4.75)	14.20 (± 2.09)	H(3, 252) = 50.859 , $p < 0.001$
Amplitude de mouvement des épaules ($^{\circ}$)		4.15 (± 8.20)	13.19 (± 15.49)	9.56 (± 13.56)	1.28 (± 4.13)	H(3, 9886) = 2174.37 , $p < 0.001$
Amplitude de mouvement des coudes ($^{\circ}$)		5.70 (± 10.67)	16.69 (± 20.41)	13.69 (± 17.11)	2.81 (± 4.89)	H(3, 6838) = 916.1 , $p < 0.001$

Figure 3.14 – Paramètres cinématiques étudiés et analyse statistique de l'influence des émotions.

1.19) que dans un état neutre ($V_{neutre} = 1.10m.s^{-1} \pm 0.13$, $J_{neutre} = 4.32m.s^{-3} \pm 0.73$). Au contraire, la marche est plus lente dans un état de peur ($V_{peur} = 0.95m.s^{-1} \pm 0.13$) et

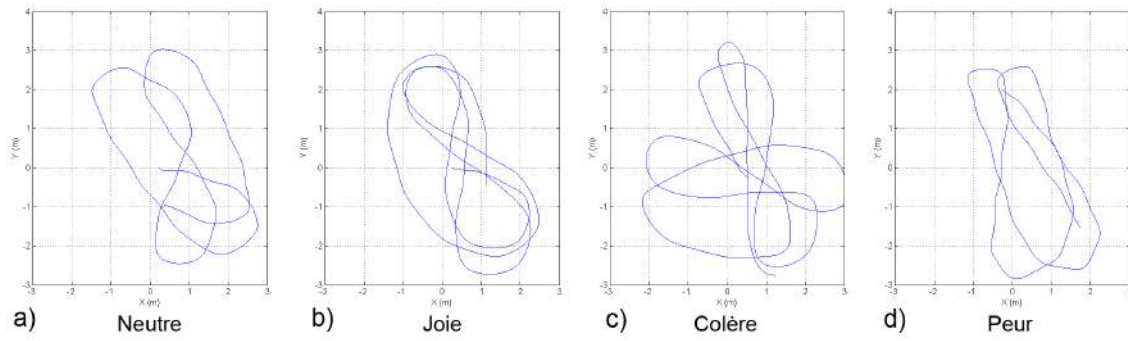


Figure 3.15 – Exemples de trajectoires de marche en fonction de l'état émotionnel du marcheur.

on n'observe aucune différence au niveau du jerk ($J_{peur} = 3.91m.s^{-3} \pm 1.10$). La courbure des trajectoires n'est pas affectée par les émotions des participants ($H(3, 540) = 0.28, p = 0.964$).

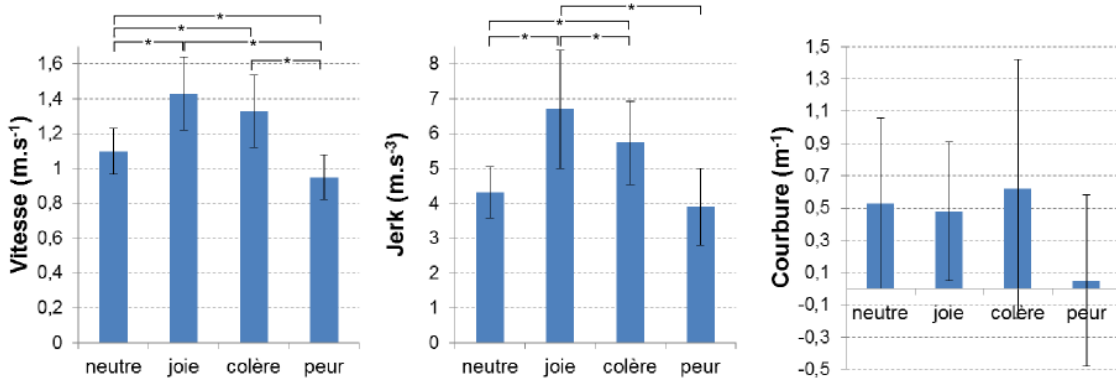


Figure 3.16 – Vitesse, jerk et courbures moyennes d'un marcheur seul en fonction de ses émotions.

Concernant les trajectoires articulaires (dont les moyennes sont illustrées Figure 3.17 pour l'inclinaison de la colonne et de la tête et Figure 3.18 pour l'amplitude de mouvement des membres supérieurs), nous observons des effets significatifs des émotions. Ainsi, l'inclinaison de la colonne vertébrale est influencée par l'émotion du marcheur ($H(3, 252) = 50.859, p < 0.001$). Cependant, les comparaisons par paires indiquent que seul l'état neutre est différent des autres émotions ($p < 0.001$). La colonne est ainsi moins inclinée dans l'état neutre ($Ic_{neutre} = 9.57^\circ \pm 5.47$) que dans les autres états ($Ic_{joie} = 13.28^\circ \pm 4.01, Ic_{colère} = 13.46^\circ \pm 4.75, Ic_{peur} = 14.20^\circ \pm 2.09$). L'inclinaison de la tête est également influencée par les émotions du marcheur ($H(3, 493) = 35.67, p < 0.001$). Celle-ci est plus inclinée vers le sol lorsque le sujet est en colère ($It_{colère} = 8.39^\circ \pm 11.68$) par rapport aux autres émotions ($It_{neutre} = 16.92^\circ \pm 8.45, It_{joie} = 13.19^\circ \pm 15.89, It_{peur} = 12.72^\circ \pm 7.74$).

Enfin, on note également une plus grande amplitude de mouvement des membres supérieurs (bras : $H(3, 9886) = 2174.37, p < 0.001$, avant-bras : $H(3, 6838) = 916.1, p < 0.001$) dans les états de joie et de colère ($Abras_{joie} = 13.19^\circ \pm 15.49, Abras_{colère} = 9.56^\circ \pm 13.56, Aavbras_{joie} = 16.69^\circ \pm 20.41, Aavbras_{colère} = 13.69^\circ \pm 17.11$) comparativement à l'état

neutre ($Abras_{neutre} = 4.15^\circ \pm 8.20$, $Aavbras_{neutre} = 5.70^\circ \pm 10.67$). Dans un état de peur, l'amplitude est plus petite ($Abras_{peur} = 1.28^\circ \pm 4.13$, $Aavbras_{peur} = 2.81^\circ \pm 4.89$). On observe également un impact des émotions sur les caractéristiques des pas. Ceux-ci sont plus longs ($H(3, 844) = 80.69, p < 0.001$) et plus rapides ($H(3, 844) = 218.99, p < 0.001$) lorsque les participants sont dans un état de joie ($longueur = 0.75m \pm 0.25$, $durée = 0.53s \pm 0.16$) ou de colère ($longueur = 0.71m \pm 0.24$, $durée = 0.54s \pm 0.16$) par rapport aux états neutre ($longueur = 0.68m \pm 0.33$, $durée = 0.63s \pm 0.26$) et de peur ($longueur = 0.64m \pm 0.3$, $durée = 0.69s \pm 0.32$).

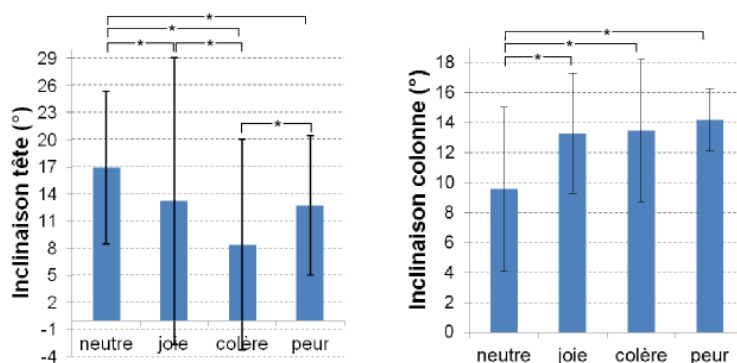


Figure 3.17 – Inclinaison moyenne de la tête et de la colonne d'un marcheur seul en fonction de ses émotions.

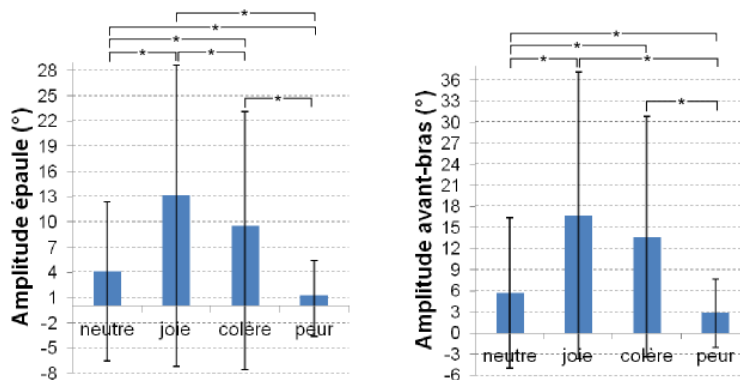


Figure 3.18 – Amplitude de mouvement moyenne des épaules et des avant-bras d'un marcheur seul en fonction de ses émotions.

3.5 Discussion

L'étude présentée dans ce chapitre avait pour but de valider notre cadre de travail. En effet, dans cette thèse, contrairement aux études de la littérature, nous voulons étudier la marche expressive sans contraindre la trajectoire des acteurs. Il nous semble fondamental de laisser au marcheur le plus grand nombre de degrés de libertés dans leur mouvement afin de favoriser l'émergence de phénomènes liés à l'interaction entre marcheurs expressifs. Pour s'assurer que les données qui en découlent soient cohérentes, nous avons procédé de deux manières. Tout d'abord, notre premier objectif a été de montrer que les émotions

jouées par les acteurs ont bien été reconnues par les sujets grâce à une étude en perception. Ensuite, notre second objectif a été de montrer que les émotions influencent les paramètres cinématiques de la marche de la même manière qu'en ligne droite comme il l'a été précédemment démontré dans la littérature.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une analyse en perception afin de valider notre jeu de données. Trois situations ont été présentées aux sujets : marche seul, marche en groupe avec un seul individu jouant l'émotion, marche en groupe où les 2 individus jouent l'émotion. Dans le cas de la marche seul, le taux de reconnaissance global moyen est de 91.9% et le temps de réponse moyen de 5.2s (le temps d'un stimulus était de 4s). Comme on le constate dans la Table 3.2, les émotions n'ont globalement pas été confondues avec d'autres. Dans le cas de la marche en groupe, hormis pour le cas de la peur, la situation n'est pas aussi claire. En effet, si on prend le cas où il fallait reconnaître l'émotion des deux humains virtuels, le taux de reconnaissance n'est plus que de 65.8%. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons discuter des taux de reconnaissance de ces émotions au cas par cas.

Neutre

Dans la première étude en perception, le taux de reconnaissance de l'état neutre est de $62.0\% \pm 35.63$. On constate alors dans la Table 3.3, que cet état a été parfois confondu avec la peur (25.5% des réponses). Cependant, dans la deuxième étude en perception, nous avons obtenu de meilleurs taux de reconnaissance de l'état neutre (environ 86.0% lorsque les deux acteurs sont visibles). On remarque également que l'émotion de l'acteur 2 a été bien moins reconnue (76.0% et 62.3%). Une des explications qui pourrait expliquer la chute du taux de reconnaissance dans la première expérience serait que les sujets se soient concentrés sur le jeu de l'acteur 2 et que celui-ci ne soit pas le plus représentatif de l'état neutre (comparé à celui de l'acteur 1).

Joie

Dans la première étude en perception, le taux de reconnaissance de la joie est de $52.5\% \pm 27.12$. La Table 3.3 nous indique que celle-ci a été confondu avec l'état neutre (29.0% des réponses). Une des explications de cette chute pourrait là encore venir du jeu de l'acteur 2. En effet, lors de la deuxième expérience en perception, le taux de reconnaissance des 2 acteurs en même temps est de 81.4%, celui de l'acteur 1 de 85.0% et celui de l'acteur 2 de 52.8%. On constate également cette différence lorsqu'un seul des acteurs est visible (respectivement 82.3% et 34.7%). On peut donc se demander si le fait qu'un des acteurs soit si mal reconnu, n'a pas pu avoir une influence lors de la première expérience.

Colère

Dans la première étude en perception, nous n'avons étudié que le cas de la colère non transitive (et sans dialogue). Nous avons alors obtenu un taux de reconnaissance de $61\% \pm$

35.8 dans le cas où les deux acteurs jouent l'émotion (situation symétrique) et un taux de $39.5\% \pm 31.2$ lorsqu'un seul des acteurs joue l'émotion (situation asymétrique). Les Table 3.3 et 3.4 nous indiquent que la colère a été confondue avec l'état neutre (respectivement 15% et 33.5%). Dans la deuxième étude en perception, Nous avons obtenu un taux de reconnaissance de l'émotion des deux acteurs de $68.9\% \pm 33.8$ dans le cas d'une situation symétrique et de $30.3\% \pm 27.2$ dans la situation asymétrique. Dans le cas symétrique, on ne constate aucune différence significative entre les taux de reconnaissance (environ 50%) de chaque acteur pris individuellement indiquant qu'aucun des deux acteurs n'était plus expressif que l'autre. Ainsi, dans le cas d'une colère symétrique, l'émotion est mieux reconnue lorsque les sujets savaient que les acteurs avaient la même émotion que lorsqu'il ne le savait pas. Le fait que le taux de reconnaissance soit plus faible pourrait ainsi être dû à la complexité du stimulus. Dans le cas asymétrique, on constate que les taux de reconnaissance de l'émotion sont extrêmement faibles. De même, l'acteur neutre n'est reconnu comme neutre que dans environ 50% des cas. Ces taux nous montrent donc que, même si l'on cache un des deux acteurs, le taux de reconnaissance de l'acteur encore visible (qu'il soit neutre ou en colère) reste faible. On peut donc suspecter une influence du jeu des acteurs entre eux empêchant d'établir l'état émotionnel de chacun. Ceci pourrait être dû soit au fait que l'interaction entre les deux acteurs a été influencée par leur état émotionnel, soit au fait que les deux acteurs n'ait pas réussi à rester dans un état émotionnel indépendamment de celui de l'autre rendant ainsi le stimulus trop complexe.

Malgré ces différences de taux de reconnaissance, les sujets ont continué à être confiants dans leurs réponses (indice de confiance d'environ 5/7 dans toutes les situations). Hormis dans le cas de la peur, cette chute du taux de reconnaissance pourrait s'expliquer par la complexité des stimuli. Il semble en effet qu'il soit plus compliqué de reconnaître l'émotion d'un groupe d'individus que d'un individu seul. Une des raisons pourrait être que les acteurs n'ont pas joué les émotions exactement de la même façon (même lorsqu'ils sont en groupe). Dans le cas de la colère, dans la situation de marche en groupe avec un seul marcheur expressif, il pourrait également y avoir une influence du jeu de l'autre marcheur. En effet, les deux acteurs ayant eu à marcher en groupe, il est possible que l'émotion de l'un ait eu une influence sur la cinématique de l'autre et réciproquement. La cinématique de la marche ne serait alors plus la même et donc plus difficilement reconnaissable. Ceci nous laisse présager que les émotions influencent les paramètres de l'interaction de deux marcheurs.

Dans un deuxième temps, nous avons mesuré l'influence des émotions sur la cinématique du mouvement dans le cas de la marche seul. Nos résultats sont cohérents avec le reste de la littérature [CG07, GCF12, KBH09, ROCG09]. Nous avons montré une influence des émotions à la fois sur la posture et sur la cinématique de la marche. Ainsi, la marche est plus rapide et plus saccadée dans les situations de joie et de colère et plus lente et moins saccadée dans une situation de peur. Au niveau de la posture des marcheurs, on note que l'inclinaison de la colonne et de la tête dépend de l'émotion exprimée par les mar-

cheurs. Cependant, l'effet n'est pas similaire à celui observé par Kadone et al. [KBH09]. Ceci pourrait être expliqué par la nature des trajectoires de marche de nos comédiens. En effet, selon Courtine & Schieppati [CS03], dans le cas de la marche neutre, l'inclinaison du tronc dépend de la géométrie de la trajectoire suivie. Ainsi lorsque l'on marche en courbe, le tronc est incliné vers l'arrière. Les émotions ont également une influence sur l'amplitude des mouvements du bras et de l'avant-bras ainsi que sur la longueur des pas : plus grande dans le cas de la joie et de la colère, plus petite pour la peur comparée à un état neutre.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que le fait de ne pas contraindre les trajectoires des marcheurs n'influence pas la perception des émotions. Grâce à une étude en perception, nous avons observé que dans le cas de la marche seul, les émotions sont bien reconnues, ce qui est en accord avec la littérature. Ceci renforce l'intérêt des trajectoires non contraintes puisqu'en plus de permettre une plus grande liberté de mouvement aux marcheurs, elles garantissent également un bon taux de reconnaissance. En revanche, le fait que le taux chute pour les essais où il y a interaction entre deux marcheurs nous montre que les émotions influencent d'une certaine manière l'interaction entre les marcheurs. Dans le chapitre suivant, nous analyserons cette influence en détail. Nous avons également montré grâce à une analyse cinématique, que le fait d'utiliser des trajectoires non contraintes n'affecte pas la cinématique de la marche seul. Hormis pour l'inclinaison de la colonne, tous les paramètres cinématiques sont conformes à ce qui a déjà été observé dans la littérature. Ces observations valident donc notre cadre de travail. Ce dernier nous garantit une bonne perception des émotions ainsi qu'un contexte d'étude plus écologique pour pouvoir étudier les interactions entre deux marcheurs expressifs.

Interactions entre deux marcheurs

4



Figure 4.1 – Influence des émotions sur l’interaction entre deux marcheurs : photo prise pendant la capture de mouvement des deux marcheurs.

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que dans le cadre de la marche seul non contrainte, les émotions influencent la cinématique de la marche de la même manière que dans le cas de la marche seul en ligne droite. Le fait de ne pas contraindre les trajectoires des marcheurs nous offre un environnement d’étude plus écologique qu’une marche contrainte, ce qui est fondamental pour l’étude des interactions si on veut voir émerger certains phénomènes. Dans ce chapitre, nous sommes partis de ce constat pour faire interagir deux marcheurs entre eux. En effet, nous faisons l’hypothèse que libérés de contraintes de trajectoire (hormis celles imposées par les limites de la zone expérimentale), les marcheurs pourront avoir des interactions plus réalistes. Ici, nous proposons une expérience permettant d’étudier l’influence des émotions sur la cinématique du mouvement de deux

marcheurs, ainsi que sur la cinématique des paramètres caractéristiques de leur interaction. Nous avons donc demandé à deux acteurs de marcher ensemble selon différents états émotionnels. Le protocole utilisé est similaire à celui du chapitre précédent et est décrit dans le chapitre 2. Dans ce chapitre, nous présentons l'analyse cinématique qui résulte de cette expérience. Ce travail a été effectué en collaboration avec Jindrich Kodl de l'Institut Weizmann en Israël.

4.2 Analyse

Dans cette expérience, en plus des paramètres cinématiques de la marche (vitesse et jerk) que nous avons calculé pour chaque marcheur, nous avons calculé les paramètres cinématiques du groupe (Figure 4.2) : vitesse (V_g), distance interpersonnelle (d) et l'angle entre les acteurs (a).

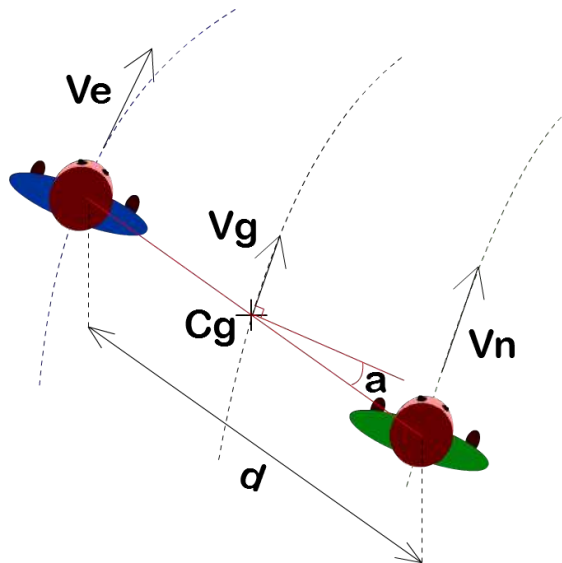


Figure 4.2 – Mesures cinématiques. C_g : position du groupe calculée comme étant le milieu du segment reliant les 2 sujets. V_e : vitesse du sujet jouant l'émotion. V_n : vitesse du sujet neutre. V_g : vitesse du groupe. d : distance entre les 2 sujets. a : angle entre les 2 sujets.

Nous proposons également d'étudier les phénomènes de synchronisation entre les deux marcheurs. Pour cela, nous analysons les décalages de phase des profils de vitesse en se basant sur l'hypothèse que les profils de vitesse des marcheurs en interaction sont similaires (hypothèse elle-même basée sur l'observation de données d'interactions réelles). Contrairement aux autres paramètres cinématiques tels que la vitesse ou le jerk que nous avons étudié de manière discrète, l'analyse de ces phénomènes d'interaction émergents nécessite une analyse continue. Nous pouvons alors identifier des portions dans les profils de vitesse qui sont similaires ou fortement semblables entre les deux acteurs et qui peuvent être décalés ou non dans le temps. Dès lors, en calculant un tel décalage tout au long d'une capture, on peut suivre l'évolution du décalage de phase de manière locale. Le décalage de phase global est alors calculé comme étant la moyenne de tous les décalages locaux.

La figure 4.3 illustre les différentes étapes permettant de calculer le décalage de phase :

1. Sélectionner une section du profil de vitesse du premier marcheur à un temps t_i (ts_1) et d'une durée de 1 pas (te_1).
2. Sélectionner une section du profil de vitesse du deuxième marcheur démarrant un demi pas plus tôt que le temps t_1 ($ts_2 = ts_1 - 1/2(te_1 - ts_1)$) et d'une durée de 2 pas ($te_2 = te_1 + 1/2(te_1 - ts_1)$).
3. Calculer le coefficient de corrélation croisée [Lew95] entre les deux sections.
4. Calculer le décalage de phase local (tsh_i) à l'instant t_i en prenant le temps où le coefficient de corrélation est maximum (t_{max}) et en le soustrayant du temps t_i .
5. Recommencer à partir de l'étape 1 pour chaque instant de la capture.

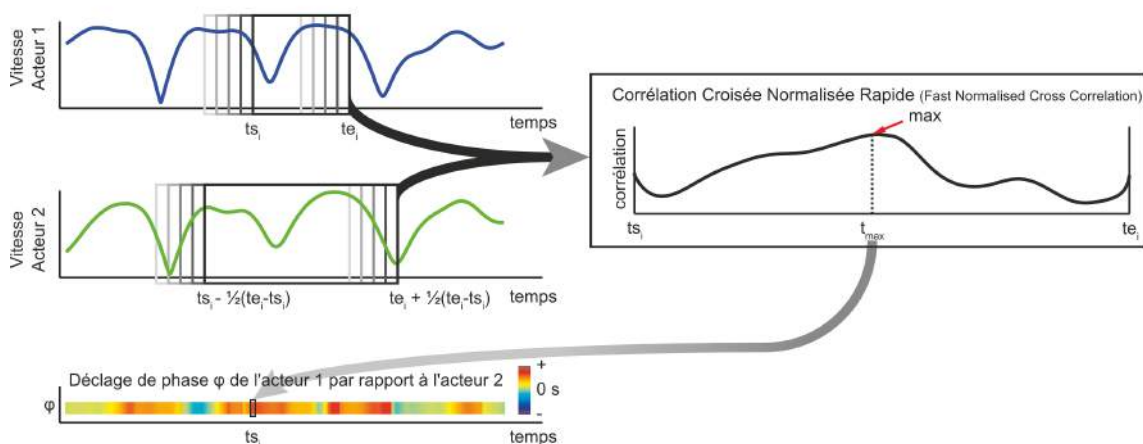


Figure 4.3 – Méthode de calcul du décalage de phase.

4.3 Résultats

Tout d'abord, nous avons étudié l'effet des émotions sur la cinématique du groupe. Ensuite, nous nous sommes intéressés aux cinématiques d'interaction entre les deux acteurs. Des exemples des parcours effectués par les acteurs en groupe sont visible Figure 4.4. Concernant la cinématique du groupe, notre analyse a montré que dans une situation de colère, les mouvements sont plus rapides et plus saccadés comparé à un état neutre. L'inverse se produit dans le cas de la peur. Nous avons remarqué que l'effet est plus fort lorsque nous nous trouvons dans une situation d'interaction symétrique. En effet, lorsque les deux acteurs expriment la colère, le groupe va encore plus vite que dans une situation où juste un des acteurs joue la colère. Dans cette analyse, nous montrons qu'une condition d'émotion symétrique résulte en une interaction physique symétrique alors qu'une condition d'émotion asymétrique déséquilibre les interactions du groupe.

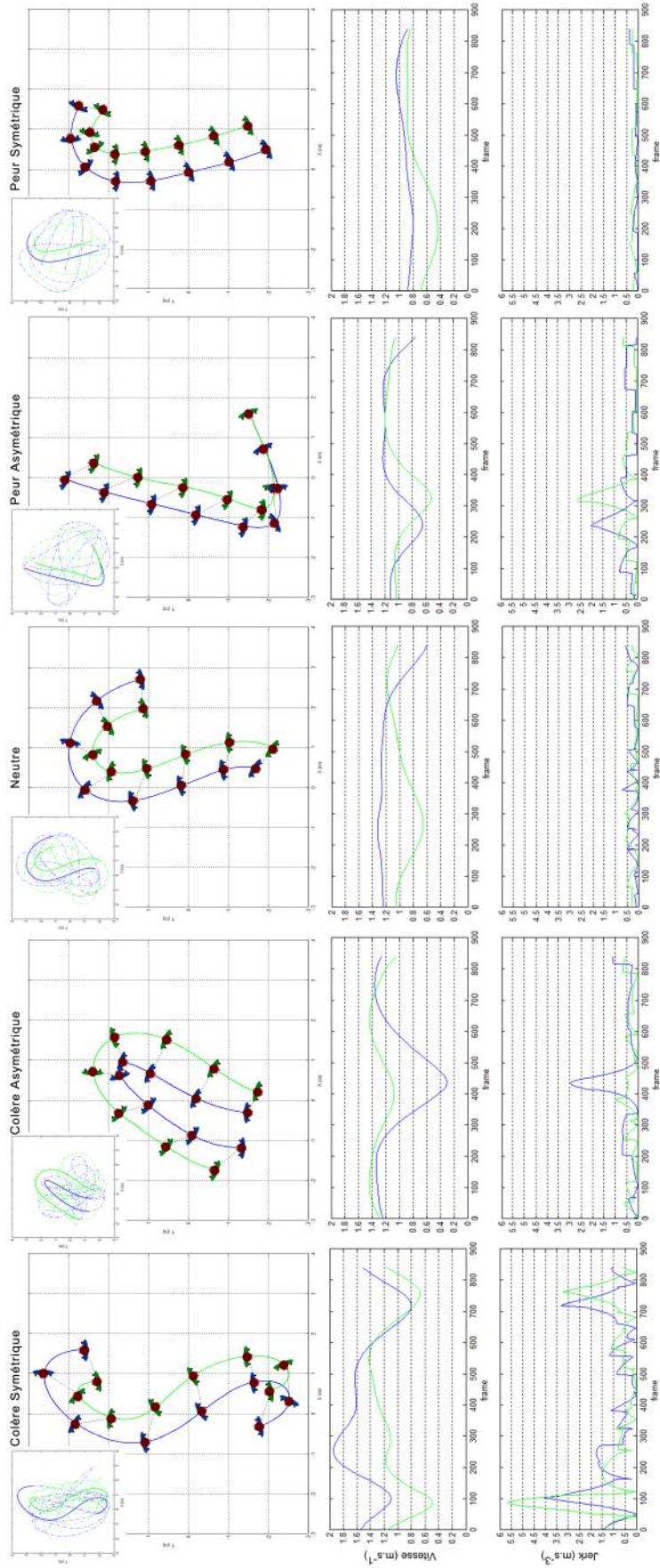


Figure 4.4 – Exemples de trajectoires obtenues lors de la marche en groupe. Les profils de vitesse et de jerk des tronçons de trajectoires de marche sont affichés sous chacune des trajectoires.

4.3.1 Cinématique du groupe

Dans les conditions où l'état émotionnel est symétrique, l'analyse révèle que les émotions ont un effet significatif sur la vitesse de marche du groupe ($H(2, 454) = 152.358, p < 0.001$), sur le jerk ($H(2, 454) = 174.628, p < 0.001$) ainsi que sur la distance entre les marcheurs ($H(2, 454) = 46.363, p < 0.001$) (Figure 4.5 et 4.6). Comparé à un état neutre, le groupe va plus vite et avec un mouvement plus saccadé dans le cas de la colère et il va plus lentement et un mouvement moins saccadé pour la peur. De plus, la distance entre les acteurs est plus grande dans le cas de la colère et plus petite pour la peur par rapport à l'état neutre. L'analyse n'a pas montré d'effet des émotions sur l'angle entre les acteurs ($p = 0.278$) : les acteurs ont tendance à marcher côte à côté.

Dans les conditions asymétriques, les émotions ont un effet significatif sur tous les paramètres étudiés : vitesse ($H(2, 715) = 133.956, p < 0.001$), jerk ($H(2, 715) = 125.842, p < 0.001$), distance entre acteurs ($H(2, 715) = 58.666, p < 0.001$) ainsi que l'angle entre les acteurs ($H(2, 715) = 453.893, p < 0.001$) (Figure 4.5 et 4.6). Les comparaisons par paires montrent que dans le cas de la colère, la vitesse est plus élevée, le mouvement plus saccadé et la distance plus grande comparé à l'état neutre ou à la peur. De plus, lorsqu'il joue la peur, le marcheur expressif marche devant le marcheur en état neutre. Lorsqu'il joue la peur, il marche derrière.

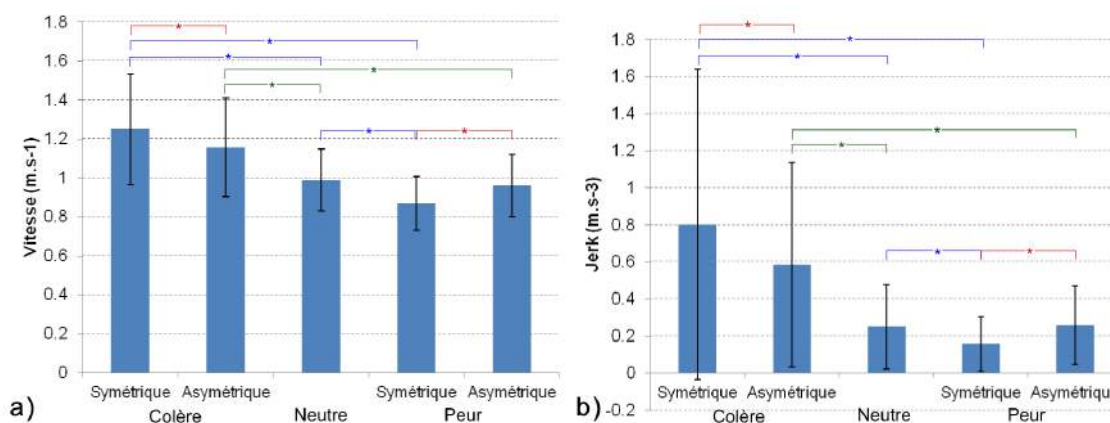


Figure 4.5 – Vitesse de marche en m.s-1 (a) et jerk m.s-3 (b) du groupe en fonction des 5 situations émotionnelles possibles. Toutes les conditions sont non transitive et sans dialogue. Les différences statistiques sont indiquées en bleu pour les situations symétriques, en vert pour les situations asymétriques et en rouge pour les comparaisons entre situations symétriques et asymétriques.

4.3.2 Cinématique de l'acteur neutre

Nous avons également étudié l'effet des émotions sur la marche du marcheur neutre (Figure 4.7). L'analyse révèle que l'émotion de l'acteur expressif a un effet significatif sur les paramètres de marche de l'acteur neutre (vitesse : $H(2, 805) = 54.065, p < 0.001$, jerk : $H(2, 805) = 177.30, p < 0.001$). Alors que la vitesse et le jerk ne changent pas lorsque l'ac-

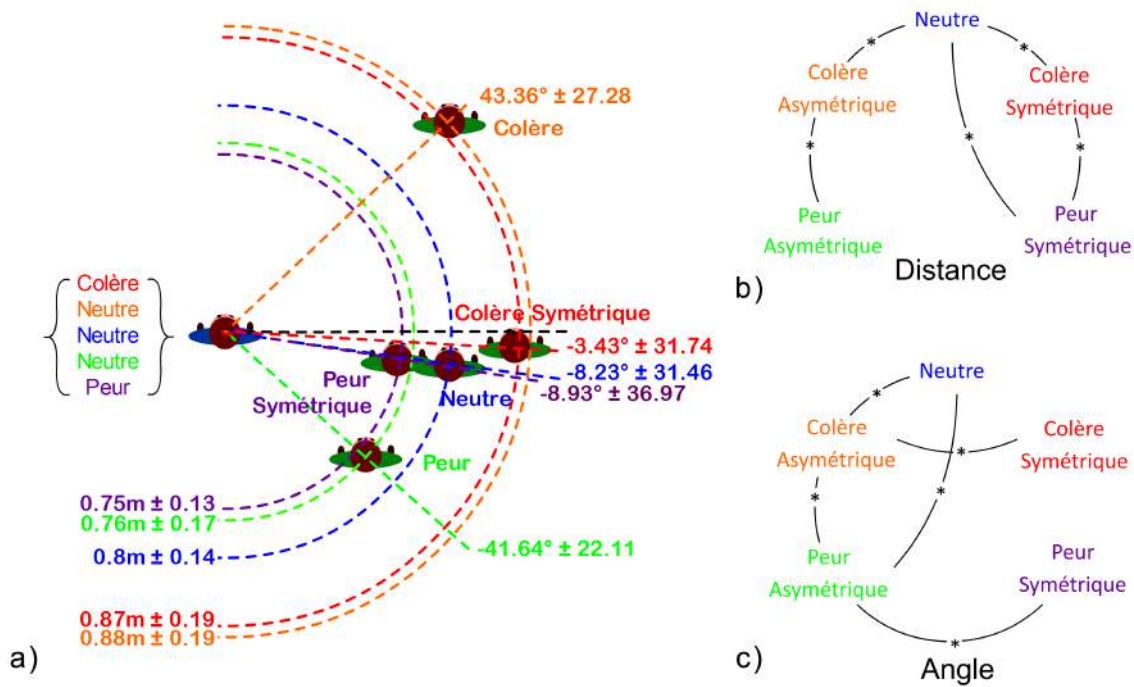


Figure 4.6 – Position relative entre les deux acteurs en fonction des 5 situations émotionnelles possibles. La position relative est composée de la distance (en m) entre les acteurs et l’angle entre eux (en °). Les différences statistiques entre conditions sont illustrés en (b) pour la distance et en (c) pour les angles.

teur expressif est dans un état neutre ou joue la peur, ces paramètres augmentent lorsqu’il joue la colère.

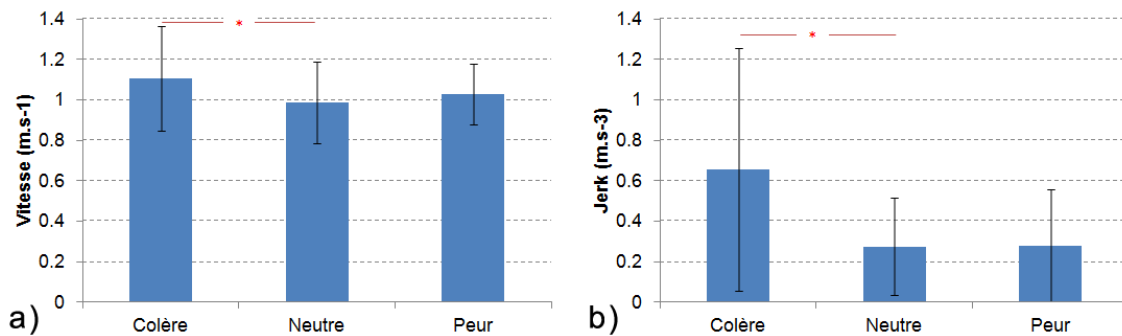


Figure 4.7 – Vitesse moyenne en $m.s^{-1}$ (a) et jerk en $m.s^{-3}$ (b) de l’acteur neutre en fonction de l’émotion de l’acteur expressif.

4.3.3 Effet de la transitivité

Comme on pouvait s’y attendre, le fait qu’une émotion soit transitive a changé la métrique de l’interaction. En effet, dans le cas de la colère symétrique et asymétrique (Figure 4.8 a) ainsi que celui de la peur symétrique (Figure 4.9 a), la transitivité de l’émotion diminue la vitesse groupe. Elle influence également la position relative entre les marcheurs : la distance interpersonnelle est plus grande lorsque la colère (symétrique ou asymétrique) est transitive (Figure 4.8 c) ainsi que dans le cas de la peur symétrique (Figure 4.9 c).

4.3.4 Effet du dialogue

Dans le cas de la colère, nous avons étudié l'effet que peut avoir le dialogue sur la cinématique de l'interaction. Comme nous pouvons le voir Figure 4.8 a, la vitesse du groupe diminue dans le cas d'une situation de colère (symétrique et asymétrique) où les marcheurs parlent. Le jerk n'est jamais affecté par le dialogue sauf dans le cas d'une colère symétrique et transitive où le mouvement est plus saccadé lorsque les acteurs parlent ensemble (Figure 4.8 b). Par rapport à une situation sans dialogue, la distance entre les acteurs diminue dans tous les cas sauf dans le cas symétrique transitatif (Figure 4.8 c). Enfin, le dialogue a un effet sur l'angle entre les marcheurs seulement lorsque l'émotion est non transitive.

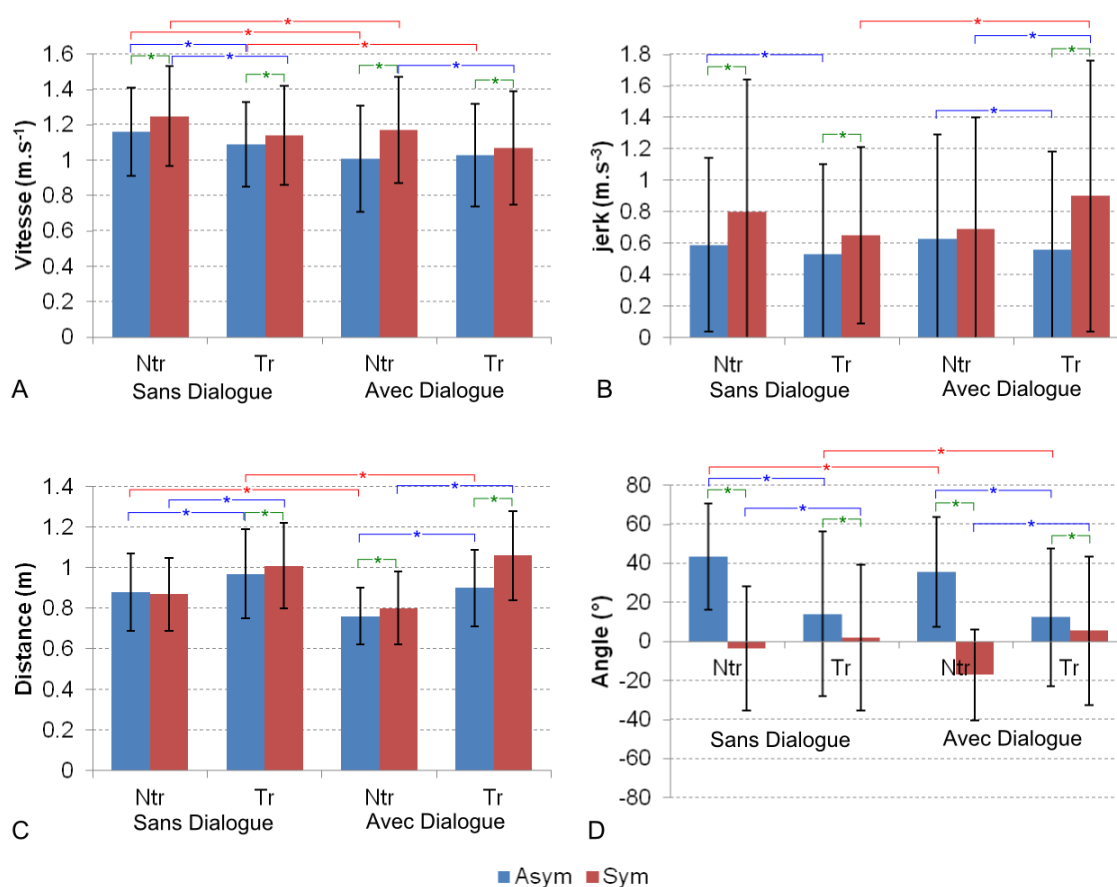


Figure 4.8 – Effet de la transitivité (Ntr : Non transitive, Tr Transitive) : sur les paramètres de groupe étudiés dans le cas de la colère. Les situations asymétriques sont en bleu, les situations symétriques en rouge.

4.3.5 Décalage de phase

En étudiant les profils de vitesse des deux acteurs en interaction, nous avons remarqué qu'ils ont des variations semblables. Nous avons donc étudié le décalage instantané entre les profils de vitesse ainsi que le décalage global. La Figure 4.10 présente les décalages de phase globaux en fonction de la situation émotionnelle. Lorsque les deux acteurs se

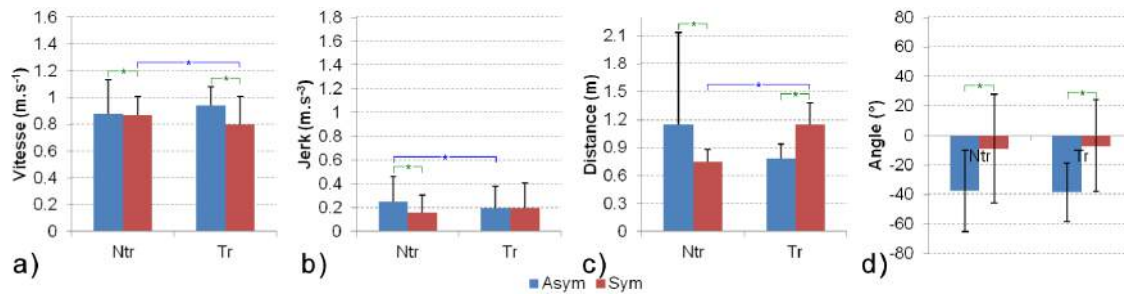


Figure 4.9 – Effet de la transitivité sur les paramètres de groupe étudiés dans le cas de la peur. Les situations asymétriques sont en bleu, les situations symétriques en rouge.

trouvent dans une situation symétrique (neutre-neutre, colère-colère ou peur-peur), on n’observe aucun décalage de phase significatif (que l’émotion soit transitive ou non, avec ou sans dialogue). Les écarts-type nous laissent penser que les deux marcheurs prennent aussi bien de l’avance que du retard par rapport à l’autre sans jamais qu’un écart se dégage.

Au contraire, lorsque la situation émotionnelle est asymétrique, il existe un décalage de phase entre les deux profils de vitesse. Ainsi, dans le cas de la colère (toute situation asymétrique confondue), les profils de vitesse indiquent un décalage de phase global négatif significatif (-0.241 ± 0.49). Le fait que le décalage soit négatif nous indique que nous sommes dans une phase de meneur de l’acteur jouant l’émotion par rapport à l’acteur restant neutre. Dans le cas de la peur (toute situation asymétrique confondue), les résultats montrent un décalage de phase global positif significatif (0.285 ± 0.57). Ceci indique un retard de l’acteur expressif par rapport à l’acteur neutre.

Si l’on regarde plus en détail les situations de colère, on observe un effet significatif de la transitivité sur le décalage de phase global ($W = 353144.00, p < 0.001$). Le décalage est ainsi plus petit lorsque l’émotion est transitive par rapport à une émotion non transitive. De plus, il existe également un effet significatif du dialogue sur le décalage de phase global aussi bien dans une situation transitive ($W = 105099.00, p < 0.001$) que non transitive ($W = 96220.00, p < 0.001$). Dans les deux cas, le décalage de phase global est plus petit lorsque les deux marcheurs se parlent. Dans le cas d’une colère non transitive avec dialogue, le décalage est quasi nul (-0.023 ± 0.48) comme pour les situations symétriques.

Dans le cas de la peur, la transitivité n’a aucun effet significatif sur le décalage de phase global.

4.4 Discussion

D’une manière générale, cette étude a permis de mettre en avant l’émergence d’un comportement de groupe à partir de la combinaison des états émotionnels des membres qui le composent. Dans le chapitre précédent (chapitre 3), nous avons mis en évidence le fait que les trajectoires non contraintes permettent d’observer une influence des émotions sur la cinématique de la marche similaire à celle qui a été observée dans le cas de la marche individuelle en ligne droite [CG07, GCF12, KBH09, ROCG09]. Nous avons également conclu que

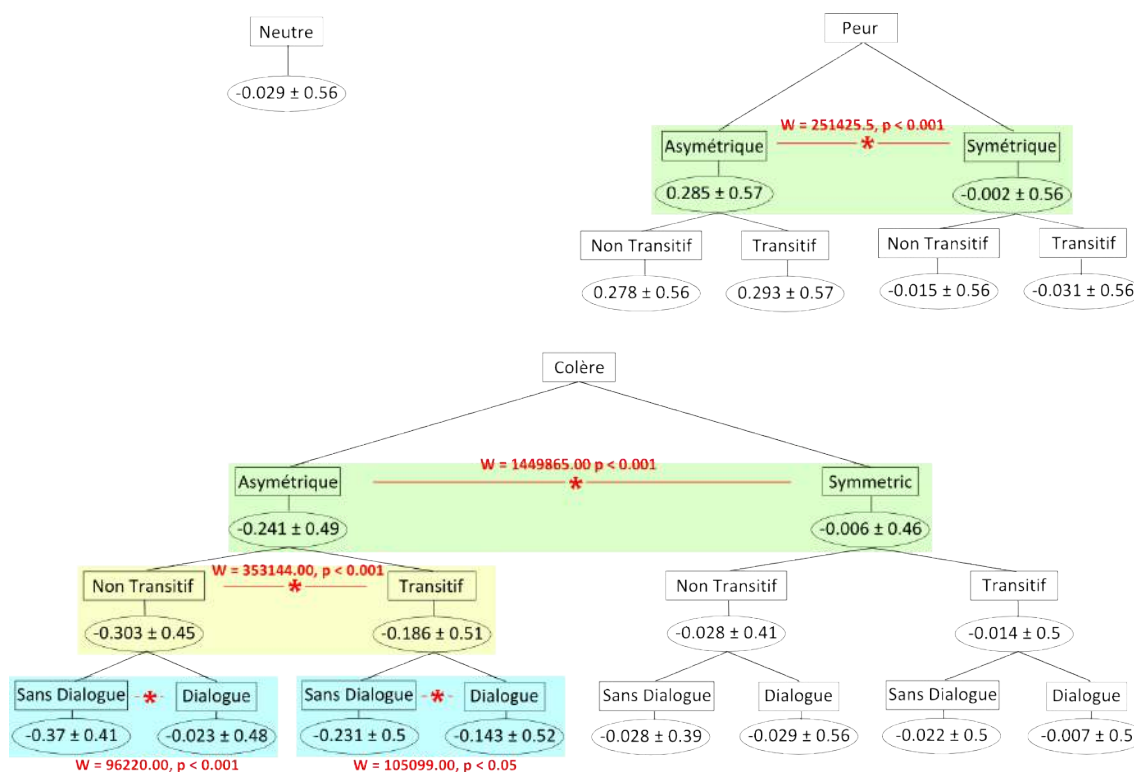


Figure 4.10 – Moyennes (\pm écart-type) des décalages de phase entre les acteurs en fonction de leur émotion : neutre (en haut à gauche), peur (en haut à droite) ou colère(en bas).

les trajectoires non contraintes permettaient l'étude des interactions entre plusieurs marcheurs d'une manière plus écologique. De plus, plusieurs études ont étudié les interactions physiques entre personnes [DVKB05, DBL⁺12]. Cependant, à notre connaissance, l'étude de l'influence des émotions sur l'interaction dans une tâche corps complet n'a jamais été réalisée auparavant.

La principale contribution de ce chapitre est donc bien la mise en avant de l'influence des émotions sur l'interaction entre deux personnes dans le cadre d'une tâche de locomotion. En plus d'affecter la cinématique du groupe, elles influencent aussi la métrique de l'interaction.

Dans cette étude, nous avons également montré que l'influence des émotions sur la cinématique globale du groupe était analogue avec les études précédentes sur la marche seul. En effet, comparé à un état neutre, la démarche de la marche, dans le cas d'émotions non transitives et sans dialogue, était plus rapide et plus saccadée dans le cas de la colère, et plus lente et moins saccadée dans le cas de la peur.

4.4.1 Émergence d'un mécanisme de "meneur-suiveur"

Dans cette étude, nous avons cherché à savoir comment deux styles de marche différents pouvaient se conjuguer dans une dynamique de groupe. En effet, si l'on considère une situation asymétrique telle que colère-neutre, comment un marcheur dans un état neutre peut-il marcher avec un marcheur en colère qui marche plus vite ?

Dans le cas d'émotions non transitives et sans dialogue, les acteurs ont marché côte à côte lorsque les émotions étaient symétriques. Lorsque elles étaient asymétriques, nous avons pu observer plusieurs choses. Tout d'abord, en situation colère-neutre, nous avons montré que le mouvement du groupe est dirigé par l'acteur jouant la colère. Ce dernier marche au devant du groupe et impose son rythme de marche (vitesse plus élevée). Un comportement inverse est observé dans une situation peur-neutre : l'acteur jouant la peur semble suivre le marcheur neutre. En effet, dans cette situation, l'acteur expressif se place derrière l'acteur neutre et il laisse ce dernier imposer la vitesse du groupe (aucune différence entre la vitesse de groupe dans une situation peur-neutre par rapport à une situation neutre-neutre). Ces observations nous laissent penser qu'une situation émotionnelle symétrique puisse induire de la coopération tandis qu'une situation émotionnelle asymétrique pourrait induire un mécanisme de meneur-suiveur. Des interactions meneur-suiveur ont déjà été décrites dans le cas d'interactions physiques. Par exemple, lors d'une tâche de locomotion en face à face, Ducourant et al. [DVKB05] ont montré que le suiveur coordonnait sa distance interpersonnelle par rapport à la perception du déplacement global du meneur. De leur côté, D'Ausilio et al. [DBL⁺12] ont étudié l'efficacité de la communication dans un orchestre. Ils ont montré qu'en fonction de la cinématique du chef d'orchestre (meneur), les musiciens (suiveurs) jouaient et interagissaient de manière différente. On peut également rapprocher nos résultats à ceux obtenus par d'autres études portant notamment sur l'organisation spatiale lors d'interactions sociales. Ainsi, la position spatiale d'une personne dans un groupe semble être primordiale dans l'émergence d'un leadership à l'intérieur de ce groupe [Kna12]. Il a ainsi été montré que la manière dont on s'assoie autour d'une table avec quelqu'un d'autre dépend de la manière dont on veut interagir avec cette personne [Coo70, Arg13]. Par exemple, dans une telle situation, le fait de s'asseoir côte à côte est signe de coopération tandis que le fait de s'asseoir face à face est signe de compétition. Dans notre expérience, nous avons demandé aux acteurs de marcher ensemble sans donner d'instructions quant aux rôles qu'ils devaient prendre. Nous qualifions les interactions observées dans notre étude d'interactions meneur-suiveur puisqu'au regard des résultats obtenus, il semble que les sujets ont prit des rôles de meneur ou de suiveur en fonction de l'émotion qu'ils devaient jouer. Dans le cas d'une interaction colère-neutre, l'acteur en colère semble meneur puisqu'il semble mener le mouvement du groupe : il se place devant l'autre acteur, le décalage de phase nous indique qu'il est en avance. Dans le cas d'une interaction peur-neutre, l'acteur jouant la peur semble avoir pris le rôle de suiveur puisque ses actions sont dirigées par l'acteur neutre : il est à l'arrière du groupe et a du retard (décalage de phase positif).

Aux vues de ces résultats, nous formulons l'hypothèse qu'une interaction meneur-suiveur peut émerger d'une situation d'interaction asymétrique. Cette hypothèse est principalement soutenue par les décalages de phase entre les marcheurs. L'analyse des décalages de phase d'une interaction entre une émotion de colère ou de peur par rapport à une émotion neutre montre qu'il existe un décalage significatif entre les deux acteurs. Ceci peut indiquer qu'une des émotions jouées par un des acteurs fait réagir l'autre acteur en consé-

quence. D'après nos résultats, lorsqu'un des acteurs exprime la colère, celui dans l'état neutre prend du retard. Inversement, lorsque l'acteur joue la peur, c'est lui qui prend du retard par rapport à l'acteur neutre. On peut donc faire l'hypothèse que l'acteur en colère prend le rôle de meneur du groupe lorsqu'il interagit avec un acteur en état neutre. Il prend le rôle de suiveur lorsqu'il joue la peur et qu'il interagit avec un acteur en état neutre.

Lorsque les deux acteurs jouent la même émotion, le décalage de phase est très proche de 0s. De plus, l'écart-type entre les différentes situations est le même, avec des valeurs un peu plus élevées dans le cas de la peur. Ceci nous laisse penser que les effets de deux émotions identiques se compensent entre eux et que les deux acteurs assument ainsi un état de coopération.

Nous n'avons pas observé d'influence de la symétrie de l'émotion sur la distance interpersonnelle. En moyenne, la distance interpersonnelle (dans les situations non transitive et sans dialogue) est de 0.9m. Cette valeur est similaire à celle observée lorsque deux marcheurs (dans un état neutre et sans dialogue) se croisent [OMCP12]. Cette distance est à rapprocher de l'espace personnel défini dans le cadre de la locomotion comme étant une zone de protection entourant chaque individu et qui permet de planifier et d'exécuter des adaptations de la marche tout en préservant la sécurité de l'individu [Tem95]. Cette distance est influencée par les interactions sociales et peut être associée à la distance personnelle lointaine allant de 50cm à 120cm définie par Hall [HH69] et qui représente une zone où les individus peuvent entrer en interaction.

4.4.2 Effet des différentes conditions d'interaction

Dans la section précédente, nous avons discuté du niveau d'interaction le plus basique entre les deux marcheurs : ils doivent marcher ensemble, ils ne peuvent pas parler et leurs émotions sont non transitives. Bien entendu, les situations réelles sont bien plus complexes et c'est pourquoi nous avons vérifié si nos observations précédentes sont également valides dans ce genre de situations plus complexes.

En premier lieu, le caractère transitif de l'émotion change la métrique de l'interaction. En effet, dans le cas de la colère par exemple, on peut constater un effet significatif de la transitivité sur l'angle entre les deux acteurs ainsi que sur le décalage de phase. Chacun de ces deux paramètres est plus petit lorsque l'émotion est transitive. Les acteurs semblent donc plus synchronisés, ce qui est contraire aux résultats obtenus dans des études précédentes sur des tâches manuelles [SCP⁺12]. De plus, bien que les acteurs soient plus synchronisés, ils sont plus distants. Ceci est sûrement dû aux émotions étudiées qui sont considérées comme négatives [E⁺92] : colère et peur induisent un mouvement répulsif et par conséquent des distances interpersonnelles plus grandes.

La présence de dialogue a également induit des changements dans la métrique des interactions. Comme on a pu le constater, le fait de parler a induit une plus grande synchronisation entre les marcheurs dans les situations asymétriques (angles et décalage de phase réduits). Ceci a également réduit leur distance interpersonnelle. Il semble qu'ils ont

essayé de garder une distance conversationnelle excepté dans le cas de la colère symétrique transitive (les deux acteurs sont alors en colère l'un contre l'autre). Enfin, la vitesse de marche du groupe est également plus faible. En effet, le fait de marcher (et dans notre cas de choisir sa trajectoire) est déjà en soit une tâche demandant une certaine attention [WSC02]. Le fait de devoir parler en même temps peut être considéré comme une tâche supplémentaire nécessitant également de l'attention de la part des deux acteurs ce qui a pu avoir pour effet de diminuer la vitesse du groupe.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que les émotions influencent le rôle apparent des membres d'un groupe. En effet, sans avoir attribué de rôle prédéfini aux acteurs dans leur tâche de locomotion, on a pu observer que ces derniers peuvent soit prendre le rôle de meneur ou celui de suiveur en fonction de la situation émotionnelle dans laquelle ils se trouvent. Cette observation n'a été faite que dans le cas où les émotions des deux acteurs sont différentes. Lorsqu'elles sont identiques, l'effet de leurs émotions est comme compensé et les marcheurs ne s'attribuent aucun rôle.

Nous avons également montré que les caractéristiques de l'émotion (la transativité ou le dialogue) affectent de manière significative la métrique des interactions et modulent l'effet des émotions. Ces résultats suggèrent donc que l'interaction est multimodale et complexe et qu'il est par conséquent important de prendre en compte toutes les dimensions d'une interaction pour pouvoir étudier les effets des émotions sur la cinématique du mouvement.

Interaction humain réel / humain virtuel

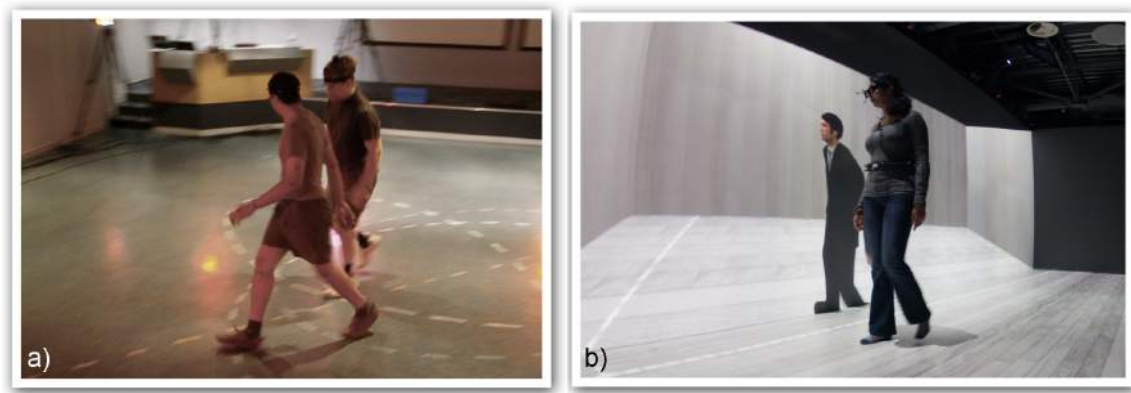


Figure 5.1 – Étude des interactions entre humains réels et virtuels. Dans une première étape a), nous créons une base de données de mouvements de marches expressives entre deux marcheurs réels ainsi qu’une analyse cinématique de ces marches. Nous validons ces données par une étude en perception. Enfin, b) nous animons un humain virtuel grâce à ces données et nous réalisons une analyse cinématique de la marche entre un humain réel et un virtuel.

5.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons étudié comment l’état émotionnel influence la cinématique de la marche d’un marcheur ainsi que la cinématique de l’interaction entre deux marcheurs. Dans ce chapitre, nous allons vérifier si ce que nous observons entre deux marcheurs réels en interaction est également valable entre un marcheur réel et un marcheur virtuel. En effet, de nombreuses études ont montré que les humains virtuels doivent bouger et réagir comme des humains réels [WPB93] et que l’expression des émotions augmente significativement le réalisme global du comportement des humains virtuels [FMH04, NHP11]. De nombreuses études proposent ainsi différentes techniques pour concevoir des humains virtuels interactifs et émotionnels [GVCP⁺99, FMH04, SR05, Pel09, NHP11, ONBP12, TCEG12]. D’autres encore, ont étudié les interactions entre humains réels et virtuels. Par exemple, Ferri et collaborateurs [FSG⁺10] ont montré que les sujets sont influencés par les expressions faciales du personnage virtuel qu’ils doivent nourrir. De même, Melo et

al. [dMCG12] ont montré que les expressions faciales d'un humain virtuel peut influencer la prise de décision lors d'une tâche de négociation. Dès lors, il est intéressant de voir comment l'expression des émotions, à travers les mouvements du corps et non des expressions faciales, peut influencer les humains.

Dans ce chapitre, nous proposons une expérience pilote permettant d'étudier comment l'expression des émotions à travers les mouvements du corps peut influencer les interactions physiques entre un humain réel et un humain virtuel. Pour cela, nous avons continué à nous concentrer sur la tâche quotidienne qu'est la marche. Les questions auxquelles nous voulons répondre sont les suivantes : Est-ce que les humains réels perçoivent les émotions d'un humain virtuel à travers sa démarche ? Est-ce que les humains réels adaptent leur propre marche avec un humain virtuel de la même manière qu'ils le font avec un humain réel ?

Pour répondre à ces questions, nous proposons une expérience en trois étapes (Figure 5.2). La première consiste à faire marcher ensemble, en ligne droite et en fonction de différentes émotions deux acteurs réels. Ceci nous permet de créer une base de mouvements de marche de référence. A partir de cette base, nous réalisons une première analyse cinématique (vitesse de marche, distance entre les acteurs et angle entre les acteurs). Cette base de données nous sert également de support pour créer des animations de marche expressive basées sur les données capturées. Dans la deuxième étape, nous animons un humain virtuel expressif pour produire des stimuli de marche expressive. Ceci afin de s'assurer que les sujets reconnaissent bien les émotions jouées par les acteurs. La validation de cette étape permet de passer à l'étape 3. Dans cette dernière étape, nous demandons aux sujets de marcher avec l'humain virtuel tout comme les deux acteurs de l'étape 1. Nous réalisons alors une deuxième analyse cinématique avec les données obtenues que nous comparons avec l'analyse de l'étape 1.

5.2 Étape 1 : création de la base de marches expressives

5.2.1 Protocole expérimental

5.2.1.1 Population d'étude

Pour créer la base de marches expressives, nous avons fait appel à 2 acteurs masculins de 24 et 27 ans. Ils n'ont fait état d'aucune pathologie neurologique ou vestibulaire qui pourrait affecter leur locomotion. Tous deux ont été volontaires pour participer à cette expérimentation. Ils ont rempli un consentement de participation conformément à la déclaration d'Helsinki.

5.2.1.2 Tâche

La tâche consiste à faire marcher les deux acteurs ensemble le long d'une ligne droite de 10m tracée au sol. Dans cette expérience, le fait de devoir utiliser le même protocole dans

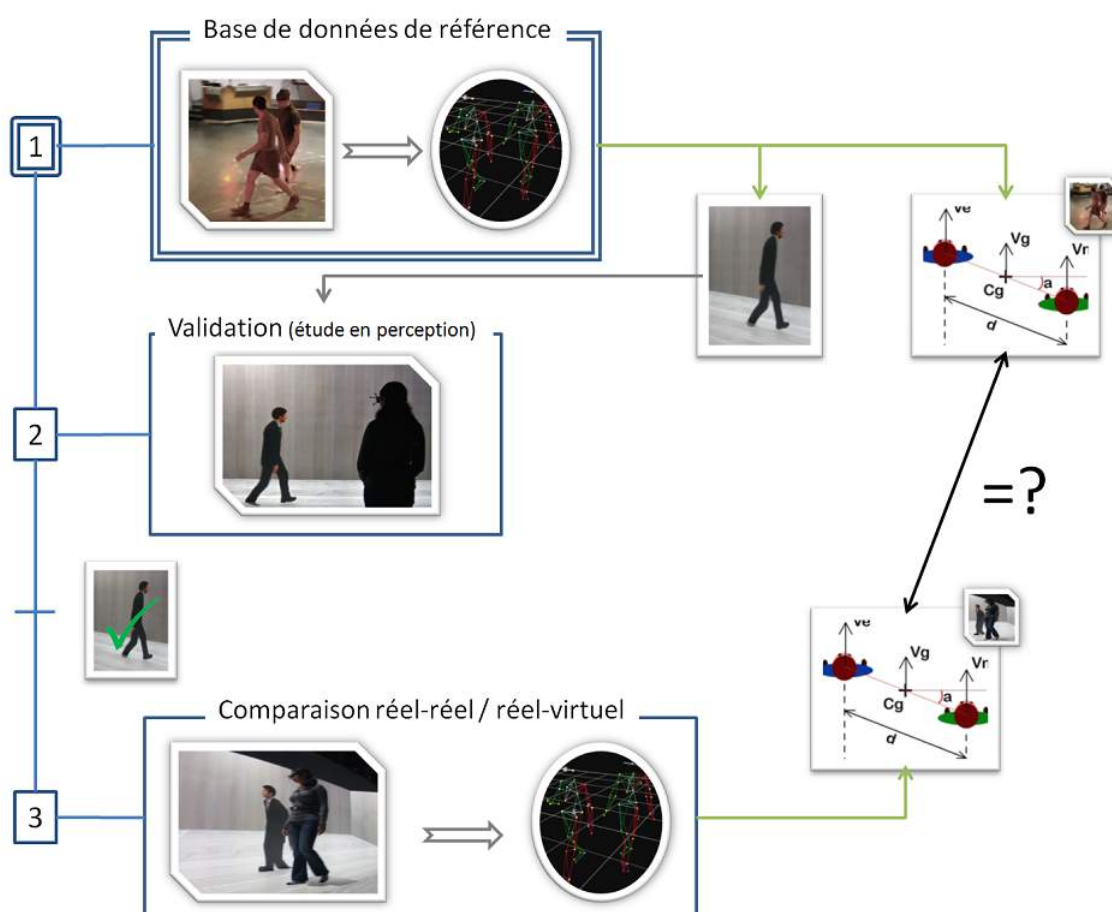


Figure 5.2 – Analyse de l'interaction entre un marcheur réel et un marcheur virtuel en trois étapes. Dans l'étape 1, nous réalisons une 1^{ère} analyse cinématique de la marche entre deux acteurs réels. Nous validons les données obtenues par une étude en perception à l'étape 2. La validation des données nous permet de passer à l'étape 3 concernant la marche entre un acteur réel et un acteur virtuel.

la cas "réel-réel" et dans le cas "réel-virtuel" nous a obligé à contraindre la trajectoire de marche à l'espace qu'offre Immersia (et ce bien que nous ayons adopté une approche non contrainte des trajectoires lors des chapitres précédents). Chacun leur tour, un des acteurs doit jouer une émotion (neutre, joie, colère ou peur) tandis que l'autre reste dans un état neutre. Afin d'étudier l'effet de la symétrie des émotions, nous avons également demandé aux acteurs de jouer une situation de colère symétrique. Les acteurs ne sont pas autorisés à parler. Chaque condition est répétée 10 fois pour chacun des acteurs (soit 2 acteurs x 5 émotions x 10 répétitions = 100 essais). L'expérimentateur annonce au début de chaque essai l'émotion de chacun des acteurs et attend qu'ils soient prêts pour commencer à enregistrer leurs mouvements.

5.2.1.3 Analyse

Les données cinématiques sont capturées grâce à 12 caméras Vicon MX synchronisées à 120Hz. Les deux acteurs sont équipés de 43 marqueurs placés sur des points anatomiques

standardisés. Les paramètres cinématiques (vitesse, distance et angle) ont ensuite été calculés selon la méthodologie décrite section 2.3.2 pour chacun des acteurs ainsi que le groupe. Le test de normalité de Kolmogorov-Smirnov a montré que les données ne suivaient pas une distribution normale. Nous avons donc utilisé des tests statistiques non-paramétriques. L'influence des émotions a ainsi été évaluée grâce au test de Kruskal-Wallis et les comparaisons par paires avec le test de Mann-Whitney. Tous les tests statistiques ont été effectués à l'aide du logiciel de statistique SPSS (©IBM).

5.2.2 Résultats

Les vitesses de marche des acteurs sont représentées figure 5.3. Comme on peut le voir, l'état émotionnel influence la vitesse de marche du groupe ($H(4, 169) = 128.01, p < 0.001$), de l'acteur jouant l'émotion ($H(4, 169) = 127.76, p < 0.001$) ainsi que de l'acteur neutre ($H(4, 169) = 127.12, p < 0.001$). Comparée à un état neutre ($V_g = 0.99m.s^{-1} \pm 0.18, V_e = 0.99m.s^{-1} \pm 0.18, V_n = 1.01m.s^{-1} \pm 0.18$), la vitesse de marche (du groupe, de l'acteur expressif et de l'acteur neutre) est plus rapide ($p < 0.001$) dans les états de joie ($V_g = 1.44m.s^{-1} \pm 0.07, V_e = 1.46m.s^{-1} \pm 0.06, V_n = 1.43m.s^{-1} \pm 0.1$) et de colère symétrique ($V_g = 1.95m.s^{-1} \pm 0.1, V_e = 2.04m.s^{-1} \pm 0.12, V_n = 1.88m.s^{-1} \pm 0.1$) et asymétrique ($V_g = 1.74m.s^{-1} \pm 0.11, V_e = 1.8m.s^{-1} \pm 0.14, V_n = 1.69m.s^{-1} \pm 0.1$). Les comparaisons par paire n'indiquent aucune différence significative entre la joie et la colère asymétrique ($p = 0.365$) et symétrique ($p = 0.193$). Il n'y a pas non plus de différence entre l'état neutre et la peur ($V_g = 1.09m.s^{-1} \pm 0.06, V_e = 1.06m.s^{-1} \pm 0.08, V_n = 1.12m.s^{-1} \pm 0.06, p = 1.0$), ni entre les deux situations de colère ($p = 1.0$).

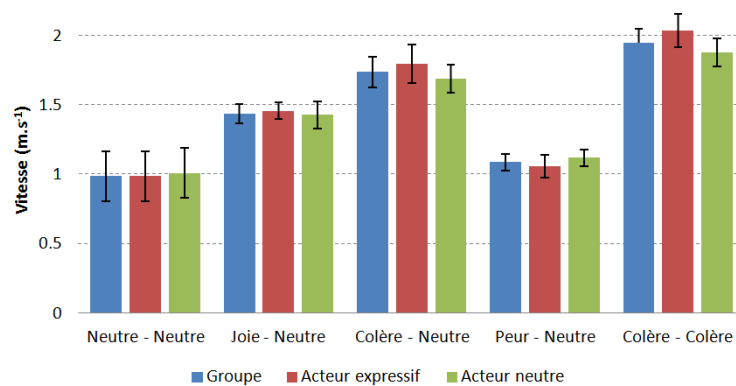


Figure 5.3 – Vitesses de marche moyennes du groupe (bleu), de l'acteur jouant l'émotion (rouge) et de l'acteur neutre (vert).

Comme on peut le constater sur la figure 5.4, l'état émotionnel de l'acteur jouant une émotion influence également la position relative entre les deux acteurs aussi bien au niveau de la distance entre ces derniers ($H(4, 169) = 107.70, p < 0.001$) qu'au niveau de l'angle entre eux ($H(4, 169) = 116.74, p < 0.001$). La distance est ainsi plus grande ($p < 0.001$) dans les états de colère asymétrique ($d = 1.06 \pm 0.15$) et symétrique ($d = 0.89m \pm 0.09$), de joie ($d = 0.98m \pm 0.11$) et de peur ($d = 0.99m \pm 0.11$) par rapport à l'état neutre

($d = 0.8m \pm 0.06$). A part pour l'état neutre, les comparaisons par paire n'indiquent aucune autre différence entre les différentes émotions. Lorsque les états émotionnels sont symétriques (neutre-neutre et colère-colère), les deux acteurs ont tendance à marcher côte à côte ($a_{neutre-neutre} = -2.15^\circ \pm 7.18$, $a_{colère-colère} = -3.2^\circ \pm 10.85$). Lorsque un acteur exprime la colère (cas asymétrique) ou la joie, il a tendance à se placer à l'avant du groupe ($a_{colère-asy} = 33.33^\circ \pm 19.87$, $a_{joie} = 20.16^\circ \pm 10.16$, $p < 0.001$). Il se place en retrait lorsqu'il exprime la peur ($a_{peur} = -26.58^\circ \pm 22.32$, $p < 0.001$).

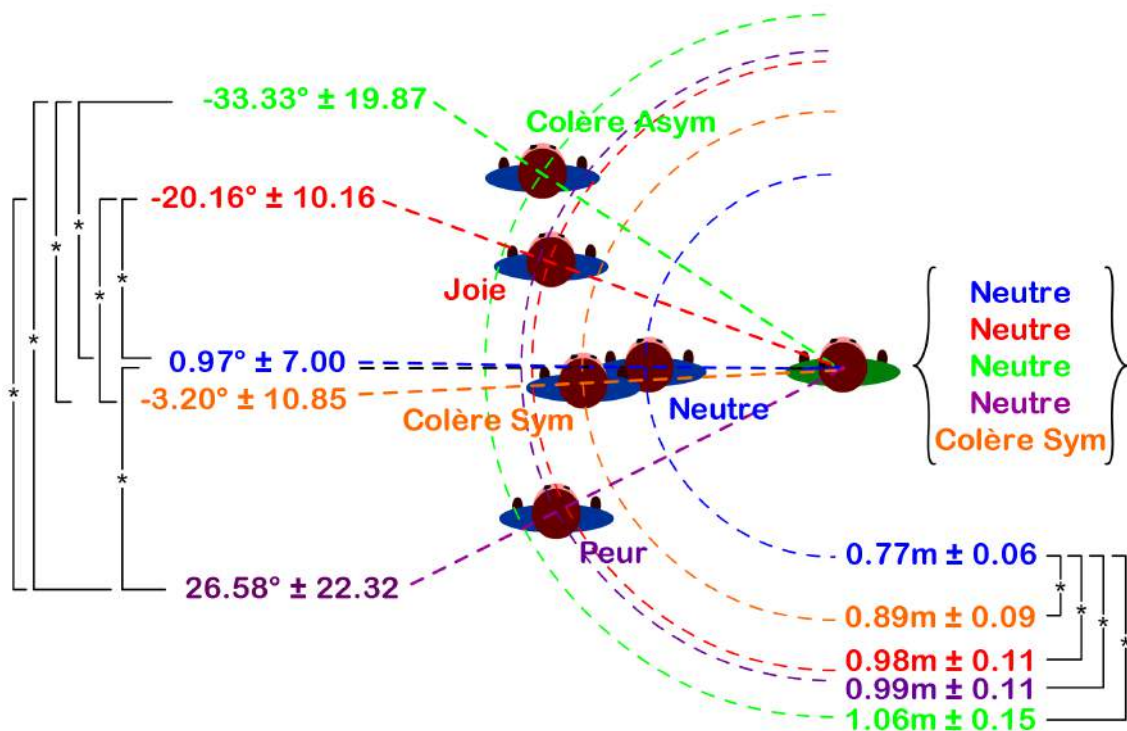


Figure 5.4 – Position relatives moyennes (distance interpersonnelle et angle) entre les acteurs. Le marcheur bleu représente l'acteur jouant une émotion, le vert, celui restant dans un état neutre.

On voit que les résultats obtenus ici coïncident avec ceux décrits dans le chapitre 4. Ainsi l'acteur expressif adapte sa marche par rapport à son état émotionnel : plus rapide dans les cas de colère et de joie, plus lent dans le cas de la peur. L'acteur neutre, bien que devant rester dans un état neutre, suit le mouvement du groupe.

5.3 Étape 2 : validation des données de marche expressive

5.3.1 Protocole expérimental

5.3.1.1 Population d'étude

21 sujets (7 femmes et 14 hommes) volontaires, âgés de 21 à 59 ans (moyenne = 31.4 ans \pm 9.2) ont participé à cette expérience. Ils ont été recrutés au sein du laboratoire par

voie d'affichage et ont tous rempli un consentement de participation conformément à la déclaration d'Helsinki.

5.3.1.2 Stimuli

Les stimuli ont été animés à partir des données de capture de mouvement de l'étape 1 (Section 5.2). Pour cela, nous avons sélectionné aléatoirement un cycle complet de marche de chaque émotion que nous avons rendu cyclique sous Motion Builder™. L'animation obtenue est ensuite plaquée sur un modèle 3D de la bibliothèque RocketBox™. Nous avons utilisé un ensemble de 43 marqueurs lors de la capture de mouvement. Tous les mouvements du corps, à l'exception des expressions faciales, ont donc pu être rejoués de la même manière sur le modèle animé.

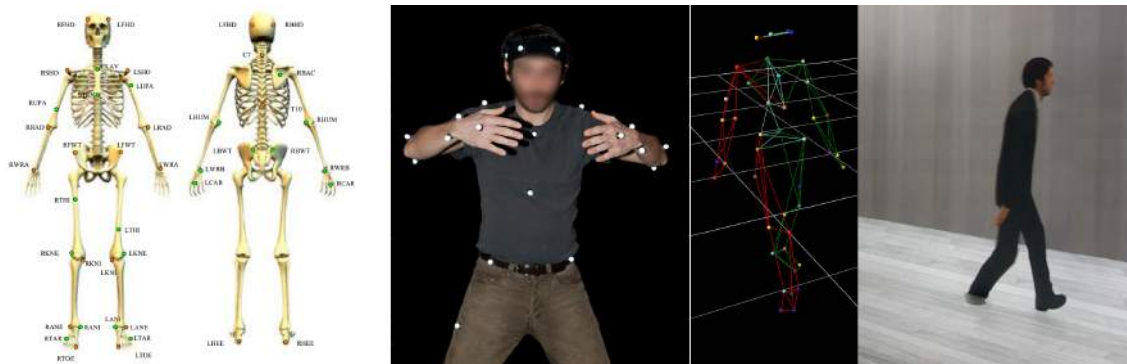


Figure 5.5 – Du marqueur à l'humain virtuel : l'humain virtuel a été animé à partir de la capture de mouvement du corps entier d'un acteur.

5.3.1.3 Environnement virtuel

L'expérience s'est déroulée dans la salle de réalité virtuelle Immersia. La salle est équipée d'un dispositif immersif de 4 écrans (vue de face, de sol et côtés droit et gauche). L'écran de face fait approximativement 10 mètres de long sur 3 mètres de haut. La profondeur est de 3 mètres. Les stimuli étaient projetés en haute résolution (environ 15 MPixels). Le rendu s'effectue en stéréoscopie active grâce à un système Volfony ActiveEyes Pro Radiofrequency synchronisé avec les projecteurs. La position du point de vue de l'utilisateur (ses lunettes) est suivie grâce au système de caméras ART et permet ainsi de synchroniser, en temps réel, le point de vue du système avec le point de vue de l'utilisateur.

5.3.1.4 Tâche

Les sujets doivent se placer face au à l'écran de face du dispositif comme montré Figure 5.6. Leur objectif est de reconnaître l'émotion jouée par le marcheur virtuel. Les animations sont présentées dans un ordre aléatoire et sont répétées 8 fois (4 aller-retour), soit 32 passages (4 émotion x 8 passages). A chaque passage, les sujets doivent répondre à la question : "quelle est l'émotion jouée par l'humain virtuel?". Ils ont ainsi le choix entre les émotions suivantes : neutre, joie, colère et peur.

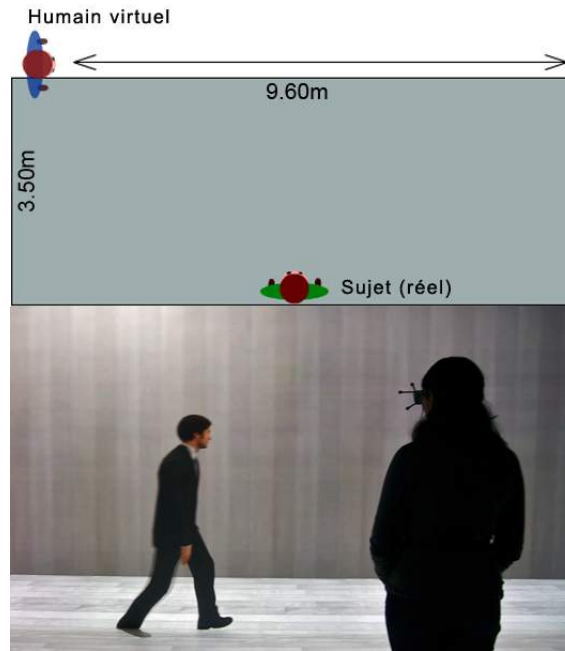


Figure 5.6 – Expérience en perception dans la salle de réalité virtuelle Immersia. Le sujet est placé au milieu du dispositif immersif et regarde l’humain virtuel marcher.

5.3.1.5 Analyse

Le taux de reconnaissance moyen de chaque émotion pour chaque condition de marche a été calculé comme étant la moyenne des taux de reconnaissance moyens de chaque sujet pour chaque émotion dans chaque condition de marche :

$$T_{e,c} = \frac{\sum_{s=1}^N T_{s,e,c}}{N} \quad (5.1)$$

avec N le nombre de sujet (21) et $T_{e,c}$ le taux de reconnaissance de l’émotion e dans la condition de marche c .

Ensuite, pour pouvoir interpréter les taux de reconnaissance, nous devons déterminer le niveau de hasard du test. Celui-ci correspond à l’intervalle dans lequel la probabilité que le taux de reconnaissance soit du au hasard est de 95%. Il se calcule selon la formule suivante :

$$\text{Niveau de hasard} = \frac{100}{N_{choix}} \pm 2 \sqrt{\frac{0.25}{N_{echantillon} + 1}} * 100 \quad (5.2)$$

Dans cette étude, l’intervalle de hasard se situe entre 4% et 46%.

Enfin, afin de comparer les moyennes entre elles et étudier l’impact des émotions sur le taux de reconnaissance, une ANOVA à mesures répétées a été utilisée.

5.3.2 Résultats

Le taux de reconnaissance des émotions est de $82\% \pm 22$, ce qui est largement au-dessus du niveau de hasard. Les taux de reconnaissance T par émotion sont de : $T_{neutre} = 89\% \pm 17$,

$T_{joie} = 75\% \pm 21$, $T_{colere} = 80\% \pm 25$ et $T_{peur} = 83\% \pm 24$ (Figure 5.7). L'ANOVA n'a révélée aucun effet des émotions sur le taux de reconnaissance ($F(3, 52) = 1.687, p = 0.187$). Cette analyse en perception montre donc les sujets sont capables de reconnaître de la même manière les différentes émotions jouées par l'humain virtuel dans une tâche de locomotion. Ceci valide également notre jeu de données.

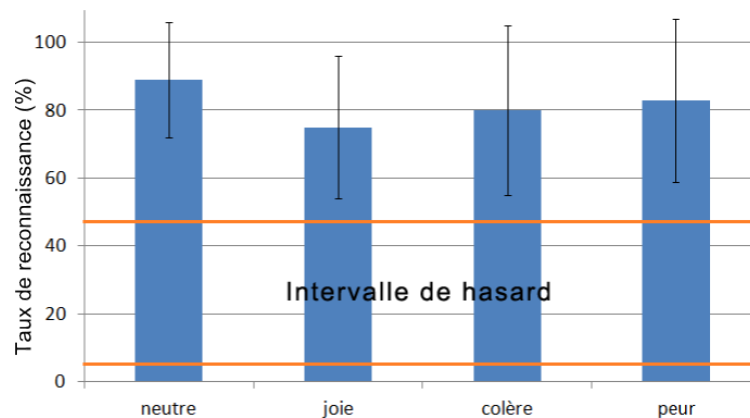


Figure 5.7 – Taux de reconnaissance moyens pour chacune des émotions.

5.4 Étape 3 : comparaison réel-réel / réel-virtuel

5.4.1 Protocole expérimental

5.4.1.1 Population d'étude

Les participants à cette étape de l'expérience sont les mêmes qu'à l'étape précédente, c'est-à-dire, 21 sujets (7 femmes et 14 hommes) volontaires, âgés de 21 à 59 ans (moyenne = 31.4 ans \pm) recrutés au sein du laboratoire par voie d'affichage et ayant rempli un consentement de participation conformément à la déclaration d'Helsinki.

5.4.1.2 Stimuli

Les stimuli sont animés à partir des données de capture de mouvement de l'étape 1 (Section 5.2). Pour cela, nous avons sélectionné aléatoirement un cycle complet de marche de chaque émotion que nous avons rendu cyclique sous Motion Builder™. L'animation obtenue est ensuite plaquée sur un modèle 3D de la bibliothèque RocketBox™. Nous avons utilisé un ensemble de 43 marqueurs lors de la capture de mouvement. Tous les mouvements du corps, à l'exception des expressions faciales, ont donc pu être rejoués de la même manière sur le modèle animé.

5.4.1.3 Environnement virtuel

A cette étape, l'expérience s'est également déroulée dans la salle de réalité virtuelle Immersia présenté dans la précédente (Section 5.3.1.383).

5.4.1.4 Tâche

Dans cette étape, les sujets, dans un état émotionnel neutre, ont dû marcher le long d'une ligne droite de 8m avec l'humain virtuel (Figure 5.8). Ce dernier pouvait soit être dans un état neutre également, soit exprimer la joie, la colère ou la peur. De même que dans l'étape 1, nous avons étudié une situation de marche où l'émotion est symétrique : colère-colère. Chaque situation est répétée 20 fois (10 aller-retour) dans un ordre aléatoire, soit 100 essais (5 situations émotionnelles x 20 passages). Au début de chaque essai, l'expérimentateur précise au participant l'émotion du sujet ainsi que celle de l'humain virtuel.

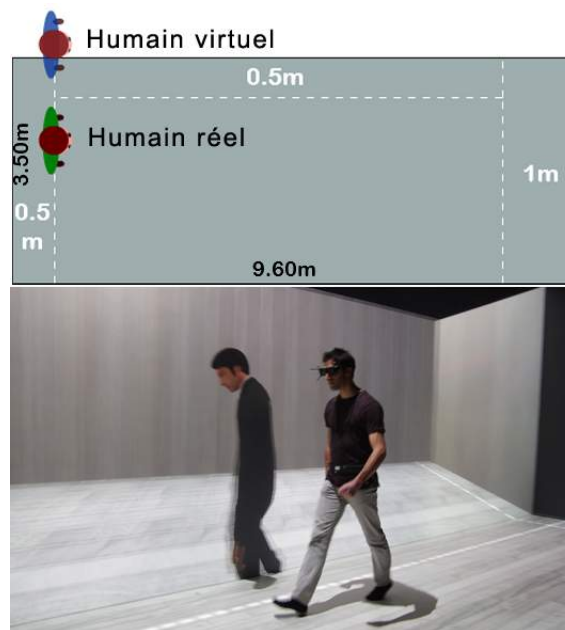


Figure 5.8 – Protocole expérimental de l'expérience de marche humain réel/humain virtuel. Les deux marcheurs démarrent du même côté du cave et doivent rejoindre l'autre bord.

5.4.1.5 Analyse

Les données cinématiques 3D sont capturées à l'aide du système de capture de mouvement ART synchronisé (60Hz). Chaque sujet est équipé d'une cible placée sur sa hanche permettant de connaître sa position. Ceci permet de calculer sa vitesse ainsi que l'angle entre lui et l'humain virtuel.

5.4.2 Résultats

Les émotions de l'humain virtuel ont influencé les paramètres cinématiques étudiés de la même manière que dans l'étape 1. En effet, comme on peut le constater dans la Figure 5.9, l'état émotionnel a eu une influence sur la vitesse du marcheur à l'état neutre ($\chi^2(21, 3) = 59.11, p < 0.001$). Ainsi, par rapport à l'état neutre ($V = 1.09m.s^{-1} \pm 0.03$), la vitesse est plus élevée lorsque l'humain virtuel joue la colère ($V = 1.31m.s^{-1} \pm 0.13, Z = -4.015, p < 0.001$) ou la joie ($V = 1.26m.s^{-1} \pm 0.1, Z = -4.015, p < 0.001$) et plus lente lorsqu'il joue

la peur ($V = 0.85m.s^{-1} \pm 0.06, Z = -4.015, p < 0.001$). Lorsque les deux marcheurs sont en colère, la vitesse du marcheur réel est également plus grande ($V = 1.5m.s^{-1} \pm 0.1$) comparée à l'état neutre ($p < 0.001$).

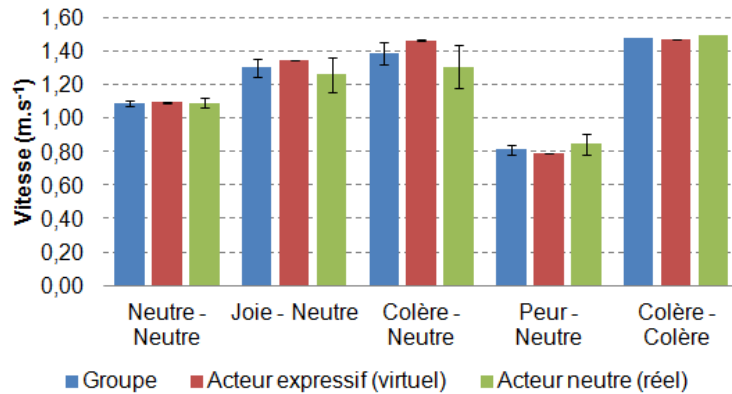


Figure 5.9 – Vitesses de marche moyennes du groupe (bleu), de l’humain virtuel (rouge) et du sujet (vert).

L’état émotionnel de l’humain virtuel a également influencé la position relative entre l’humain virtuel et le sujet (Figure 5.10), et ce, aussi bien au niveau de la distance interpersonnelle ($\chi^2(21, 3) = 48.14, p < 0.001$) qu’au niveau de l’angle entre eux ($\chi^2(21, 3) = 63, p < 0.001$). La distance est plus grande par rapport à l’état neutre ($d = 0.96m \pm 0.12$) dans les cas de colère ($d = 1.33m \pm 0.27, Z = -4.015, p < 0.001$), de joie ($d = 1.19m \pm 0.24, Z = -4.015, p < 0.001$) ainsi que de peur ($d = 1.13m \pm 0.16, Z = -4.015, p < 0.001$). Les comparaisons par paires n’ont pas révélé de différence significative entre la colère, la joie et la peur. Dans le cas de la colère symétrique, la distance est également plus grande ($d = 1.03m \pm 0.17$) comparé à l’état neutre-neutre ($p < 0.001$).

Contrairement à la situation neutre-neutre où les deux marcheurs marche côte à côte ($a_{neutre} = -2.80^\circ \pm 11.05$), lorsque le marcheur virtuel exprime la colère ou la joie, le marcheur réel neutre marche à l’arrière du groupe ($a_{colère} = -40.31^\circ \pm 11.84, Z = -4.014, p < 0.001; a_{joie} = -32.52^\circ \pm 13.16, Z = -4.015, p < 0.001$). Inversement, lorsque l’humain virtuel exprime la peur, le marcheur réel marche à l’avant du groupe ($a_{peur} = 26.71^\circ \pm 9.35, Z = -4.015, p < 0.001$). Bien que les valeurs indiquent une différence entre la joie et la colère, l’analyse statistique n’a reporté aucune différence significative entre elles. De même, dans le cas de la colère symétrique, les marcheurs semblent de nouveau marcher côte à côte ($a = -1.10^\circ \pm 18.41$) de la même manière que dans l’état neutre-neutre ($p = 0.404$).

5.5 Discussion

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en avant l’influence des émotions sur la cinématique de l’interaction entre deux marcheurs ainsi que l’émergence d’un comportement de type meneur-suiveur lors d’interactions asymétriques. Dans ce chapitre, nous avons tout d’abord confirmé ces résultats grâce à l’étape 1 de notre expérience. Ensuite, nous

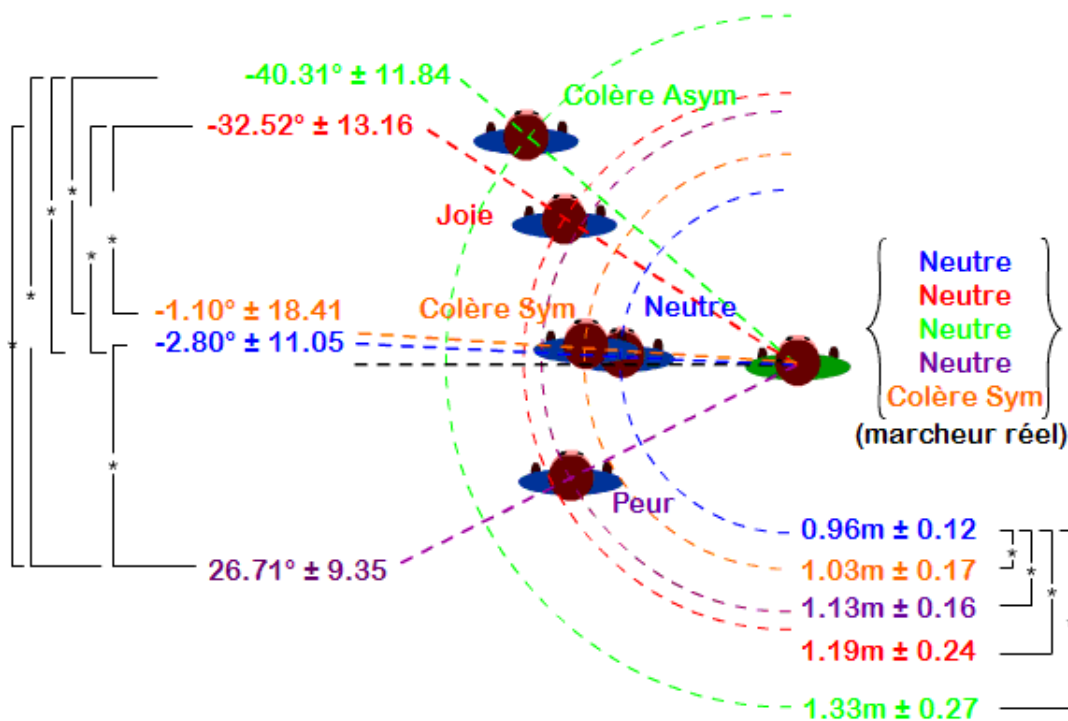


Figure 5.10 – Position relatives moyennes (distance interpersonnelle et angle) entre le sujet et l'humain virtuel. Le marcheur bleu représente l'humain virtuel jouant une émotion, le vert, le sujet.

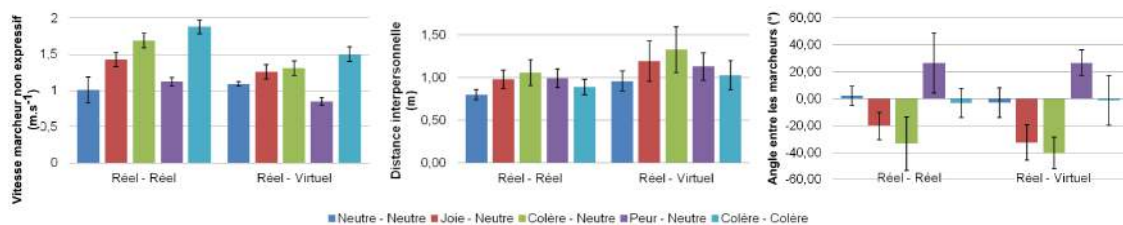


Figure 5.11 – Comparaisons entre les situations réel-réel et réel-virtuel des a) vitesses du marcheur non expressif, b) de la distance interpersonnelle et c) de l'angle entre les marcheurs.

montrons que l'influence des émotions sur la cinématique des interactions entre un marcheur réel et un marcheur virtuel est similaire à celle observée dans la situation de deux marcheurs réels.

La principale contribution de ce chapitre concerne la mise en avant d'une similarité des comportements dans les situations réel-réel et réel-virtuel.

Dans un premier temps, l'analyse cinématique des données de marche en ligne droite de deux acteurs réels a permis de confirmer les observations du chapitre précédent (Section 4). Comme nous nous y attendions, l'état émotionnel des acteurs a influencé la cinématique de la marche de ces deux acteurs. Dans les cas de la colère et de la joie, la vitesse du groupe est plus rapide que dans l'état neutre et elle est plus lente dans le cas de la peur. L'analyse cinématique a également révélé que les acteurs se sont positionnés différemment selon leur état émotionnel. Dans le chapitre précédent, nous avons vu qu'un comportement de type meneur-suiveur émerge lorsque la situation émotionnelle est asymétrique. Ce phénomène

a également été observé dans la première étape de cette expérience. Ici aussi, lorsque l'un des acteurs joue la colère, il se place à l'avant du groupe. Il se place également à l'avant lorsqu'il joue la joie. En se plaçant dans le cadre d'un modèle des émotions dimensionnel et d'états émotionnels asymétriques, ces observations nous laissent penser qu'il peut y avoir une relation entre le niveau d'activation de l'émotion (axe vertical du circumplex de Russel [PRP05]) et la position relative entre les marcheurs. En effet, Russel définit les émotions comme étant la résultante de deux composantes : la valence (caractère plaisant ou non de l'émotion) et l'activation (niveau d'intensité de l'émotion). Ainsi, selon cette hypothèse et en suivant l'axe d'activation du circumplex (Figure 5.12), les distances interpersonnelles devraient être réparties selon l'ordre suivant : joie, peur, colère. Ceci correspond à l'ordre observé lors de l'étape 1. Dans un futur travail, il pourrait être intéressant de sélectionner un certain nombre d'émotions le long de l'axe d'activation du circumplex de Russel et de vérifier si cette hypothèse se confirme.

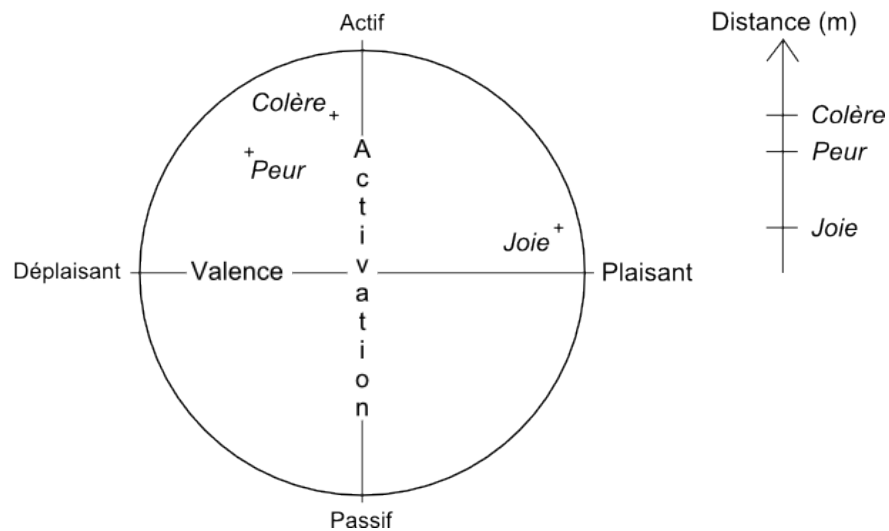


Figure 5.12 – Circumplex de Russel adapté de [PRP05]. Notre expérience semble montrer une relation entre la distance interpersonnelle et l'activation des émotions (joie, peur et colère).

Dans la deuxième étape de notre expérience, nous avons utilisé les données de l'étape précédente pour animer un humain virtuel. Cette étape a permis, d'une part, de valider le jeu de données construit à l'étape précédente et d'autre part, de vérifier que les sujets de l'expérience reconnaissent les émotions jouées par l'humain virtuel. Le taux de reconnaissance toute émotion confondue a été de 82% indiquant que les sujets reconnaissent très bien l'émotion de l'humain virtuel et donc que la cinématique de la marche de ce dernier semble crédible aux sujets. A partir de ces résultats, nous pouvons faire l'hypothèse que les interactions entre l'humain virtuel et les sujets doivent être conformes à la réalité.

Nous avons vérifié cette hypothèse grâce à l'étape 3 de notre expérience. Dans cette étape, les sujets ont marché de manière neutre ou en colère avec l'humain virtuel qui peut

exprimer la joie, la colère, la peur ou rester neutre. Tout d’abord, au niveau des vitesses, bien que légèrement réduites, nous avons observé les mêmes variations en fonction des émotions. La marche est plus rapide lorsque l’humain virtuel exprime la joie ou la colère et plus lente lorsqu’il exprime la peur. De même, lorsque les deux marcheurs expriment la colère, la marche est également plus rapide. Le fait que la vitesse soit plus lente à l’intérieur du cave pourrait être expliqué par la présence des écrans près des sujets. Dans son étude, Fink et al. [FFW07] observaient déjà une réduction de la vitesse à l’intérieur d’un environnement virtuel. Concernant la distance interpersonnelle, les variations observées en fonction des émotions correspondent également à celles observées lors de la première étape. On remarque cependant qu’en moyenne, les distances sont plus grandes dans le cave que lors de l’étape 1. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cela. Tout d’abord, les distances sont perçues comme plus petites en réalité virtuelle [LMSB95, LK03]. Ceci peut entraîner une augmentation de la distance interpersonnelle pour maintenir une zone de confort entre les sujets et leur environnement (marcheur virtuel inclus). La présence des écrans peut également obliger les sujets à maintenir une distance de sécurité afin d’éviter toute collision. L’existence d’un espace personnel et de sa modulation ont déjà été décrites dans la littérature [BBBL03]. Nos résultats rejoignent également les conclusions de Gérin-Lajoie dans le cadre d’une tâche de marche [GLRFM08]. Les auteurs y montrent que lorsqu’ils marchent dans un environnement virtuel, la forme de l’espace personnel des marcheurs est préservée de la même manière comparé à une situation réelle mais que sa taille augmente.

Néanmoins, malgré des différences de grandeurs pour la vitesse et la distance interpersonnelle, on observe que les émotions affectent les paramètres cinématiques de l’interaction de la même manière que dans l’étape 1. Le marcheur virtuel expressif et le sujet réel semblent développer les caractéristiques d’une interaction de type meneur-suiveur comme on l’a observé dans le chapitre précédent. Le marcheur expressif semblant diriger le groupe. On notera que l’animation des stimuli est basée sur l’animation d’un seul acteur. Il pourrait être intéressant d’agrandir la base de données de mouvements expressifs afin de créer une plus grande variété de stimuli. Ceci permettrait de vérifier si la perception des émotions ainsi que l’interaction avec l’humain virtuel reste les mêmes.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à l’étude des interactions entre un humain virtuel et un humain réel. Pour cela, nous avons mené une expérience en trois étapes. Dans la première étape, nous avons d’abord demandé à deux humains réels de marcher le long d’une ligne droite en fonction de différentes émotions. Ceci nous a permis de réaliser une première analyse cinématique de l’interaction entre les deux marcheurs ainsi que de constituer une base de données de mouvements expressifs. Grâce à cette base de données, nous avons animé un humain virtuel afin qu’il puisse marcher de manière expressive. Seul le corps de l’humain virtuel est animé et il ne possède pas d’expressions faciales susceptible de fournir une indication quant à l’émotion exprimée. Dans la deuxième étape, nous avons validé

notre jeu de données grâce à une étude en perception. Nous avons présenté les différents stimuli à des sujets afin de s'assurer que des sujets réels sont capables de reconnaître l'émotion exprimée par l'humain virtuel au travers de sa marche. La validation de cette étape nous a permis de passer à la dernière étape de l'expérience concernant l'interaction entre humains réel et virtuel. L'objectif est de vérifier que des marcheurs réels réagissent et interagissent avec l'humain virtuel comme il le font avec un humain réel.

La principale contribution de chapitre concerne donc la mise en évidence que des sujets réels réagissent avec un humain virtuel comme il l'aurait fait lors d'interactions avec d'autres humains réels. Ceci est un résultat prometteur puisque l'humain virtuel est suffisamment expressif pour permettre des interactions naturelles avec le sujet réel. Il faut rappeler que l'humain virtuel n'exprime les émotions qu'au travers des mouvements de son corps sans prise en compte des expressions faciales qui sont généralement utilisées dans ce genre d'expérience.

Au vu de ces résultats, on peut considérer deux directions pour des travaux futurs. Tout d'abord, nous pourrions développer de nouveaux paradigmes pour l'évaluation de techniques d'animation. Dans notre étude, notre humain virtuel est animé grâce à l'utilisation de données provenant de la capture de mouvement. Il pourrait être intéressant d'animer l'humain virtuel par le moyen d'autres techniques capable de simuler des marches expressives. Il suffirait alors de réaliser une expérience similaire à la notre pour valider l'expressivité des animations.

Ensuite, cette étude pose les bases d'une plateforme technique permettant l'étude des interactions. Elle offre la possibilité de contrôler complètement le mouvement d'humains virtuels ainsi que les interactions avec des sujets réels. En général, dans les expériences entre humains réels, il est difficile de contrôler ou de standardiser les paramètres de l'interaction (position relative, vitesse, orientation). Notre plateforme pourrait être utilisée pour développer une plateforme de recherche permettant de remédier à cette difficulté et permettant ainsi l'étude du mouvement humain dans des situations standardisées et contrôlées. Par exemple, de nombreuses interactions ayant lieu pendant la marche pourraient être étudiées comme l'évitement, le fait de se suivre, la marche en groupe, etc. Nous pourrions l'utiliser pour étudier en détail les effets des paramètres cinématiques aussi bien que sociaux ou psychologiques.

Enfin, dans cette étude, nous sommes dans une situation unilatérale dans le sens où seul le sujet réel adapte son mouvement en fonction de celui de l'humain virtuel. A l'avenir, il faudrait permettre une interaction complète entre les deux marcheurs où l'un et l'autre peuvent s'adapter au mouvement de l'autre. Cette étape serait nécessaire pour pouvoir utiliser notre plateforme dans le but d'étudier le mouvement humain.

Conclusion

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'influence des émotions dans les interactions entre humains réels et comment on pouvait étendre ces observations pour l'interaction entre humains réels et virtuels. Dans un premier temps, nous avons proposé un nouveau protocole expérimental permettant l'étude de l'influence des émotions sur une marche non contrainte. Nous avons validé ce protocole par une expérience en perception et une analyse cinématique comparative. Dans un deuxième temps, nous avons étudié l'influence des émotions sur les interactions entre deux humains réels dans le cadre d'une marche non contrainte. Enfin, dans une dernière partie, nous avons étudié l'influence des émotions sur les interactions entre humains réel et virtuel. Dans cette conclusion, nous faisons un rappel des contributions apportées dans cette thèse puis nous discutons des perspectives qu'ouvrent ce travail.

Rappel des contributions

Conception et validation du protocole expérimental

Dans la première partie de cette thèse, nous avons proposé un nouveau protocole expérimental permettant l'étude de l'influence des émotions sur une marche non contrainte. En effet, jusqu'à présent, les travaux portant sur l'étude de la marche expressive se limitaient à l'étude de trajectoires en ligne droite [CG07, GCF12, KBH09, ROCG09]. Dans cette thèse, nous partons du postulat que l'étude d'interactions entre marcheurs expressifs nécessite d'être réalisée dans un contexte non contraint afin de permettre les interactions les plus naturelles possibles. Nous avons ainsi mis en place un protocole expérimental basé sur l'analyse du mouvement d'acteurs effectuant des tâches de marche expressive.

Deux situations différentes de marche expressive ont été enregistrées : la marche seul et la marche en groupe. Dans le cas de la marche en groupe, les acteurs ont eu pour unique consigne de marcher ensemble. Quatre états émotionnels ont été étudiés pour la marche seul : neutre, joie, colère et peur. Ces émotions font partie des émotions de base définies par Ekman [EO79].

Une fois la campagne expérimentale terminée, nous avons voulu nous assurer de deux choses. Tout d'abord, nous avons mené une étude en perception afin de valider le jeu des acteurs. Pour cela, nous avons créé des animations d'humains virtuels expressifs à partir des données capturées. Vingt sujets ont eu à déterminer l'émotion du ou des marcheurs virtuels.

Les résultats ont montré que les participants reconnaissent bien l'émotion d'un marcheur seul ou de deux marcheurs ayant la même émotion. Cependant, dans le cas où les deux marcheurs n'expriment pas la même émotion, le taux de reconnaissance de la colère chute quasiment au niveau de la borne supérieure de l'intervalle de hasard. Ceci semble indiquer que les émotions influencent bien les interactions entre les marcheurs.

Ensuite, nous avons réalisé une analyse cinématique de la marche seul. Les résultats obtenus sont cohérents avec la littérature : comparé à un état neutre, la marche est plus rapide et plus saccadée et elle est accompagnée de mouvements plus amples dans les cas de la joie et de la colère ; elle est plus lente, moins saccadée et accompagnée de mouvements moins amples dans le cas de la peur.

Grâce à cette étude, nous avons montré que l'utilisation de trajectoires non contraintes garantit une bonne reconnaissance des émotions ainsi qu'une influence des émotions similaires à celle que l'on retrouve dans le cas de trajectoires en ligne droite. De plus, elles autorisent aux marcheurs une plus grande liberté de mouvement et par conséquent, doivent permettre des interactions plus réalistes.

Interactions entre deux marcheurs

Dans la troisième partie de cette thèse, nous avons étudié l'influence des émotions sur les interactions entre deux marcheurs en groupe. Pour cela, nous avons procédé à l'analyse cinématique de paramètres individuels tels que la vitesse de marche et le jerk ainsi qu'aux paramètres de groupe comme le placement entre les marcheurs. Nous avons également étudié l'émergence de phénomène de synchronisation.

Le résultat le plus intéressant que nous avons pu observer concerne la synchronisation (ou non) entre les marcheurs et l'hypothèse de l'émergence d'un mécanisme de meneur-suiveur entre les marcheurs. En effet, alors que les acteurs ne se sont vu attribuer aucun rôle prédéfini, les résultats ont montré que dans des situations émotionnelles asymétriques (situation dans laquelle les deux acteurs n'ont pas la même émotion), ces derniers semblaient prendre le rôle de meneur ou de suiveur dans le groupe. Par exemple, lorsqu'un des acteurs exprime la colère et que l'autre reste dans un état neutre, l'acteur exprimant la colère a alors tendance à se placer en tête du groupe et à mener son mouvement. Inversement, lorsqu'un des acteurs exprime la peur et que l'autre est dans un état neutre, l'acteur ayant peur se met à suivre le mouvement du groupe. Ce phénomène n'est pas apparu dans les situations émotionnelles symétriques laissant supposée que l'effet des émotions est comme compensé.

Le deuxième résultat intéressant de cette partie concerne la multimodalité de l'effet des émotions. En effet, l'étude des paramètres d'une émotion comme la transitivité ou le dialogue a montré que ces derniers modulent l'effet des émotions sur la cinématique de l'interaction. Par exemple, nous avons observé une meilleure synchronisation entre les marcheurs lorsque l'émotion exprimée est transitive ou lorsque ceux-ci peuvent parler.

Interactions entre humains réels et virtuels

Dans la dernière partie de cette thèse, nous avons présenté une expérience en trois étapes permettant d'étudier les interactions entre un humain réel et un humain virtuel. Dans la première étape, deux humains réels ont marché ensemble le long d'une ligne droite. Le protocole devant être identique dans la situation réel-réel et la situation réel-virtuel, nous avons dû contraindre les trajectoires des marcheurs aux dimensions de la salle immersive. Les données recueillies lors de cette expérience ont donné lieu à une première analyse cinématique et ont permis d'animer un humain virtuel expressif. Dans la deuxième étape, nous avons mené une étude en perception afin de vérifier que les émotions exprimées par l'humain virtuel soient bien reconnues par des sujets réels. Enfin, dans la troisième étape, nous avons fait marcher des sujets réels avec l'humain virtuel le long d'une ligne droite. Nous avons alors réalisé une deuxième analyse cinématique que nous avons comparé à la première.

Les résultats ont montré que, comparés aux comportements observés entre deux marcheurs réels, les sujets réels ont réagi avec l'humain virtuel de la même manière. Ceci est très prometteur puisque l'humain virtuel que nous avons animé était suffisamment expressif pour permettre des interactions naturelles avec le sujet réel.

Perspectives

Émotions étudiées

Dans cette thèse, nous avons considéré un nombre limité d'émotions. Ces émotions, couramment utilisées dans les études du genre, nous ont permis d'apporter plusieurs nuances notamment la transitivité et le dialogue. Bien que nous ayons observé l'émergence d'un comportement de synchronisation entre les marcheurs, il serait intéressant d'étudier plus d'émotions pour voir si ce comportement persiste. De plus, comme nous l'avons remarqué lors de nos expériences, il semblerait exister un lien entre le placement entre les marcheurs et les dimensions du circumplex de Russel [PRP05]. Dès lors, nous pourrions prendre un jeu d'émotions réparties autour de ces axes et vérifier si un lien existe réellement.

Plateforme expérimentale

L'étude des interactions entre humains réel et virtuel a mené à la conception d'une plateforme technique permettant l'étude des interactions. Dans cette thèse, les stimuli utilisés ont été générés grâce à l'utilisation de données provenant de la capture de mouvement d'acteurs. D'autres solutions auraient pu être utilisées. Par exemple, des techniques d'animation procédurale multimodale comme celle présentée par Niewiadomski et al. [NHP11] pourraient être évaluées grâce à cette plateforme. De plus, nous n'avons utilisé que les mouvements du corps pour exprimer les émotions. Ni les expressions faciales, ni la voix

n'ont été pris en compte. Il pourrait être intéressant de les intégrer (que cela soit grâce à de la capture de mouvement ou de manière procédurale grâce à FACS par exemple) et d'étudier leurs effets sur les interactions humain réel/humain virtuel.

De même, dans cette thèse, nous nous sommes concentrés sur une tâche d'interaction relativement simple qui est la marche entre deux individus. Grâce à cette plateforme, d'autres interactions sont envisageables. Nous pourrions par exemple étudier comment on se comporte lorsque l'on marche dans une foule expressive. Nous pourrions aussi étudier des interactions telles que l'évitement, le croisement entre piétons, etc.

Humains virtuels expressifs et réactifs

Une des limitations de notre étude sur l'interaction entre un humain virtuel et un humain réel porte sur le fait que l'interaction était unidirectionnelle. En effet, lors de l'expérience, nous n'avons réalisé aucune analyse en temps réel du mouvement des sujets. Or, pour que l'interaction soit réellement conforme à la réalité, il faudrait que l'humain virtuel puisse réagir en fonction du comportement du sujet. D'une part, ceci permettrait à l'humain virtuel d'attendre le sujet lorsque celui-ci prend du retard par exemple. D'autre part, cela nous permettrait de pouvoir étudier les situations où le sujet est expressif et l'humain virtuel neutre.

Environnement d'interaction

Lors de l'étude de l'interaction entre deux marcheurs réels, les trajectoires des acteurs n'étaient pas contraintes. Cependant, elles l'étaient par la zone de capture (un cercle de 8m). Une solution qui pourrait être envisagée pour obtenir un environnement expérimental plus écologique serait de travailler dans un environnement extérieur tel qu'une rue et d'utiliser une combinaison de capture de mouvement sans fil comme celle de la société Xsens (Figure 5.13 gauche). Ce système a cependant des limites en terme de portée (50m) et de quantité d'informations capturées (seulement 17 traqueurs inertiels). Pour ce qui est de l'interaction avec un humain virtuel, la configuration du cave (bien que déjà très imposant) a limité notre expérience à une marche en ligne droite. Des technologies comme le casque de réalité virtuelle Oculus Rift (Figure 5.13 droite) pourrait permettre de palier cette limite dans le cadre de la marche.



Figure 5.13 – A gauche : Combinaison de capture de mouvement sans caméra et sans fil MVN Awina (©Xsens). A droite : casque de réalité virtuelle Oculus Rift (©Oculus VR).

Publications relatives à ces travaux

Publications parues

- [POD+11] Perrinet, J., Olivier, A. H., Donikian, S., & Pettre, J. (2011). Effets des émotions sur l'interaction physique entre humains dans des tâches de locomotion. AFIG 2011.
- [OPP12] Olivier, A. H., Perrinet, J., & Pettré, J. (2012). Emotional influences on the kinematics of interactions between two walkers : preliminary results on angeriness. In *International Society for Posture and Gait Research*.
- [POP13] Perrinet, J., Olivier, A. H., & Pettré, J. (2013, August). Walk with me : interactions in emotional walking situations, a pilot study. In *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception* (pp. 59-66). ACM.

Bibliographie

- [Aie87] John R Aiello. Human spatial behavior. *Handbook of environmental psychology*, 1 :389–504, 1987. [20](#)
- [ANM⁺11] Kaat Alaerts, Evelien Nackaerts, Pieter Meyns, Stephan P Swinnen, and Nicole Wenderoth. Action and emotion recognition from point light displays : an investigation of gender differences. *PloS one*, 6(6) :e20989, 2011. [14](#)
- [Arg13] Michael Argyle. *Bodily communication*. Routledge, 2013. [70](#)
- [ASIO3] MISAKO SAW ADA, Kazuhiro Suda, and Motonobu Ishii. Expression of emotions in dance : Relation between arm movement characteristics and emotion. *Perceptual and motor skills*, 97(3) :697–708, 2003. [16](#)
- [ATD07] Anthony P Atkinson, Mary L Tunstall, and Winand H Dittrich. Evidence for distinct contributions of form and motion information to the recognition of emotions from body gestures. *Cognition*, 104(1) :59–72, 2007. [13](#), [14](#), [15](#)
- [Bal91] Shyngle K Balogun. Personal space as affected by religions of the approaching and the approached people. *Indian Journal of Behaviour*, 1991. [20](#)
- [BBBL03] Jeremy N Bailenson, Jim Blascovich, Andrew C Beall, and Jack M Loomis. Interpersonal distance in immersive virtual environments. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 29(7) :819–833, 2003. [85](#)
- [BCET76] Billy A Barrios, L Claire Corbitt, J Philip Estes, and Jeff S Topping. Effect of a social stigma on interpersonal distance. *The Psychological Record*, 1976. [20](#)
- [Ber10] Daniel Bernhardt. Emotion inference from human body motion. *University of Cambridge, Computer Laboratory, Technical Report, (UCAM-CL-TR-787)*, 2010. [10](#)
- [BOG⁺13] Avi Barliya, Lars Omlor, Martin A Giese, Alain Berthoz, and Tamar Flash. Expression of emotion in the kinematics of locomotion. *Experimental Brain Research*, 225(2) :159–176, 2013. [14](#)
- [BSBC08] Cristina Becchio, Luisa Sartori, Maria Bulgheroni, and Umberto Castiello. The case of dr. jekyll and mr. hyde : a kinematic study on social intention. *Consciousness and cognition*, 17(3) :557–564, 2008. [3](#), [18](#)

- [BSHKS11] Dimitri J Bayle, Benjamin Schoendorff, Marie-Anne Hénaff, and Pierre Krolak-Salmon. Emotional facial expression detection in the peripheral visual field. *PloS one*, 6(6) :e21584, 2011. [13](#)
- [CG07] Elizabeth Crane and Melissa Gross. Motion capture and emotion : Affect detection in whole body movement. In *Affective computing and intelligent interaction*, pages 95–101. Springer, 2007. [14](#), [36](#), [40](#), [59](#), [68](#), [87](#)
- [CMHS06] Arieta Chouchourelou, Toshihiko Matsuka, Kent Harber, and Maggie Shiffrar. The visual analysis of emotional actions. *Social Neuroscience*, 1(1) :63–74, 2006. [14](#)
- [Coo70] Mark Cook. Experiments on orientation and proxemics. *Human Relations*, 23(1) :61–76, 1970. [70](#)
- [Cos10] Marco Costa. Interpersonal distances in group walking. *Journal of Nonverbal Behavior*, 34(1) :15–26, 2010. [5](#), [19](#), [20](#), [28](#)
- [Cou04] Mark Coulson. Attributing emotion to static body postures : Recognition accuracy, confusions, and viewpoint dependence. *Journal of nonverbal behavior*, 28(2) :117–139, 2004. [14](#), [15](#)
- [CS03] Grégoire Courtine and Marco Schieppati. Human walking along a curved path. i. body trajectory, segment orientation and the effect of vision. *European Journal of Neuroscience*, 18(1) :177–190, 2003. [60](#)
- [Dar72] Charles Darwin. 1965. the expression of the emotions in man and animals. *London, UK : John Marry*, 1872. [10](#), [12](#), [13](#)
- [DBL⁺12] Alessandro D’Ausilio, Leonardo Badino, Yi Li, Sera Tokay, Laila Craighero, Rosario Canto, Yiannis Aloimonos, and Luciano Fadiga. Leadership in orchestra emerges from the causal relationships of movement kinematics. *PLoS ONE*, 7(5) :e35757, May 2012. [69](#), [70](#)
- [DF07] Sofia Dahl and Anders Friberg. Visual perception of expressiveness in musicians’ body movements. *Music Perception : An Interdisciplinary Journal*, 24(5) :433–454, 2007. [15](#)
- [dG09] Beatrice de Gelder. Why bodies? twelve reasons for including bodily expressions in affective neuroscience. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 364(1535) :3475–3484, November 2009. [13](#), [29](#), [36](#)
- [DM89] Marco De Meijer. The contribution of general features of body movement to the attribution of emotions. *Journal of Nonverbal behavior*, 13(4) :247–268, 1989. [15](#)

- [dMCG12] Celso M de Melo, Peter Carnevale, and Jonathan Gratch. The effect of virtual agents' emotion displays and appraisals on people's decision making in negotiation. In *Intelligent Virtual Agents*, pages 53–66. Springer, 2012. [3](#), [21](#), [22](#), [74](#)
- [DVKB05] Thomas Ducourant, Stéphane Vieilledent, Yves Kerlirzin, and Alain Berthoz. Timing and distance characteristics of interpersonal coordination during locomotion. *Neuroscience Letters*, 389(1) :6–11, November 2005. [20](#), [21](#), [69](#), [70](#)
- [E⁺92] Paul Ekman et al. Are there basic emotions. *Psychological review*, 99(3) :550–553, 1992. [29](#), [36](#), [71](#)
- [EE12] Cathy Ennis and Arjan Egges. Perception of complex emotional body language of a virtual character. In *Motion in Games*, pages 112–121. Springer, 2012. [23](#), [24](#)
- [EFH78] Paul Ekman, Wallace V Friesen, and Joseph C Hager. Facial action coding system (facs). *A technique for the measurement of facial action*. Consulting, Palo Alto, 1978. [22](#)
- [EFH02] Paul Ekman, Wallace V Friesen, and Joseph C Hager. *Facial action coding system*. A Human Face Salt Lake City, 2002. [11](#)
- [Ekm92] Paul Ekman. An argument for basic emotions. *Cognition and Emotion*, 6(3-4) :169–200, 1992. [9](#)
- [EO79] Paul Ekman and Harriet Oster. Facial expressions of emotion. *Annual review of psychology*, 30(1) :527–554, 1979. [11](#), [13](#), [87](#)
- [FC08] Nicolas Fusco and Armel Crétual. Instantaneous treadmill speed determination using subject's kinematic data. *Gait and posture*, 28(4) :663–667, 2008. [34](#)
- [FEC⁺13] Francesca Ferri, Sjoerd JH Ebisch, Marcello Costantini, Anatolia Salone, Giampiero Arciero, Viridiana Mazzola, Filippo Maria Ferro, Gian Luca Romani, and Vittorio Gallese. Binding action and emotion in social understanding. *PloS one*, 8(1) :e54091, 2013. [18](#)
- [FFW07] Philip W Fink, Patrick S Foo, and William H Warren. Obstacle avoidance during walking in real and virtual environments. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 4(1) :2, 2007. [85](#)
- [FMH04] Marc Fabri, David Moore, and Dave Hobbs. Mediating the expression of emotion in educational collaborative virtual environments : an experimental study. *Virtual reality*, 7(2) :66–81, 2004. [v](#), [21](#), [22](#), [23](#), [73](#)

- [FSG⁺10] Francesca Ferri, Ivilin Peev Stoianov, Claudia Gianelli, Luigi D’Amico, Anna M Borghi, and Vittorio Gallese. When action meets emotions : how facial displays of emotion influence goal-related behavior. *PloS one*, 5(10) :e13126, 2010. [3](#), [18](#), [73](#)
- [GCF10] M Melissa Gross, Elizabeth A Crane, and Barbara L Fredrickson. Methodology for assessing bodily expression of emotion. *Journal of Nonverbal Behavior*, 34(4) :223–248, 2010. [15](#)
- [GCF12] M Melissa Gross, Elizabeth A Crane, and Barbara L Fredrickson. Effort-shape and kinematic assessment of bodily expression of emotion during gait. *Human movement science*, 31(1) :202–221, 2012. [16](#), [17](#), [36](#), [59](#), [68](#), [87](#)
- [GDC⁺11] Donald Glowinski, Nele Dael, Antonio Camurri, Gualtiero Volpe, Marcello Mortillaro, and Klaus Scherer. Toward a minimal representation of affective gestures. *Affective Computing, IEEE Transactions on*, 2(2) :106–118, 2011. [15](#)
- [GLRFM08] Martin Gérin-Lajoie, Carol L Richards, Joyce Fung, and Bradford J McFadyen. Characteristics of personal space during obstacle circumvention in physical and virtual environments. *Gait & posture*, 27(2) :239–247, 2008. [85](#)
- [GVCP⁺99] Anthony Guye-Vuillème, Tolga K Capin, S Pandzic, N Magnenat Thalmann, and Daniel Thalmann. Nonverbal communication interface for collaborative virtual environments. *Virtual Reality*, 4(1) :49–59, 1999. [73](#)
- [HdG03] Nouchine Hadjikhani and Beatrice de Gelder. Seeing fearful body expressions activates the fusiform cortex and amygdala. *Current Biology*, 13(24) :2201–2205, 2003. [12](#)
- [HH69] Edward Twitchell Hall and Edward T Hall. *The hidden dimension*. Anchor Books New York, 1969. [20](#), [71](#)
- [Iza71] Carroll E Izard. *The face of emotion*. 1971. [13](#)
- [KBB12] Andrea Kleinsmith and Nadia Bianchi-Berthouze. Affective body expression perception and recognition : A survey. *IEEE Transactions on Affective Computing*, pages 1–1, 2012. [12](#), [14](#), [15](#)
- [KBH09] Hideki Kadone, Alain Berthoz, and Halim Hicheur. Kinematic cues underlying expression and perception of emotion in human gait. In *BOOK OF ABSTRACTS*, page 8. Citeseer, 2009. [14](#), [16](#), [36](#), [59](#), [60](#), [68](#), [87](#)
- [KE99] Naz Kaya and Feyzan Erkip. Invasion of personal space under the condition of short-term crowding : A case study on an automatic teller machine. *Journal of Environmental Psychology*, 19(2) :183–189, 1999. [20](#)

-
- [Kna12] Mark L Knapp. *Nonverbal communication in human interaction*. Cengage Learning, 2012. [70](#)
- [KWJ85] Chris Kirtley, Michael W Whittle, and RJ Jefferson. Influence of walking speed on gait parameters. *Journal of Biomedical Engineering*, 7(4) :282–288, 1985. [36](#)
- [Lew95] JP Lewis. Fast normalized cross-correlation. In *Vision interface*, volume 10, pages 120–123, 1995. [63](#)
- [LK03] Jack Loomis and Joshua Knapp. Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments. 2003. [85](#)
- [LMSB95] Donald R Lampton, Daniel P McDonald, Michael Singer, and James P Bliss. Distance estimation in virtual environments. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 39, pages 1268–1272. SAGE Publications, 1995. [85](#)
- [LS67] Dale F Lott and Robert Sommer. Seating arrangements and status. *Journal of Personality and Social Psychology*, 7(1p1) :90, 1967. [20](#)
- [Lum08] Olivier Luminet. *Psychologie des émotions : confrontation et évitement*. De Boeck Supérieur, 2008. [9](#)
- [MGC87] Joann M Montepare, Sabra B Goldstein, and Annmarie Clausen. The identification of emotions from gait information. *Journal of Nonverbal Behavior*, 11(1) :33–42, 1987. [2](#), [14](#), [16](#)
- [MJM⁺08] Rachel McDonnell, Sophie Jörg, Joanna McHugh, Fiona Newell, and Carol O’Sullivan. Evaluating the emotional content of human motions on real and virtual characters. In *Proceedings of the 5th symposium on Applied perception in graphics and visualization*, pages 67–74. ACM, 2008. [14](#)
- [MRL08] Scott W McQuiggan, Jonathan P Rowe, and James C Lester. The effects of empathetic virtual characters on presence in narrative-centered learning environments. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1511–1520. ACM, 2008. [3](#), [21](#), [22](#)
- [MRS09] Kerry L Marsh, Michael J Richardson, and RC Schmidt. Social connection through joint action and interpersonal coordination. *Topics in Cognitive Science*, 1(2) :320–339, 2009. [18](#)
- [MT81] Masahiro Mori and Charles S Terry. *The Buddha in the robot*. Kosei Publishing Company, 1981. [22](#)

- [NG09] Jeff A Nessler and Sara J Gilliland. Interpersonal synchronization during side by side treadmill walking is influenced by leg length differential and altered sensory feedback. *Human movement science*, 28(6) :772–785, 2009. [19](#)
- [NHJ⁺11] Kelly M Naugle, Chris J Hass, Jessica Joyner, Stephen A Coombes, and Christopher M Janelle. Emotional state affects the initiation of forward gait. *Emotion*, 11(2) :267, 2011. [17](#)
- [NHP11] Radoslaw Niewiadomski, Sylwia Julia Hyniewska, and Catherine Pelachaud. Constraint-based model for synthesis of multimodal sequential expressions of emotions. *Affective Computing, IEEE Transactions on*, 2(3) :134–146, 2011. [23](#), [25](#), [73](#), [89](#)
- [OMCP12] Anne-Hélène Olivier, Antoine Marin, Armel Crétual, and Julien Pettré. Minimal predicted distance : A common metric for collision avoidance during pairwise interactions between walkers. *Gait & Posture*, 36(3) :399–404, 2012. [71](#)
- [ONBP12] Magalie Ochs, Radoslaw Niewiadomski, Paul Brunet, and Catherine Pelachaud. Smiling virtual agent in social context. *Cognitive processing*, 13(2) :519–532, 2012. [22](#), [73](#)
- [Pel09] Catherine Pelachaud. Modelling multimodal expression of emotion in a virtual agent. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 364(1535) :3539–3548, 2009. [23](#), [73](#)
- [PPS01] Helena M Patterson, Frank E Pollick, and Anthony J Sanford. The role of velocity in affect discrimination. 2001. [16](#)
- [PRP05] Jonathan Posner, James A Russell, and Bradley S Peterson. The circumplex model of affect : An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology. *Development and psychopathology*, 17(03) :715–734, 2005. [vii](#), [11](#), [12](#), [84](#), [89](#)
- [RMS05] Michael J Richardson, Kerry L Marsh, and RC Schmidt. Effects of visual and verbal interaction on unintentional interpersonal coordination. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 31(1) :62, 2005. [18](#)
- [ROCG09] Claire L. Roether, Lars Omlor, Andrea Christensen, and Martin. A. Giese. Critical features for the perception of emotion from gait. *Journal of Vision*, 9(6) :15–15, June 2009. [14](#), [15](#), [16](#), [36](#), [40](#), [59](#), [68](#), [87](#)
- [SB10] Klaus R Scherer and Tanja Bänziger. On the use of actor portrayals in research on emotional expression. *Blueprint for affective computing : A sourcebook*, pages 166–176, 2010. [28](#)

- [Sch05] Klaus R. Scherer. What are emotions? and how can they be measured? *Social Science Information*, 44(4) :695–729, December 2005. [9](#)
- [SCP⁺12] Lucia Maria Sacheli, Matteo Candidi, Enea Francesco Pavone, Emmanuele Tidoni, and Salvatore Maria Aglioti. And yet they act together : interpersonal perception modulates visuo-motor interference and mutual adjustments during a joint-grasping task. *PloS one*, 7(11) :e50223, 2012. [3](#), [18](#), [71](#)
- [SFCM11] RC Schmidt, Paula Fitzpatrick, Robert Caron, and Joanna Mergeche. Understanding social motor coordination. *Human Movement Science*, 30(5) :834–845, 2011. [18](#)
- [SO97] RC Schmidt and Beth O’Brien. Evaluating the dynamics of unintended interpersonal coordination. *Ecological Psychology*, 9(3) :189–206, 1997. [18](#)
- [SR05] Karthi Selvarajah and Debbie Richards. The use of emotions to create believable agents in a virtual environment. In *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 13–20. ACM, 2005. [73](#)
- [SSGdG10] Charlotte B. A. Sinke, Bettina Sorger, Rainer Goebel, and Béatrice de Gelder. Tease or threat? judging social interactions from bodily expressions. *Neuroimage*, 49(2) :1717–1727, 2010. [18](#)
- [TCEG12] Nick Taubert, Andrea Christensen, Dominik Endres, and Martin A Giese. Online simulation of emotional interactive behaviors with hierarchical gaussian process dynamical models. In *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*, pages 25–32. ACM, 2012. [73](#)
- [Tem95] John Templer. *The staircase : Studies of hazards, falls, and safer design*. MIT Press, 1995. [19](#), [71](#)
- [Wal98] Harald G Wallbott. Bodily expression of emotion. *European journal of social psychology*, 28(6) :879–896, 1998. [14](#), [15](#)
- [WJ66] Frank N Willis Jr. Initial speaking distance as a function of the speakers’ relationship. *Psychonomic Science*, 1966. [20](#)
- [WPB93] Bonnie L Webber, Cary B Phillips, and Norman I Badler. Simulating humans : Computer graphics, animation, and control. *Center for Human Modeling and Simulation*, page 68, 1993. [20](#), [73](#)
- [WSC02] Marjorie Woollacott and Anne Shumway-Cook. Attention and the control of posture and gait : a review of an emerging area of research. *Gait & posture*, 16(1) :1–14, 2002. [72](#)

Abstract

With the growing of information technologies in all everyday life situations, interactions with virtual agents are now common. Furthermore, we know that people's emotions influence interactions between them. In this thesis, we consider the case of unconstrained and expressive walk to study the influence of emotions on interactions between two real walkers. Then, we focus on the interactions between a virtual expressive human and a real subject.

The first step of this work was to design and validate an experimental protocol allowing the analysis of unconstrained and expressive walks. Thus, we captured the motion of two actors walking alone and walking together. In the second part, we studied the data from the group walk situation and we highlighted the emergence of a leader-follower behavior between the walkers. We also showed that the characteristics of the emotions (eg dialogue) have an influence on this kind of synchronization. Last and not least, we studied the influence of emotions on interactions between a virtual human and a real one. We used a three-step process : creation and analysis of a database of expressive walks along a line between two walkers ; validation of the database through a perceptual study ; animation of a virtual human with the data from the database and analyze of the walk between real subjects and the virtual human. Results showed a strong similarity between the two situations.

Résumé

Avec l'expansion de l'informatique dans tous les domaines de la vie courante, les interactions avec des agents virtuels sont devenues courantes. Par ailleurs, nous savons que les émotions influencent les interactions entre individus. Dans cette thèse, nous nous plaçons dans le cas de la marche expressive non contrainte pour étudier, dans un premier temps, l'influence des émotions sur les interactions entre deux marcheurs réels. Puis, dans un deuxième temps, nous nous intéressons aux interactions entre un marcheur expressif virtuel et un sujet réel.

La première étape de ce travail a consisté à concevoir et valider un protocole expérimental permettant l'analyse de marches expressives non contraintes. Nous avons ainsi capturé les mouvements de deux acteurs dans des tâches de marche seul ou en groupe. Dans la deuxième partie de ce travail, nous avons étudié les données de marche en groupe afin de mettre en évidence l'émergence d'un comportement de synchronisation entre les marcheurs de type meneur-suiveur. Nous avons également montré que les caractéristiques des émotions (comme le dialogue par exemple) peuvent avoir une influence sur cette synchronisation. Enfin, dans la troisième et dernière partie de cette thèse, nous avons étudié l'influence des émotions sur les interactions entre un humain virtuel et un humain réel. Pour cela, nous avons adopté une démarche en trois étapes : conception et analyse d'une base de données de marches expressives entre deux acteurs réels en ligne droite ; validation de la base de données par une étude en perception ; animation d'un humain virtuel grâce aux données de la base de données puis analyse de la marche entre des sujets réels et l'humain virtuel. Les résultats obtenus ont montré une forte similarité entre les deux situations.