



**THÈSE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité

Informatique

École doctorale Informatique, Télécommunications et Électronique (Paris)

Présentée par

Sabrina Campano

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

**COR-E : un modèle pour la simulation d'agents
affectifs fondé sur la théorie COR**

soutenue le 06/06/2013

devant le jury composé de :

M. Nicolas SABOURET	Directeur de thèse
M. Vincent CORRUBLE	Co-encadrant
M ^{me} Lola CAÑAMERO	Rapporteur
M ^{me} Sylvie PESTY	Rapporteur
M ^{me} Amal EL FALLAH SEGHROUCHNI	Examinatrice
M ^{me} Domitile LOURDEAUX	Examinatrice
M. Maxime MORGE	Examinateur
M ^{me} Catherine PELACHAUD	Examinatrice
M. Etienne DE SEVIN	Invité

Laboratoire d'Informatique de Paris 6
4, place Jussieu
75 005 Paris

École doctorale Paris centre Case 188
4 place Jussieu
75 252 Paris cedex 05

Remerciements

Je remercie toutes les personnes qui m'ont soutenue pendant mes études et qui m'ont permis de décrocher le grade de docteur en informatique : mon directeur de thèse, mes encadrants, ma famille, mes amis, mes collègues, et mes professeurs. J'ai eu l'occasion de travailler sur un sujet passionnant dans une très bonne ambiance, avec un encadrement de grande qualité, et la machine à café n'est presque jamais tombée en panne. Les conditions idéales étaient réunies.

Grâce à mes encadrants, les retours de la communauté scientifique ont été de plus en plus positifs au fil de la thèse, et au cours de la troisième année j'ai obtenu un article accepté en format long dans une conférence internationale importante. C'est un joli résultat, que nous avons obtenu en équipe. Je suis très reconnaissante vis-à-vis de Nicolas, Vincent et Etienne, pour m'avoir formée à la recherche. Leur sympathie et leur sens de l'humour ont rendu l'atmosphère de travail très agréable.

Je remercie tous les membres de mon jury de thèse pour leur lecture attentive du manuscrit, pour leurs commentaires sur mon travail, pour les débats qu'ils ont ouverts pendant la soutenance, et pour leurs encouragements.

Je remercie aussi mes parents et mon petit-ami qui ont joué un grand rôle pendant toutes mes études, et qui sont maintenant soulagés qu'elles soient terminées. Merci à ma maman qui a installé mon premier ordinateur dans ma chambre, un 486, sur lequel on a fait des soirées formatage aux petits oignons.

Je remercie mes vaillants camarades de pause café et pause déjeuner avec lesquels j'ai vécu des moments riches en émotion (la touillette qui disparaît dans le trou, les plaquages inopinés, les chaises musicales) : Brice, notre testeur culinaire de l'extrême, Cyril, l'homme qui savait parler aux fauteuils confortables, Edouard, dont le talent d'artiste sur gobelet a épaté plus d'un pigeon, Etienne, mon représentant à l'étranger, Hazaël, notre animateur StarCraft II, Kenza, avec qui j'ai mis au point un protocole de communication crypté, Patrick, philosophe et chanteur traditionnel, et Quentin, le consensus à l'état pur. Je remercie également Amel, Cédric, Corentin, Costin, Feirouz, Kevin, Key, Lancelot, Shirley, Sara, Sylvain, Thomas, que je respecte trop pour écrire quoi que ce soit de compromettant sur eux. Bien sûr, pour certains, c'est une blague, mais avec un peu de chance ils ne liront jamais ce commentaire.

Je remercie les maîtres de conférence et professeurs de l'équipe Systèmes Multi-Agents du LIP6 pour leur sympathie, ainsi que les administrateurs et le personnel administratif pour les services qu'ils m'ont rendus.

Je remercie enfin les financeurs du projet Terra Dynamica qui m'ont permis de réaliser cette thèse, ainsi que les partenaires du projet qui ont donné le meilleur d'eux-mêmes pour sa réussite.

Résumé

Les émotions sont abondamment étudiées par les psychologues depuis plusieurs décennies (James, 1890; Darwin, 1874; Lazarus et Folkman, 1984), et les premières théories remontent à l'Antiquité. Elles sont principalement considérées comme un moyen d'adaptation, permettant à l'individu de réagir à un événement de façon appropriée. Ces réactions peuvent prendre la forme d'un comportement comme la fuite ou l'attaque (Cannon, 1920), d'une expression faciale comme le sourire (Ekman, 1999), ou d'une stratégie cognitive comme le déni (Lazarus, 1998). La simulation informatique des processus émotionnels permet d'améliorer la crédibilité des personnages virtuels, ou de tester des hypothèses psychologiques. Le domaine de l'Informatique Affective regroupe les travaux poursuivant ces objectifs.

La majorité des modèles existants en Informatique Affective utilisent des variables représentant des catégories d'émotion. Une autre classe de modèle cherche à simuler des comportements affectifs sans utiliser de catégories d'émotion, en adoptant une approche émergente (Pfeifer, 1994; Cañamero, 2005; Rank et Petta, 2007). Dans cette approche, les émotions ne sont pas simulées à l'intérieur du système, mais proviennent des interprétations qu'un observateur humain fait à propos des comportements des agents. Dans cette thèse nous proposons un modèle de simulation de comportements émotionnels appartenant à ce second type d'approche, fondé sur la théorie psychologique de la Conservation des Ressources (*COR theory*) de Hobfoll (1998).

Notre modèle, intitulé *COR-Engine* (COR-E), est basé sur le principe qu'un agent essaie d'acquérir ou de protéger des ressources lorsqu'elles sont respectivement désirées ou menacées. Une ressource peut représenter des éléments variés, comme la « réputation » d'un agent ou une « voiture ». Un comportement peut avoir à la fois des effets positifs (acquisition ou protection) et négatifs (menace ou perte) sur des ressources. Chaque agent a des préférences individuelles sur les ressources de l'environnement, qui déterminent la valeur de la ressource du point de vue de l'agent. La valeur d'un comportement est calculée selon ces préférences et les effets du comportement.

Afin d'évaluer les performances du modèle COR-E sur l'aspect crédible et émotionnels des comportements qu'il simule, nous proposons un protocole d'évaluation dédié aux modèles émergents, dans lequel des observateurs doivent évaluer le caractère crédible et émotionnel des comportements produits par le modèle. Grâce à cette évaluation, nous montrons que les caractéristiques de l'architecture du modèle COR-E permettent de simuler des agents dont le comportement est jugé comme crédible et émotionnel par des observateurs humains. Nous présentons également une évaluation comparative du modèle COR-E avec un autre modèle affectif, mettant en évidence les avantages et les limites de chacun. En particulier, le modèle COR-E se révèle plus facile à configurer, mais ne peut pas gérer de représentations probabilistes. Enfin, nous définissons un modèle de simulation pour les groupes adapté à l'architecture de COR-E, dans lequel les agents rejoignent un groupe en fonction de leurs préférences.

Mots-clefs

Système multi-agents, comportements crédibles, comportements émotionnels.

Table des matières

Introduction	9
I État de l'Art	15
1 Théories des Émotions	17
1.1 Introduction	17
1.2 Origines de la psychologie des émotions	17
1.3 Définition des émotions	19
1.3.1 Émotions et manifestations physiologiques	19
1.3.2 Universalité et spécificités culturelles	20
1.3.3 La représentation des émotions	22
1.4 Évaluation cognitive	24
1.4.1 Théorie générale	24
1.4.2 La théorie OCC	25
1.5 Stratégies d'adaptation et tendances à l'action	25
1.5.1 Théorie générale	25
1.5.2 N. Frijda : les tendances à l'action	27
1.6 Conclusion	29
2 Modèles en Informatique Affective	31
2.1 Introduction	31
2.2 Principes d'un modèle informatique des émotions	31
2.3 <i>The Affective Reasoner</i>	33
2.4 ALMA	36
2.5 EMA	39
2.6 Conclusion	44
3 Autres théories psychologiques importantes	47
3.1 Introduction	47
3.2 La psychologie constructiviste	47
3.2.1 Définition	47
3.2.2 Le Constructivisme selon L.F. Barrett	48
3.2.3 Implications de la psychologie constructiviste pour les modèles informatiques des émotions	50
3.3 Théorie de la CONservation des Ressources (<i>COR theory</i>)	51
3.3.1 Principe général	51
3.3.2 Typologie des ressources	53

3.3.3	Intérêt de la théorie COR pour la simulation des comportements émotionnels	55
3.4	Théories des besoins	56
3.4.1	Murray : les besoins psychogéniques	56
3.4.2	Maslow : la hiérarchie des besoins	57
3.4.3	Hiérarchie de Maslow révisée Kenrick <i>et al.</i> (2010)	59
3.4.4	Baumeister : la ressource Ego	60
3.5	Conclusion	61
4	Modèles d'émergence des émotions	63
4.1	Introduction	63
4.2	Modèles	63
4.2.1	Les Véhicules de V. Braitenberg	63
4.2.2	Le nouveau « Fungus Eater » de R. Pfeifer	65
4.2.3	Le modèle de Dörner et al.	68
4.2.4	Processus et gestion de ressources	71
4.2.5	Modèle hormonal	73
4.3	Comparaison de l'approche entité et de l'approche émergente	75
4.4	Évaluation des modèles d'émotion	77
4.5	Conclusion	79
II	Le modèle COR-E	81
5	Présentation du modèle COR-E	83
5.1	Motivations et principe général du modèle	84
5.2	Les dimensions affectives du modèle COR-E	88
5.3	Formalisation	90
5.3.1	Définitions et propriétés	90
5.3.2	Sélection du comportement	98
5.4	Conclusion	104
6	Évaluation Préliminaire de COR-E	107
6.1	Objectifs	107
6.2	Hypothèses générales	108
6.3	Protocole	108
6.3.1	Questionnaire	109
6.3.2	Production des vidéos de simulation	110
6.4	Résultats	116
6.5	Discussion	121
6.6	Conclusion	123
7	Évaluation approfondie de COR-E	125
7.1	Objectifs	125
7.2	Niveau de menace	126
7.2.1	Impact du niveau de menace	126
7.2.2	Définition du niveau de menace	127
7.3	Hypothèses générales	127
7.4	Protocole	128
7.4.1	Questionnaire	129

7.4.2	Production des vidéos	130
7.4.3	Conditions utilisées pour produire les vidéos	134
7.5	Résultats	135
7.5.1	Hypothèses sur le modèle COR-E	136
7.5.2	Comportements d'acquisition et de protection	137
7.5.3	Préférences	139
7.5.4	Ressources de « Réputation »	139
7.5.5	Niveau de menace graduel	139
7.6	Discussion	140
7.7	Conclusion	142
8	Comparaison des modèles EMA et COR-E	145
8.1	Introduction	145
8.2	Un scénario de comparaison : « L'oiseau »	146
8.3	Modélisation du scénario de l'oiseau avec EMA	147
8.3.1	Représentation des connaissances	147
8.3.2	Évolution du modèle dans le scénario de l'oiseau	148
8.4	Modélisation du scénario de l'oiseau avec COR-E	149
8.4.1	Représentation des agents et de l'environnement	150
8.4.2	Représentation des comportements	151
8.4.3	Évolution du modèle dans le scénario de l'oiseau	153
8.5	Comparaisons des deux modèles	154
8.5.1	Comportements obtenus	154
8.5.2	Comparaison des propriétés des modèles	156
8.6	Conclusion	158
9	Simulation des groupes avec COR-E	161
9.1	Introduction	161
9.2	Contexte	161
9.2.1	Modèles informatiques	161
9.2.2	Travaux en psychologie	163
9.3	Modèle de simulation des groupes avec COR-E	164
9.3.1	Principe général et motivations	164
9.3.2	Représentation des individus et des groupes	165
9.3.3	Représentation des comportements collectifs	166
9.3.4	Dynamique du groupe	166
9.4	Illustration sur un exemple testé expérimentalement	168
9.4.1	Présentation du scénario	168
9.4.2	Initialisation	170
9.4.3	Déroulement de la simulation	170
9.5	Comparaison du traitement des groupes chez COR-E avec d'autres modèles	172
9.6	Conclusion et perspectives	173
10	Mise en œuvre	175
10.1	Introduction	175
10.2	Implémentation de COR-E	175
10.2.1	Le simulateur MASON	175
10.2.2	Implémentation du modèle COR-E	177
10.3	Intégration au projet Terra Dynamica	189
10.3.1	Le projet Terra Dynamica	189

10.3.2	Architecture décisionnelle conçue au LIP6	189
10.3.3	Application de l'architecture FlexMex au projet Terra Dynamica . . .	191
10.3.4	Utilisation du Module Affectif dans le projet Terra Dynamica	192
10.3.5	Exemple sur un scénario en cours de configuration	194
10.3.6	Représentation du scénario dans le Module Affectif	195
10.4	Conclusion	196
	Perspectives	199
	Conclusion	213
	A Questionnaire de l'évaluation préliminaire	215
	B Questionnaire de l'évaluation approfondie	223
	Bibliographie	227

Introduction

Contexte général

Les personnages virtuels sont dotés d'une intelligence artificielle leur permettant de simuler des réactions humaines. Leurs domaines d'application sont variés : ils peuvent fournir des renseignements aux visiteurs d'un musée, incarner un héros dans un jeu vidéo, ou représenter un piéton dans une ville virtuelle. Les capacités d'un personnage virtuel dépendent de l'application pour laquelle il est destiné. Un personnage représentant un piéton dans une ville virtuelle doit savoir réagir aux événements survenant dans son environnement de façon adaptée, comme participer à une manifestation face à une menace de perte d'emploi. Dans un autre contexte, un personnage conçu pour communiquer avec un interlocuteur humain dans un musée possédera principalement des capacités lui permettant de dialoguer et d'exprimer des expressions faciales appropriées.

Le projet Terra Dynamica dans lequel s'inscrit cette thèse a pour objectif de peupler une ville virtuelle avec des personnages virtuels. Ces derniers doivent simuler les activités habituelles des habitants, et être capables de réagir aux événements de manière crédible. Ces capacités permettent plusieurs cadres d'application. Par exemple, des urbanistes peuvent placer un carrefour dans la ville virtuelle, et observer comment les habitants simulés se comportent vis à vis de ce carrefour. Cela permet d'anticiper les conséquences qui suivraient l'installation réelle du carrefour. Les domaines d'application du projet Terra Dynamica concernent la sécurité, les jeux vidéo, l'urbanisme, et les transports.

Dans notre travail, nous cherchons à concevoir des personnages virtuels capables d'adopter des comportements émotionnels crédibles. Chez l'être humain, les émotions sont considérées comme un moyen de s'adapter à un événement en réagissant de façon appropriée. Les personnages virtuels peuvent exprimer des émotions à travers leurs dialogues et leurs actions. Plus précisément, les émotions de ces « agents » peuvent être reconnues par un observateur humain au travers d'expressions faciales, comme la joie ou la colère, ou bien au travers d'actions comme l'agression ou la fuite. La simulation de comportements émotionnels permet d'améliorer la crédibilité d'un agent (Bates, 1994), mais cette crédibilité dépend aussi de la cohérence des comportements émotionnels d'un agent avec la situation dans laquelle il se trouve. Par exemple, si un agent prend la fuite alors qu'il n'y a visiblement aucun danger dans son environnement, ce comportement pourrait sembler non crédible à un observateur humain.

Les modèles informatiques pour les personnages virtuels ont commencé à prendre en compte les émotions depuis les années 1980. La théorie psychologique OCC, proposée par Ortony *et al.* (1988), est la première à avoir été pensée pour être compatible avec un modèle d'intelligence artificielle. Le développement des modèles informatiques des émotions va alors prendre son essor, et donner lieu à une nouvelle discipline de recherche : l'**Informatique Affective**. L'Informatique Affective regroupe trois axes de recherche (Picard, 2003) : (i) la *perception et la reconnaissance des émotions*, qui consiste à déterminer

dans quel état émotionnel se trouve une personne en analysant les signaux qu'elle émet, (ii) la *modélisation des phénomènes affectifs*, dont l'objectif est de simuler un état affectif chez un personnage virtuel ou un robot, de sorte que cet état influence ses décisions et ses comportements, et (iii) la *modélisation de l'expression des émotions*, qui cherche à déterminer comment des robots ou des personnages virtuels peuvent exprimer des émotions par leur expression faciale, leurs gestes, ou leur posture. Notre travail se situe dans le second axe de recherche.

Plus précisément, notre thématique est la simulation de comportements émotionnels crédibles, dans le cadre des applications du projet Terra Dynamica. Le modèle que nous proposons doit être suffisamment générique pour être appliqué à plusieurs scénarios différents, et utilisable dans une simulation contenant un grand nombre d'agents. Chaque agent doit être capable de choisir un comportement émotionnel approprié par rapport à sa situation, afin d'être crédible.

Problématiques de recherche générales

La définition d'un modèle de comportements émotionnels soulève des problématiques de recherche générales auxquelles nous allons faire face dans cette thèse. Les deux premières problématiques sont communes à une grande partie des modèles de simulation de comportements affectifs, tandis que la troisième s'applique plus particulièrement à l'approche que nous allons explorer.

Problématique n° 1 : définir un modèle formel à partir d'une théorie psychologique.

Les modèles d'Informatique Affective s'inspirent le plus souvent de modèles psychologiques. Cette démarche répond à deux motivations principales : (i) vérifier expérimentalement une théorie psychologique par le moyen de la simulation, (ii) obtenir des comportements ressemblant à ceux d'un être humain, dans le but que les agents soient crédibles.

Quand un chercheur souhaite définir un modèle avec cette démarche, une première difficulté qu'il peut rencontrer est le choix de la théorie qu'il souhaite utiliser. Pour effectuer ce choix, il doit connaître les théories psychologiques existantes dans son domaine, définir pour chaque théorie si elle est compatible avec ses objectifs de recherche, déterminer si elle peut être adaptée pour une implémentation, et anticiper les avantages et les limites qu'elle peut apporter dans le domaine de la simulation de comportements affectifs.

Pour traduire un modèle psychologique en un modèle formel pouvant être implémenté, il faut travailler à un niveau de détail dans lequel il est impossible d'utiliser des concepts trop abstraits. Or, le plus souvent, les théories psychologiques ne descendent pas à un niveau de précision suffisant pour l'implémentation, car cela est inutile pour leur cadre d'application. Souvent, l'informaticien doit préciser lui-même les concepts utilisés dans le modèle psychologique dont il s'inspire, et simplifier les mécanismes paraissant trop complexes à implémenter (Marsella et Gratch, 2009). La définition d'un modèle formel inspiré d'une théorie psychologique représente donc un premier défi concernant la simulation de comportements affectifs.

Problématique n° 2 : choix des variables et paramétrage.

Les chercheurs travaillant sur la modélisation des processus affectifs sont confrontés à un autre défi : définir les variables de leur modèle et les paramétrer de façon à obtenir

les résultats escomptés. Les *variables* représentent le type d'information qu'un personnage virtuel prend en compte dans la réalisation de ses actions ou dans le déroulement de son raisonnement. Par exemple, l'intensité d'une émotion ressentie par un personnage est une variable, et son paramétrage déterminera sa valeur. La définition des variables et leur paramétrage permettent d'obtenir certains résultats. La plupart du temps, ces résultats doivent être des comportements ou des expressions crédibles, c'est à dire qui soient vraisemblables aux yeux d'un observateur humain. La définition des variables d'un modèle et leur paramétrage déterminent donc la qualité des résultats obtenus.

La plupart des modèles d'émotion existants utilisent des variables représentant des catégories d'émotions ou des dimensions affectives, associées à des intensités. Cette représentation est souvent issue du modèle OCC (Ortony *et al.*, 1988), permettant d'attribuer une émotion à un personnage, et de déterminer l'intensité de cette émotion. Lorsque le concepteur d'un modèle adopte cette approche, et qu'il doit intégrer ces variables dans le choix d'un comportement, il doit déterminer plusieurs éléments : (i) les variables émotionnelles qui influencent ce comportement, (ii) les intervalles de valeurs dans lesquels chaque variable sera prise en compte, généralement déterminés par des seuils (iii) l'effet de la valeur de la variable dans la sélection du comportement. Ces questions sont difficiles, car il semble qu'aucun travail en psychologie n'ait défini précisément les relations de cause à effet entre l'intensité d'une catégorie d'émotion et le comportement. Le modèle OCC ne considère pas l'influence des émotions sur le comportement, mais seulement les conditions dans lesquelles différentes émotions sont activées. Pourtant, le concepteur d'un modèle informatique doit déterminer précisément les influences des émotions et de leur intensité sur le comportement. Il doit donc répondre lui-même à des questions qui concernent en principe le domaine de la psychologie, et tester ses hypothèses par expérimentation. Un deuxième défi est donc de relier le modèle de données à la sélection de comportements. Plus le modèle manipule de variables et de paramètres, plus cette tâche s'avère difficile.

Problématique n° 3 : vers un modèle d'émergence des émotions pour les systèmes multi-agents.

Pour répondre à ces difficultés, une approche possible est de s'appuyer sur une catégorie de modèles qui produit des comportements affectifs sans utiliser de variables représentant des catégories d'émotions. C'est le cas du modèle de sélection de comportement proposé par Pfeifer (1994), ayant été implémenté sur un robot. Au cours d'une expérience, l'auteur a constaté que des observateurs humains qualifiaient les comportements du robot avec des termes émotionnels, en disant par exemple que le robot était « frustré » lorsqu'il heurtait un mur. Ce type de modèle ne repose pas sur l'idée de faire « semblant » qu'un agent est doté d'émotions, mais sur l'idée que les émotions sont des concepts émergents. Cette idée est compatible avec la théorie constructiviste des émotions (Barrett et Bliss-Moreau, 2009), qui postule que les émotions sont avant tout des interprétations, et non des entités distinctes guidant notre comportement.

L'avantage d'une telle approche sur le plan du paramétrage est important, puisqu'il n'y a plus de variables émotionnelles à définir pour la sélection du comportement. Cependant, les modèles utilisant ce type d'approche, que nous appellerons *modèles d'émergence des émotions*, ont été utilisés dans des environnements simples, contenant un seul ou peu d'agents. Ces agents sont le plus souvent des robots disposant d'un petit répertoire d'actions primaires comme « manger » ou « éviter ». Si nous souhaitons utiliser un modèle d'émergence, il est important qu'il puisse être appliqué à des personnages virtuels dans un système multi-agents. Notre troisième défi dans cette thèse sera donc de proposer un

modèle d'émergence des émotions capable de produire des comportements émotionnels crédibles dans un environnement plus complexe, et de définir un protocole d'évaluation dédié aux modèles d'émergence, ce qui à notre connaissance n'a pas été fait.

Problématiques de recherche spécifiques et démarche adoptée

Nous souhaitons proposer un modèle pour la simulation de comportements émotionnels crédibles fondé sur le principe d'émergence des émotions, capable de respecter un certain nombre de contraintes. Dans le cadre du projet Terra Dynamica, ce modèle doit pouvoir être utilisé dans une simulation contenant un grand nombre d'agents, représentés sous la forme d'individus ou de groupes, et il doit pouvoir être appliqué à des scénarios variés. Cela signifie que l'architecture du modèle doit contenir des variables faciles à configurer, dont les effets peuvent être bien anticipés, tout en étant capable de produire des comportements diversifiés et de gérer des situations variées. Les personnages virtuels du projet Terra Dynamica sont en effet amenés à adopter plusieurs types de comportements susceptibles d'avoir lieu dans une ville virtuelle, et ne seront pas cloisonnés dans un environnement restreint. Ils peuvent avoir une multitude d'interactions avec les objets de leur environnement ou avec d'autres agents, et des événements peuvent survenir à tout moment. Leur environnement est donc riche et dynamique. Ce cadre d'application dépasse celui des modèles d'émergence des émotions ayant été définis jusqu'ici, et demande la conception d'un modèle adapté. Nos problématiques de recherche spécifiques découlant de ces contraintes sont les suivantes :

1. **définir un modèle suffisamment générique pour être appliqué sur plusieurs scénarios** : le modèle doit présenter des caractéristiques pouvant être adaptées facilement pour des scénarios différents. Une fois ce modèle défini, nous devons le tester sur des situations susceptibles d'être simulées dans le projet Terra Dynamica, comme une file d'attente à un guichet, ou bien une manifestation.
2. **définir un modèle dont la configuration peut être bien contrôlée** : dans un système multi-agents, il n'est pas toujours facile de prévoir les effets de la configuration d'un modèle sur le comportement des agents. Il peut exister un grand nombre d'agents, pouvant avoir de multiples interactions avec les autres agents et les objets de l'environnement. Le paramétrage de variables dont l'évolution est complexe, comme l'intensité des catégories d'émotion et leur influence sur le comportement, ne permet pas d'anticiper facilement comment les agents vont se comporter. Il peut être intéressant de voir des agents adopter des comportements non prévus dans une situation donnée, surtout dans le cadre de simulations concernant la sécurité ou l'urbanisme, mais ces comportements doivent néanmoins rester crédibles. Par exemple, il serait utile d'observer que des agents se réfugient dans les toilettes pour échapper à un incendie, ce qui permettrait de mettre en place des mesures de sécurité pour ne pas que cela se produise en réalité. En revanche, il serait peu crédible qu'un agent continue à discuter avec un autre agent dans cette situation. L'utilisation d'un modèle d'émergence des émotions devrait nous permettre de déterminer des variables concrètes ayant un sens clair pour l'utilisateur du modèle, et des règles de sélection simplifiées, afin de mieux contrôler les conditions dans lesquelles un agent sélectionne un comportement.
3. **déterminer un protocole de validation convenant à un modèle d'émergence des émotions** : les modèles d'émergence des émotions ne manipulent pas de catégories d'émotions, et supposent que des observateurs humains peuvent in-

interpréter des émotions à partir des comportements exhibés par les agents. Cette affirmation ne semble jamais avoir été vérifiée par un protocole d'évaluation, alors que cette démarche est indispensable pour vérifier qu'un tel modèle produit bien des comportements émotionnels. Nous devons donc mettre en place un protocole d'évaluation dédié à cette tâche.

4. **représenter la notion de groupes d'agents** : le projet Terra Dynamica cherche à simuler un grand nombre d'agents, avec la possibilité de prendre en compte plusieurs échelles telles que l'individu, ou le groupe. Nous devons donc proposer un modèle qui soit compatible avec la représentation de groupes d'agents, et qui soit doté de caractéristiques propres à cette représentation.

Pour répondre à ces objectifs, nous proposons un modèle d'émergence fondé sur la théorie psychologique de la COnservation des Ressources (*COR theory*) de Hobfoll (1998). Le concept de ressource désigne ici plusieurs types d'éléments : des ressources psychologiques comme l'estime de soi, ou encore des ressources matérielles comme une voiture. Le principe général du modèle COR est que le comportement d'un individu est dirigé par le besoin de protéger ses ressources en d'en acquérir de nouvelles. Ce modèle offre une bonne capacité d'adaptation, en proposant des principes communs pour des objets et des concepts variés. Il répond bien aux contraintes de généralité auxquelles nous devons faire face. La dichotomie entre deux grands types de comportement, l'acquisition et la protection de ressources, offre la possibilité de construire un système dynamique basé sur des règles simples. Nous proposons donc dans cette thèse la définition d'un modèle fondé sur la théorie COR, intitulé COR-E (Conservation of Resources Engine). COR-E se définit comme une architecture pour la simulation multi-agents pouvant être employé dans des scénarios variés, dont la fonction est de produire des comportements émotionnels crédibles.

Organisation du document

Ce mémoire de thèse contient deux parties : la première partie contient quatre chapitres concernant l'état de l'art du domaine, et la seconde contient cinq chapitres contenant la définition et l'évaluation du modèle que nous avons développé. Dans le chapitre 1, nous présentons des théories fondamentales de la psychologie des émotions, et dans le chapitre 2, nous décrivons des modèles d'Informatique Affective reconnus fondés sur certaines de ces théories. Le chapitre 3 est consacré aux théories psychologiques qui sont au cœur du modèle présenté dans cette thèse, en particulier le constructivisme et la théorie COR, moins connus du domaine de l'Informatique Affective. Le chapitre 4 présente un ensemble des modèles d'informatique affective adoptant une approche émergente des émotions, que nous relierons au constructivisme. En particulier, nous dressons dans ce chapitre une comparaison entre les modèles manipulant des catégories d'émotion, et les modèles adoptant une approche émergente des émotions. Dans la seconde partie, nous décrivons le modèle COR-E au chapitre 5, l'évaluation préliminaire du modèle au chapitre 6, puis son évaluation approfondie au chapitre 7. L'évaluation préliminaire détermine si les comportements produits par COR-E sont jugés crédibles et émotionnels par des observateurs humains, et l'évaluation approfondie permet de mettre en évidence l'apport de chaque caractéristique du modèle. Au chapitre 8, nous dressons une comparaison entre le modèle COR-E et le modèle EMA, en examinant les comportements obtenus par chacun des modèles sur le même scénario. Après cela, nous présentons les travaux qui ont été réalisés pour simuler des groupes avec COR-E au chapitre 9. Enfin, nous présentons au chapitre 10 l'implémentation du prototype du modèle, et son intégration au sein du Projet Terra Dynamica.

Première partie

État de l'Art

Chapitre 1

Théories des Émotions

1.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre une partie des théories fondamentales dans le domaine de la psychologie des émotions, dont certaines ont conditionné la majorité des modèles existants en Informatique Affective. Ces travaux sont principalement issus de la culture occidentale. Nous décrirons les origines de la psychologie des émotions (section 1.2) depuis l'Antiquité jusqu'à la théorie évolutionniste de Darwin, puis nous aborderons la définition des émotions vue sous plusieurs perspectives (section 1.3). Nous allons voir que cette définition fait l'objet de certains consensus, mais aussi de divergences importantes. Nous expliquerons ensuite ce que sont les théories de l'évaluation cognitive (section 1.4), traitant de la façon dont un individu détermine l'émotion qu'il ressent, puis nous terminerons par les théories sur les stratégies d'adaptation (section 1.5), s'intéressant à la manière dont cet individu réagit une fois l'évaluation effectuée.

1.2 Origines de la psychologie des émotions

Les émotions sont d'abord apparues sous le nom de « passions », et ce n'est qu'au XVI^{ème} siècle qu'elles sont référencées avec leur dénomination actuelle (Saint-Gelais, 1534). Le mot « passion » provient du verbe latin *passior* signifiant « souffrir », « endurer », et le mot « émotion » a été formé à partir de la racine latine *emovere*, signifiant « mettre en mouvement ». Cette étymologie témoigne de l'évolution du point de vue sur les émotions, d'abord considérées comme néfastes, et ensuite considérées comme des moyens d'agir.

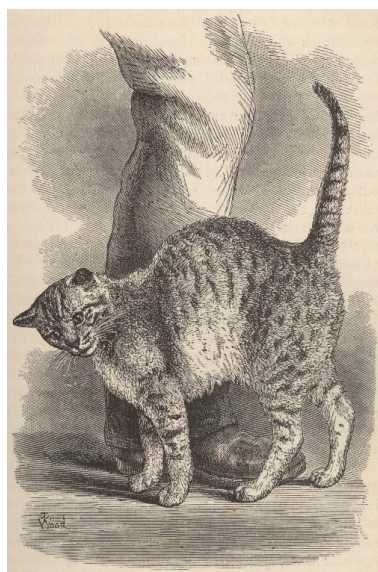
Les premières théories de l'émotion remontent à l'Antiquité. Hippocrate (cité par Littré *et al.* (1861)) définit les passions comme des éléments néfastes et peu contrôlables. Selon sa théorie, elles proviennent de dérèglements de certains fluides du corps, comme le sang. Ces dérèglements peuvent être soignés par une bonne hygiène de vie, incluant un régime alimentaire sain et de l'exercice. Si les dérèglements ne sont pas soignés, ils peuvent par exemple amener un individu à ne jamais pouvoir se reposer, ou à adopter des comportements incohérents. Platon (cité par Luminet (2008)) pense que les émotions pervertissent la raison, et considère qu'elles sont à l'origine de maladies psychologiques au même titre qu'un défaut d'éducation ou qu'une maladie. Aristote (Luminet, 2008) est le premier à attribuer une fonction aux émotions et à ne pas les considérer comme des éléments indésirables. Selon lui, elles sont déterminées d'après les cadres de référence d'un individu et ses préférences personnelles. Elles ont une valence, c'est-à-dire un aspect positif ou négatif, et impliquent des comportements. Cette analyse d'Aristote constitue la base des théories

psychologiques des émotions : elles surviennent d'après l'évaluation qu'un individu fait de sa situation, et sont à l'origine de *comportements*.

Un peu plus tard, Descartes (1649) propose une théorie cognitive des émotions, en postulant que leur intensité est déterminée par la façon dont un individu pense aux événements qui les ont causées. Il établit une première liste de quarante passions, dont le désir, l'espérance, la honte, le dégoût, et une seconde liste de six passions fondamentales qui sont l'admiration, l'amour, la haine, le désir, la joie et la tristesse. D'après lui, toutes les passions sont composées de ces six émotions fondamentales, ou en sont des espèces. Il précise qu'on pourrait encore distinguer d'autres passions, et que leur nombre est indéfini. Descartes donne une définition de ces passions, en tentant de décrire ce qui est ressenti de façon subjective par un individu. Selon lui, la joie est « une agréable émotion de l'âme, en laquelle consiste la jouissance qu'elle a du bien que les impressions du cerveau lui représentent comme sien ». L'auteur cherche aussi à déterminer les effets observables que ces passions ont sur le corps, et formule des hypothèses pour les expliquer. Par exemple il explique comment la joie fait rougir de la façon suivante : « La joie rend la couleur plus vive et plus vermeille, parce qu'en ouvrant les écluses du cœur elle fait que le sang coule plus vite en toutes les veines, et que, devenant plus chaud et plus subtil, il enflé médiocrement toutes les parties du visage, ce qui en rend l'air plus riant et plus gai ». Ces descriptions sont éloignées de la rigueur scientifique moderne, mais témoignent de la volonté de comprendre comment surviennent les phénomènes émotionnels et quels sont leurs effets.

Darwin (1874) établit la première théorie scientifique moderne des émotions, en les situant dans le contexte de sa théorie de l'évolution. Son travail sur l'expression des émotions est fondé sur l'observation du comportement des hommes et des animaux (voir figure 1.1). Pour lui, les émotions sont un moyen de s'adapter à son environnement, et sont héréditaires. Il décrit précisément plusieurs expressions d'émotions comme la joie, la colère, la surprise, ou la peur, et propose d'en définir les causes. Par exemple, chez l'homme la peur s'exprime par une large ouverture de la bouche et des yeux, avec un haussement des sourcils, de façon à pouvoir percevoir tout ce qu'il y a autour de lui en cas de menace et d'entendre distinctement n'importe quel son.

FIGURE 1.1 – Chat dans un État d'Esprit Affectueux, par M. Wood (Darwin, 1874)



1.3 Définition des émotions

Les théories cherchant à définir les émotions, c'est à dire à déterminer le nombre d'émotions existantes et leurs processus sous-jacents, sont nombreuses. Elles ne partagent pas le même point de vue, et ces divergences peuvent être profondes. Certaines théories contemporaines reconnaissent seulement deux dimensions émotionnelles, alors que d'autres énumèrent 22 catégories d'émotion. La définition des émotions peut se baser sur l'identification de leurs *manifestations*, leurs constantes et leurs variantes au travers de différentes *cultures*, et les façons dont il est possible de les *représenter*.

1.3.1 Émotions et manifestations physiologiques

Dans la lignée du travail de Darwin, des théories concernant l'expression physiologique des émotions vont apparaître. Ces théories s'intéressent aux relations qui peuvent exister entre une émotion et ses expressions somatiques, comme la sudation ou le rythme cardiaque. L'ensemble des modifications physiologiques associées à une émotion porte le nom de *pattern* émotionnel. Ces réponses physiologiques peuvent être considérées comme la conséquence des émotions, mais aussi comme leur cause. Trois grandes théories divergentes sur ce sujet vont apparaître : la théorie James-Lange, la théorie Cannon-Bard, et la théorie Schachter-Singer.

La Théorie de James-Lange Pour James (1890), l'émotion ne précède pas les manifestations physiologiques, mais ces manifestations sont l'émotion elle-même. Afin de faire comprendre son point de vue, l'auteur propose l'expérience de pensée suivante : si on se concentre sur une émotion particulière, et qu'on élimine de notre attention toutes les manifestations physiologiques de cette émotion, il ne reste plus rien de cette émotion, pas même un concept de l'esprit capable de la représenter. De manière indépendante, Lange (1885) aboutit à un point de vue similaire. La théorie de James-Lange est considérée comme « périphéraliste », car la source des émotions provient des récepteurs des modifications corporelles situés en périphérie. Selon James, les changements se produisant dans les viscères, composées de muscles lisses et de glandes, jouent un rôle très important dans les manifestations physiologiques attribuées aux émotions. Le caractère révolutionnaire de cette théorie provient du fait que les émotions sont envisagées comme des conséquences de manifestations physiologiques, et non plus comme des causes.

La Théorie de Cannon-Bard En opposition à la théorie James-Lange, la théorie Cannon-Bard postule que les manifestations physiologiques d'une émotion et l'émotion elle-même sont des processus simultanés. Cannon (1927) soutient que les émotions sont d'origine cognitive, et que les événements cognitifs précèdent les modifications physiologiques. Ses affirmations reposent sur plusieurs arguments, fondés sur des expérimentations scientifiques réalisées sur des chats et des êtres humains. En particulier, il constate que le déclenchement artificiel de changements viscéraux ne provoque pas la sensation d'une émotion chez un individu, que certains changements viscéraux surviennent lorsque des émotions sont ressenties mais aussi lorsqu'aucune émotion n'est ressentie, et que les changements viscéraux surviennent sur une période de temps trop longue pour être responsables du déclenchement des émotions ressenties par un individu. Ces résultats mettent en doute la théorie de James, selon laquelle les changements viscéraux seraient un déclencheur des émotions ressenties.

La Théorie de Schachter-Singer Selon Schachter et Singer (1962) l'émotion est une conséquence de manifestations physiologiques, mais aussi de facteurs environnementaux et de l'état cognitif d'un individu. Il s'agit donc d'une version plus nuancée et plus complète de la théorie James-Lange. Schachter et Singer affirment que les états émotionnels diffèrent peu les uns des autres sur le plan des manifestations physiologiques, et que ces dernières ne suffisent donc pas à caractériser l'expérience d'une émotion. D'après les auteurs, une manifestation physiologique inexpliquée amène l'individu qui la ressent à rechercher les causes de cet état dans son environnement. En fonction des indices qu'il identifie, il va effectuer des attributions émotionnelles différentes comme la joie, la peur, ou la colère.

Pour vérifier cette théorie, Schachter et Singer (1962) ont mené une expérience. Des injections d'adrénaline ont été administrées à des sujets ayant été invités à participer à une expérience sur l'injection de vitamines. Les effets de l'adrénaline sont une augmentation de la pression sanguine, du rythme cardiaque, de la respiration, d'un afflux de sang dans les muscles et le cerveau. Ces effets sont perceptibles par le sujet au travers de symptômes de palpitations, de tremblements, de rougeurs, et de respiration plus rapide. Les sujets ont ensuite été exposés à la présence d'une personne qui les amusait ou qui les agaçait, complice de l'expérience. Une grande proportion des sujets n'ayant pas été informés (groupe 1) ou mal informés (groupe 2) des effets de l'injection d'adrénaline ont ressenti des émotions semblables à celles de la personne complice. Les sujets peu ou mal informés des effets ont été moins nombreux à les ressentir. Cette expérience a confirmé que si un individu ne connaît pas les causes de son état d'excitation, il va rechercher ces causes dans son environnement. C'est à dire que l'attribution émotionnelle que fait un individu dépend de son environnement, et qu'elle n'est pas seulement dirigée par son état physiologique.

Il existe d'autres travaux en faveur de la théorie de Schachter-Singer. Au cours d'une expérience réalisée par Zillmann *et al.* (1974) un complice a été chargé de provoquer de la colère chez les sujets en leur envoyant des décharges électriques. Les sujets ont ensuite été soumis à une exercice physique intense, puis on leur a donné l'opportunité de : (i) soit infliger un choc électrique au complice immédiatement après l'exercice, (ii) soit infliger ce choc après un certain délai. Les sujets ayant eu la possibilité de donner un choc après un certain délai se sont montrés plus agressifs que ceux ayant eu cette possibilité immédiatement après l'exercice. Les auteurs de cette expérience expliquent ces résultats par l'hypothèse suivante : les sujets ayant attendu plus longtemps avaient conscience d'être dans un certain état d'excitation, mais ne se rappelaient plus que cet état était causé par l'exercice physique. Ils ont donc cherché une cause à cet état, et l'ont attribuée aux signaux agressifs véhiculés par le complice. C'est pour cela qu'ils ont réagi de façon plus agressive vis à vis du complice. Des expériences similaires comme celles de White *et al.* (1981) et Martin *et al.* (1992) soutiennent également le modèle Schachter-Singer.

1.3.2 Universalité et spécificités culturelles

Afin de déterminer quelles sont les émotions existantes, certains psychologues se sont reposés sur leurs propriétés universelles et sur leurs spécificités culturelles. L'étude de Russell (1991) sur la catégorisation des émotions s'attache à la façon dont les émotions sont désignées au travers de différents langages et différentes cultures. Selon lui, il existe des similitudes apparentes dans les grandes catégories d'émotion évoquées, même au travers de langues très différentes. Pour illustrer ce propos, il cite un passage d'une encyclopédie chinoise, où 7 sentiments de base similaires à ceux de la culture occidentale sont énumérés : la joie, la colère, la tristesse, la peur, l'amour, l'attraction ou l'aversion. L'auteur montre qu'au delà de ces similitudes apparentes, les termes désignant les émotions ne sont pas strictement équivalents d'une langue à l'autre, certains n'ayant même aucun équivalent.

Il cite par exemple le terme *Schadenfreude*, désignant en allemand le fait de se réjouir du malheur de quelqu'un, qui n'existe pas en anglais. En bengali, *obhiman* désigne le chagrin ressenti par l'indifférence d'un être aimé. Certains termes désignant des émotions considérées comme basiques, telles que la « peur » et la « colère », n'existent pas dans certaines cultures. Ces constatations conduisent Russell à conclure que tous les termes liés aux émotions sont spécifiques à la culture, et qu'on ne peut pas être certain que les émotions ont des caractéristiques biologiques universelles.

Au contraire, Ekman (1999) postule qu'il existe des catégories d'émotion universelles ancrées biologiquement chez un individu. Il se base pour cela sur 6 expressions faciales, qui selon lui sont reconnaissables dans toutes les cultures. Il s'agit de la tristesse, la joie, le colère, la peur, le dégoût et la surprise. Au cours d'un travail au sein d'une tribu de Papouasie-Nouvelle-Guinée (Ekman et Friesen, 1971), il a observé que les individus de cette tribu parvenaient à faire correspondre correctement 3 expressions faciales émotionnelles avec les situations censées les représenter. Par exemple, la situation « son/ami(e) vient, et il/elle heureuse » a été associée à l'expression faciale de « joie ». Ekman se rallie au point de vue de Tooby et Cosmides (1990), qui pensent que l'évaluation qu'un individu fait d'un événement dépend de caractéristiques héréditaires, lui permettant de s'adapter à la rencontre d'une autre personne ou d'un animal. Cette approche est similaire à celle de Darwin (1874) (voir section 1.2).

Le travail conduit par Ekman et Friesen (1971) est remis en question par une étude de Izard (1971). Cette étude a impliqué des habitants de Nouvelle-Guinée qui avaient peu de relations avec des individus de culture occidentale. On a présenté à ces individus des photographies de visages d'Occidentaux exprimant la peur, la surprise ou la tristesse. Le psychologue a constaté que les habitants de cette contrée n'identifient l'expression faciale de la « tristesse occidentale » qu'une fois sur deux, et que dans 45 % des cas, ils ne distinguent pas l'expression de la peur de celle de la tristesse. À l'inverse, certaines expressions faciales émotionnelles des habitants de Papouasie ne sont pas reconnues par les occidentaux.

D'autres psychologues (Wierzbicka, 2009; Goddard, 2010; Shweder, 2004, 2012) pensent que les termes désignant les émotions sont trop complexes et trop synthétiques pour être analysés au travers de différentes cultures. Ces termes doivent être décomposés en unités plus significatives, valables dans toutes les cultures. Dans la lignée du travail de Wierzbicka (1999), Shweder (2004) propose que ces unités soient les *désirs*, les *sentiments*, les *valeurs* et les *croyances*, car elles peuvent être utilisées pour étudier les émotions au travers des cultures. Par exemple, la colère se décomposerait en un désir de revanche, et en une sensation d'excitation. La tristesse désigne l'état dans laquelle une personne se sent quand elle pense qu'une chose aimée ou désirée est définitivement perdue ou inaccessible. Cette décomposition a en fait été utilisée par Ekman au cours de son étude en Papouasie Nouvelle Guinée : pour savoir si les individus identifiaient l'expression faciale de tristesse, il a tenté de savoir s'ils faisaient correspondre la situation « sa mère est morte [...] » ou « son enfant est mort [...] » à l'image d'un visage triste.

Au vu des éléments apportés par les psychologues, il semble qu'on puisse dégager certains aspects affectifs se retrouvant dans plusieurs cultures, mais deux termes émotionnels issus chacun de cultures différentes ne désignent jamais exactement la même chose. Le vocabulaire émotionnel est fortement conditionné par la culture, comme nos expressions de communication faciales. Une théorie des émotions doit donc faire la distinction entre les blocs élémentaires qui forment les processus émotionnels universels, et les termes désignant des catégories d'émotion étant par nature liées à la culture et à la langue.

1.3.3 La représentation des émotions

Dans les modèles psychologiques, les émotions sont très souvent associées à la notion de *valence* et d'*intensité*. Par ailleurs, il existe trois grands types de représentation des émotions : (i) les représentations dimensionnelles, (ii) les représentations discrètes, (iii) les représentations par composition. Certains modèles utilisent plusieurs types de représentations à la fois.

1.3.3.1 Valence et Intensité

Valence La valence est l'aspect positif ou négatif d'un concept comme un événement, un objet ou une personne. Cette notion semble utilisée dans tous les modèles psychologiques et former la base de la dynamique du comportement. La notion de valence est considérée comme étant à l'origine des réflexes d'approche et d'évitement, considérés comme les comportements basiques d'un organisme. Lang *et al.* (1997) considère que le système émotionnel humain a évolué autour de ces deux réflexes centraux. La valence est également à la base de tout processus de décision dans lequel il est question de gain ou de perte.

En neurobiologie, on parlera plutôt de stimuli aversifs pour la valence négative, de stimuli appétitifs pour la valence positive. Les stimuli aversifs sont des signaux de l'environnement qu'un animal ou un individu cherche à éviter, et les stimuli appétitifs sont au contraire des signaux qu'il souhaite atteindre. Les modèles psychologiques utilisent également le terme de « plaisir » ou « déplaisir » pour parler de la valence.

Il existe deux moyens de représenter la valence, soit avec une échelle numérique, soit avec une valeur symbolique. Dans la première méthode, la valence est représentée sur une dimension pouvant prendre des valeurs négatives ou positives (Mehrabian et Russell, 1974; Russell, 2003; Barrett et Bliss-Moreau, 2009), elle est donc quantifiée par une valeur numérique. Dans la seconde méthode, la valence peut seulement prendre deux valeurs symboliques : positive ou négative. Cette représentation peut être utilisée afin de classer les émotions à l'aide d'un arbre, où une branche correspond à la valence positive, et une autre correspond à la valence négative. C'est la représentation adoptée par le système de classification des émotions proposé par Ortony *et al.* (1988).

Intensité Le concept d'intensité d'une émotion, ou d'excitation, peut prendre deux sens différents. Pour Ortony *et al.* (1988), ce terme désigne l'intensité avec laquelle un individu ressent un état émotionnel particulier. Pour (Mehrabian et Russell, 1974; Russell, 2003; Barrett et Bliss-Moreau, 2009), la notion d'intensité est clairement liée à l'état d'activation physiologique d'un organisme. Ces deux sens ont chacun des implications différentes. Si on parle de l'intensité d'un sentiment émotionnel, il est possible de dire qu'un individu peut ressentir plusieurs émotions à la fois, et éprouver chacun de ces sentiments avec une intensité différente. En revanche, si on parle d'intensité comme activation physiologique, l'organisme se trouve dans un état d'excitation particulier, mesuré par exemple par le rythme cardiaque, la sudation, et il ne peut pas y avoir plusieurs états d'excitation différents pour le même individu.

L'intensité est le plus souvent représentée sur une échelle numérique ou un axe, dont la valeur la plus basse correspond à une intensité nulle, et la valeur la plus haute à une intensité extrême.

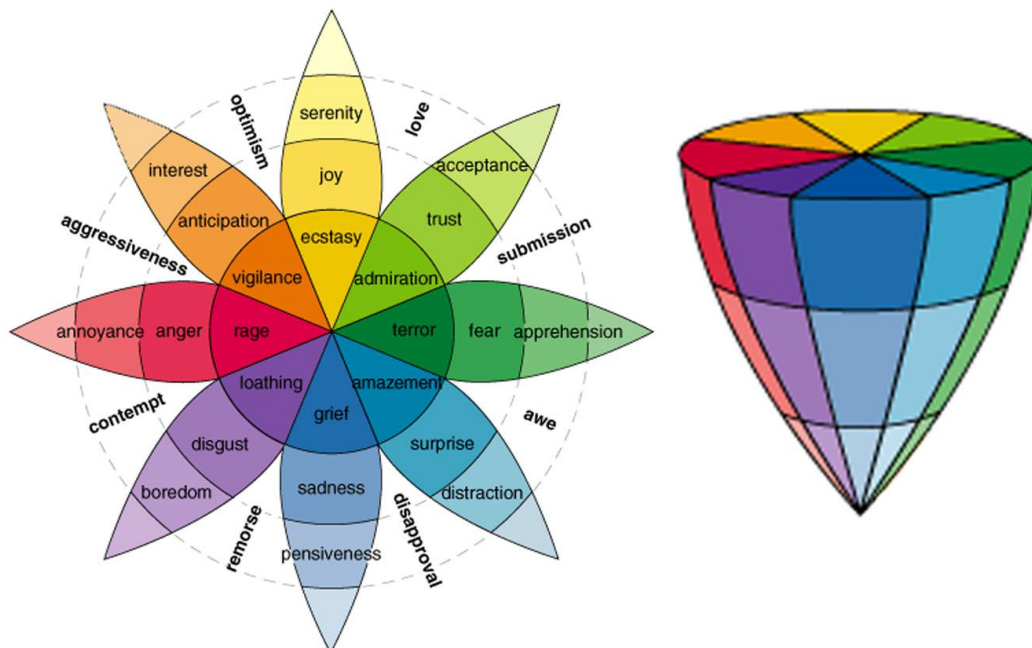
1.3.3.2 Représentations Discrètes et Dimensionnelles

Représentations Dimensionnelles Les représentations dimensionnelles définissent des axes sur une certaine échelle de valeurs, représentant chacun un aspect affectif différent. Par exemple, (Russell, 2003) identifie deux types de dimensions affectives centrales. La première est la *valence*, qui indique à quel point un événement est ressenti de façon positive ou négative, et la seconde est l'*activation*, qui correspond à un état d'excitation physiologique. Il affirme que tout autre type de distinction que ces deux dimensions repose sur des différences contextuelles liées à des processus non émotionnels. Ces deux dimensions sont reprises par un grand nombre de modèles émotionnels en psychologie.

Le modèle PAD défini par Mehrabian et Russell (1974) utilise trois dimensions affectives, qui selon les auteurs sont capables de représenter toutes les catégories d'émotion. Ces dimensions sont le *plaisir*, équivalent à la valence, l'*excitation*, et la *dominance*, qui représente le fait qu'une émotion soit associée à la domination ou à la soumission. Par exemple, la colère est une émotion liée à la domination, et la peur est une émotion liée à la soumission.

Représentations Discrètes Les représentations discrètes à un seul niveau, c'est à dire qui ne décomposent pas les émotions, cherchent généralement à déterminer une liste d'émotions basiques. La théorie d'Ekman (1999) est un exemple de ce type de représentation. Ces théories manipulent un plus grand nombre de concepts affectifs que les théories dimensionnelles. Les représentations discrètes semblent plus riches sur le plan conceptuel, mais elles sont aussi plus difficiles à établir. En effet, contrairement à l'état d'excitation physiologique d'un individu, son état de « joie » ou de « tristesse » ne peut être directement mesuré. Il peut y avoir plusieurs types d'arguments en faveur des représentations discrètes : les patterns physiologiques (James, 1890), dont les expressions faciales (Darwin, 1874; Ekman, 1999), ou la volonté de déterminer des objets de type cognitif (Wierzbicka, 2009; Ortony *et al.*, 1988) à partir desquels et sur lesquels on peut agir.

FIGURE 1.2 – Roue des Émotions de Plutchik (1980)



Représentations par Composition Les représentations par Composition définissent des émotions de base, et des émotions secondaires composées à partir de ces émotions de base. Par exemple, Plutchik (1980) détermine 8 émotions de base, et définit des émotions secondaires qui sont un mélange de deux émotions de base (un schéma de cette théorie est présenté sur la figure 1.2. Ainsi la joie combinée avec la confiance produisent de l'amour, et le dégoût combiné avec la tristesse du remords. La théorie de Oatley et Johnson-Laird (1987) adopte elle aussi ce type de représentation. Dans ces travaux, une émotion secondaire hérite des propriétés du noyau de base d'une émotion primaire, en particulier sa valence positive ou négative. Cette émotion secondaire est caractérisée par des propriétés supplémentaires de type cognitif : la représentations de situation, d'objet, de soi et d'autrui, de but, de cause et de conséquence.

1.4 Évaluation cognitive

1.4.1 Théorie générale

Les théories de l'*évaluation* des émotions concernent l'étude des facteurs qui amènent un individu à ressentir une émotion. Ce concept a au départ été introduit pour expliquer les différences des réactions émotionnelles entre les individus (Smith et Kirby, 2009). En effet, chacun peut répondre à une même situation avec des émotions différentes, et une même personne peut répondre de façon différente à la même situation à des moments différents. La théorie de l'évaluation repose sur deux principes : (i) l'émotion est fonction d'une évaluation individuelle, où la personne évalue la situation par rapport à son propre bien être, (ii) si l'on pouvait prédire comment une personne appréhende une situation, on pourrait prédire l'émotion résultante, et vice-versa. Les théories qui cherchent à expliquer le déroulement d'un processus d'évaluation émotionnelle identifient des mécanismes différents.

Lazarus (1991) envisage trois aspects émotionnels : relationnel, motivationnel, et cognitif. L'aspect relationnel concerne les relations d'une personne avec son environnement, et suggère que les émotions proviennent d'une interaction entre les deux. L'aspect motivationnel concerne le statut des buts d'un individu, et donc les éléments d'une situation pertinents par rapports à ses buts. L'aspect cognitif concerne l'évaluation personnelle d'une situation, plus précisément en quoi elle est pertinente par rapport à la vie d'un individu. A partir des ces éléments, le psychologue détermine un processus d'évaluation cognitive en deux temps : l'évaluation *primaire* et l'évaluation *secondaire*. Dans l'évaluation primaire, l'individu examine d'abord son environnement pour déterminer si une situation est pertinente pour son bien-être. Dans l'évaluation secondaire, il évalue les stratégies qu'il peut adopter pour faire face à une situation si elle est pertinente.

Smith et Kirby (2000) proposent un modèle fondé sur deux processus d'évaluation fonctionnant en parallèle. Ces deux processus sont (i) le processus *associatif*, qui est un processus d'évaluation rapide, parallèle, et activé par la mémoire, et (ii) le processus de *raisonnement*, plus lent, qui demande de l'attention et un effort actif de la part de l'individu.

Le modèle de Scherer (2001) utilise un processus séquentiel et étalé sur plusieurs niveaux. Les trois niveaux de traitement sont le niveau sensori-moteur (inné), le niveau reposant sur des schémas (appris), et le niveau délibératif. Les critères permettant d'évaluer un évènement sont appelés *stimulus evaluation checks* (SECs). Cette évaluation permet de prédire le type et l'intensité de l'émotion déclenchée par l'évènement. Les SECs sont classés en quatre catégories principales, qui se décomposent en catégories secondaires. Les SECs

majeurs correspondent aux types d'informations les plus importantes dont a besoin l'organisme pour avoir une réaction appropriée. Il s'agit de la pertinence de l'événement pour l'individu, des conséquences de l'événement, de la possibilité pour l'individu de faire face aux conséquences de l'événement, et de la compatibilité de l'événement avec les normes, ou valeurs, de l'individu. Ces SECs sont évalués séquentiellement. Le modèle de Scherer ne se limite pas à un nombre restreint de catégories d'émotion, car selon lui les émotions sont des phénomènes fluctuants par nature.

1.4.2 La théorie OCC

Le modèle d'évaluation émotionnelle OCC est une théorie psychologique poursuivant deux objectifs principaux :

1. établir une théorie des émotions en se fondant non pas sur les « mots » de la langue, mais sur une analyse structurelle permettant de déterminer des catégories d'émotion d'après certains critères (par exemple, la valence).
2. établir une théorie des émotions pouvant être utilisée par un système d'intelligence artificielle qui serait capable de raisonner sur les émotions.

Ces objectifs ont permis aux auteurs d'aboutir à une théorie concrète des émotions, moins complexe que d'autres théories de l'évaluation, mais plus facilement utilisable dans le cadre d'un modèle d'intelligence artificielle. Grâce à ses propriétés, la théorie OCC a été utilisé par plusieurs modèles d'Informatique Affective, et est aujourd'hui reconnu comme une théorie de référence pour la discipline. Cette théorie permet de déterminer quelle émotion peut être ressentie par un agent parmi 22 catégories, et avec quelle intensité.

Les catégories émotionnelles sont déterminées grâce à des variables d'évaluation par un système de classification. La figure 1.3 montre ce procédé de classification. Les trois variables d'évaluation centrales sont le caractère désirable (*desirability*) d'un événement, l'approbation (*praiseworthiness*) d'une action par rapport aux standards (ou normes) d'un agent, et l'attraction (*appealingness*) d'un objet.

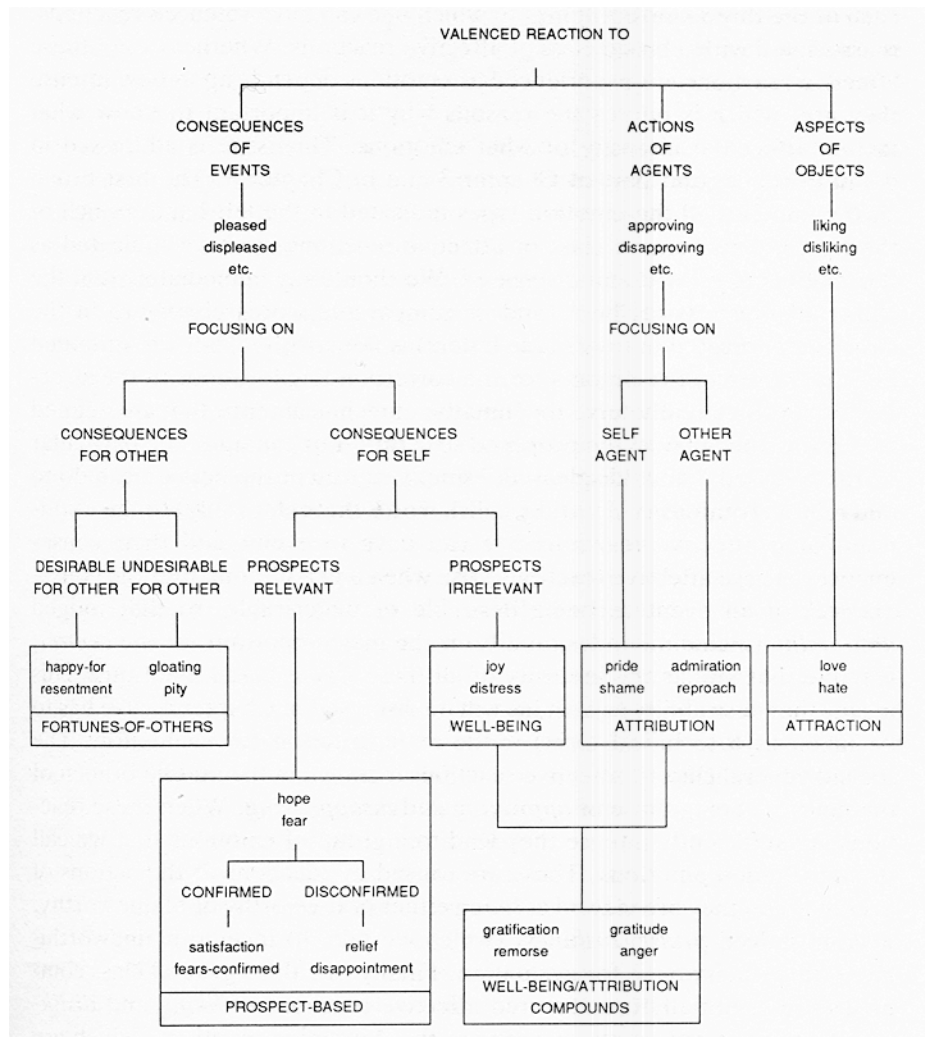
L'intensité d'une émotion est déterminée par la valeur pondérée de certaines variables d'évaluation. Si l'intensité d'une émotion ne dépasse pas un certain seuil, elle est considérée comme non activée. Les auteurs ne donnent pas de formalisation pour le calcul des toutes les émotions, mais considèrent que de telles formalisations peuvent être établies. Des modèles informatiques ont par la suite proposé ces formalisations (Elliott et Siegle, 1993; Gratch et Marsella, 2004; Ochs *et al.*, 2009).

Une limite de la théorie OCC est qu'elle ne s'intéresse pas au déclenchement des comportements. Selon les auteurs de cette théorie, il pourrait bien être impossible de relier directement des catégories d'émotions à des actions, car plusieurs émotions peuvent être associées à la même action, plusieurs actions peuvent être associées à la même émotion, et il peut exister des émotions sans la présence d'action quelconque. La théorie OCC est plus favorable à la notion de *tendances* à l'action, plus générale, évoquée par Frijda (2004).

1.5 Stratégies d'adaptation et tendances à l'action

1.5.1 Théorie générale

Les stratégies d'adaptation (*coping* en anglais) sont les moyens par lesquels nous nous adaptons à notre environnement et aux situations. (Lazarus et Folkman, 1984) distinguent deux types de stratégies : (i) les stratégies d'action et (ii) les stratégies d'adaptation émotionnelle. Par exemple, si un individu fait face à un serpent il peut choisir de combattre

FIGURE 1.3 – Règles d’attribution d’une émotion (Ortony *et al.*, 1988)

ou de fuir. Ce sont des stratégies d’action. S’il décide de ne plus accorder d’importance aux problèmes de son frère pour mieux se concentrer sur son propre travail, il s’agit d’une adaptation émotionnelle. Dans la littérature, les stratégies ou les actions qu’il est possible ou non de réaliser sont considérées comme le « potentiel du sujet à faire face » (*coping potential*) (Roseman et Smith, 2001; Scherer, 1999). D’après Lazarus (1975) l’émotion est une perturbation complexe composée de trois éléments : l’affect subjectif, les modifications physiologiques qui préparent un organisme à agir, et la tendance à l’action, qui peut être instrumentale ou expressive. Selon Arnold (1960) l’émotion est la tendance ressentie dans le fait d’approcher tout ce qui est intuitivement évalué comme bénéfique, ou de s’éloigner de tout ce qui est intuitivement évalué comme dommageable. Cette attraction ou cette aversion est accompagnée d’un pattern de modifications physiologiques organisées autour de l’approche ou de l’évitement.

Dans l’ensemble, les théories émotionnelles s’intéressent davantage à l’évaluation qu’au comportement. De ce fait, l’influence des émotions sur les actions, ou l’association entre les actions et les émotions, n’a pas fait l’objet de nombreux travaux. L’objectif du psychologue Nico Frijda, que nous allons maintenant aborder, est de combler ce manque théorique, en proposant une théorie des émotions orientée sur les tendances à l’action.

1.5.2 N. Frijda : les tendances à l'action

L'apport de la théorie de N. Frijda est de faire le lien entre les émotions et l'action au moyen d'une analyse psychologique. D'après l'auteur (Frijda, 2004), l'émotion est par nature un changement dans notre préparation à l'action. L'action émotionnelle a pour but de maintenir ou de modifier le rapport que nous avons avec un objet ou un événement. Une action a lieu sous certaines conditions incluant : le répertoire des actions disponibles, les coûts et les bénéfices envisagés de chaque action, ainsi que la présence de ressources et de motivations affectant ces coûts et ces bénéfices. Frijda précise qu'il y a toutefois beaucoup d'émotions sans action, et beaucoup d'actions sans émotion évidente.

Les émotions ont été considérées pendant un certain temps uniquement en tant phénomène interne, c'est à dire un état qui est l'amour, la souffrance, ou un ensemble de symptômes physiologiques comme l'excitation. Or, les émotions sont profondément liées à la motivation et à l'action, car elles sont considérées comme des états dirigés vers un but. Selon le psychologue, le sentiment de colère n'est pas équivalent au sentiment d'avoir les poings serrés, qui est la sensation d'un état courant, mais il est équivalent au désir de réduire son opposant au silence par la force, qui est un but. Mettre la motivation au centre de l'analyse des émotions permet de prendre en compte deux concepts bien établis de la motivation : l'intention (*intent*), qui représente les états de fin souhaités en réalisant un comportement, et l'énergie (*energizing*), qui représente l'effort que demande la réalisation d'un comportement. Mordre, frapper, crier ou insulter quelqu'un sert à intimider un adversaire (le but), mais peuvent aussi représenter des coûts (efforts, ressources).

Frijda (1986) énumère 8 catégories de tendances à l'action activées chacune par un contexte particulier. Ces tendances à l'action sont associées à des catégories d'émotion :

1. **l'approche positive** : représente la tendance à s'approcher d'un objet avec une intention positive. L'affection, la tendresse, l'exploration curieuse sont associées à cette tendance à l'action ;
2. **l'agression** : représente la tendance à vouloir blesser quelqu'un physiquement ou psychologiquement, possiblement jusqu'à la destruction. Cette tendance est associée à la colère ;
3. **la panique** : représente la tendance à fuir un danger. Cette tendance est typique de la peur ;
4. **le jeu** : cette tendance joue un rôle fondamental dans l'apprentissage et le développement d'un individu. Elle est associée à la joie et l'amusement ;
5. **l'inhibition** : cette tendance consiste à se figer en présence d'un danger potentiel. Il peut aussi s'agir d'une inhibition mentale. Cette tendance est typiquement associée à l'anxiété ;
6. **le rejet** : cette tendance est associée à la réaction de dégoût. Elle peut être physique (rictus de dégoût face à un goût amer), ou psychologique (dégoût pour un comportement) ;
7. **la soumission** : cette tendance consiste à envoyer des signaux de soumission posturaux ou expressifs, et peut aussi être caractérisée par une faible estime de soi. Elle est associée à l'anxiété sociale ou à la timidité ;
8. **la dominance** : cette tendance est la contrepartie de la soumission. Elle consiste à s'affirmer par rapport à autrui, et elle est associée à l'émotion de fierté.

L'auteur explique qu'il existe 4 conditions qui sous-tendent les actions (Frijda, 2004). Les deux conditions majeures de l'action sont : la *disponibilité* d'un répertoire d'actions

approprié, et le caractère *acceptable* de ce dernier, prenant notamment en compte la notion de coût. La troisième condition est l'*importance* du résultat concerné par l'action, et la quatrième est le *regard social*, représentant la désapprobation ou l'approbation des autres.

L'acceptabilité (*Acceptability*) Les actions estimées comme inacceptables sont supprimées, inhibées ou conduisent à rechercher une alternative. Le fait qu'une émotion mène ou non à une action dépend des conséquences de l'action, qui influencent la régulation émotionnelle et le contrôle. Les émotions surviennent chez un individu quand certains de ses intérêts sont en jeu. Mais les individus ont plusieurs autres centres d'intérêt, et les actions émotionnelles peuvent aussi avoir des conséquences sur ces autres intérêts. Par exemple, si on gagne quelque chose en adoptant un comportement de fuite, on peut aussi perdre le respect que nous avons pour nous-mêmes (*self-respect*). D'après Frijda (2004), l'action est le résultat coût-bénéfice des conséquences d'une action sur les intérêts d'un individu. Ces intérêts incluent la sensibilité à la censure sociale et d'autres formes de punition, mais aussi des intérêts en rapport avec l'empathie, la sympathie, le plaisir procuré par l'harmonie sociale et les avantages de la coopération. Dans une agression colérique, on peut neutraliser un opposant au risque de perdre une harmonie sociale et une amitié, tout en risquant de ne pas obtenir ce qu'on espère au moyen de l'agression (Waal et Aureli (1997), cité par Frijda (2004)). Cependant, envisager les conséquences négatives pour les autres d'une action peut aussi faciliter l'action au lieu de l'inhiber. La colère peut ne pas aboutir aux effets escomptés, mais apporter du prestige social et de l'estime de soi. Prendre sa revanche peut ne pas apaiser la souffrance, mais restaurer un certain pouvoir, une estime sociale et une estime de soi. Les émotions anticipées, c'est à dire celles qui sont censées suivre une action encore non réalisée, jouent un rôle très important dans la balance. Par exemple, on ne se retient pas de blesser quelqu'un parce qu'on se sent coupable, mais parce qu'on imagine la culpabilité qu'on pourrait ressentir après coup (Elster (1999), cité par Frijda (2004)). Les émotions sociales comme la honte ou la jalousie fonctionnent en premier lieu de cette façon.

La Disponibilité (*Availability*) Pour qu'une émotion soit suivie d'une action, il doit exister une action disponible dans le répertoire d'actions courant. Une action *disponible* est une action qui assure des chances de succès, et dont les ressources requises pour son exécution sont disponibles (par exemple, la ressource d'énergie). Si aucune action n'est possible, alors l'émotion tend à changer. Ne pas pouvoir s'échapper d'une situation peut mener à la panique, ou à un désespoir qui tend vers l'apathie (Seligman (1975), Weiss *et al.* (1976), cités par Frijda (2004)). Au contraire si des actions sont disponibles, certaines motivations peuvent être accentuées, en passant par exemple de la colère à la rage. Il existe des actions qui sont quasiment toujours disponibles, car elles ont un coût relativement faible et présentent peu de risque. Il s'agit des actions de type expressif comme pleurer, crier, embrasser, toucher, les expressions faciales, ainsi que les actions se taire et fuir. D'autres types d'action peu coûteuses et peu risquées sont « encourager » ou « désapprouver » les actions des autres. Voter un budget permettant de commettre des actions violentes, et encourager ceux qui ont voté le budget font partie de ces types d'action. Par cet exemple, Frijda veut présenter une mise en contexte socio-politique des émotions. Mais ces actions simples ne sont pas toujours disponibles : la plupart des dangers ne peuvent pas être évités tout simplement en fuyant. Les motivations émotionnelles demandent en général de déterminer des buts, planifier les actions possibles pour atteindre ces buts, et exécuter les actions correspondantes.

L'Importance (*Importance*) L'importance d'un événement est une dimension émotionnelle majeure. Un événement est important quand il affecte fortement certains de nos intérêts (Sonnemans et Frijda (1995), cité par Frijda (2004)). C'est le cas lorsque notre identité est altérée par une humiliation, un traumatisme, ou un bouleversement de nos croyances. Notre identité représente notre conception de ce qui compte ou ce qui ne compte pas dans notre façon de nous voir, ou pour guider nos décisions. Elle forme la base de l'évaluation des événements et la façon dont nous devons leur répondre. Les émotions morales, en relation avec les valeurs ou les idéologies, prennent une place très importante chez un individu. On ressent une joie morale en voyant un tyran vaincu, et une indignation morale en voyant quelqu'un bafouer la vérité, l'amitié ou l'humanité. Les gens peuvent mourir pour défendre de tels principes, parce qu'ils concernent l'identité même d'un individu. Notre univers symbolique et notre conception de nous-mêmes sont impliqués. De plus, le soutien moral vis à vis de croyances ou d'idéologies peut impliquer des millions de personnes, ce qui renforce l'importance des intérêts en jeu.

Le Regard Social (*The Social Eye*) Les trois facteurs décrits précédemment, l'acceptabilité, la disponibilité, et l'importance, sont sous influence sociale. Le fait qu'une action paraisse acceptable ou non dépend des normes sociales, et de ce que les autres attendent de nous. Le fait qu'une préoccupation soit considérée comme importante ou non dépend fortement des croyances. La nature et la force des croyances dépend de l'information distribuée et approuvée par la société. Les propagandes politiques ont pour but de modifier nos croyances afin d'obtenir du soutien vis à vis de certaines actions.

Un individu appartenant à un groupe peut considérer des actions comme acceptables pour plusieurs raisons : parce qu'elles sont habituelles pour son groupe, parce que le groupe exerce une certaine pression, pour renforcer son appartenance et sa loyauté au groupe, ou encore par la contagion émotionnelle qu'un environnement social peut produire. La littérature sur la violence perpétrée par des hommes ordinaires donne un bon exemple de ces phénomènes (Browning (1993)). Les émotions exprimées vis à vis d'un membre du groupe peuvent modifier les normes du groupe, en déterminant ce qui est considéré comme acceptable ou ce qui ne l'est pas. Par exemple, le mépris consiste à considérer qu'une personne a une valeur tellement inférieure qu'elle ne mérite pas de participer à une interaction sociale, alors même qu'elle souhaiterait être considérée comme une égale. Cela conduit à la tendance à l'action de remettre cette personne à sa place, c'est à dire celle d'une personne de valeur inférieure.

En conclusion, pour N. Frijda, les émotions existent à travers l'action. Le fait qu'une action se déclenche va dépendre de la régulation émotionnelle (c'est-à-dire vouloir inhiber ou favoriser un état émotionnel), de la disponibilité d'une action appropriée dans le répertoire d'actions, de l'acceptabilité des actions disponibles, ainsi que de l'importance de l'événement émotionnel et de ses effets. Cette analyse des émotions contraste avec la théorie OCC, où les émotions sont envisagées comme des états déclenchés par l'évaluation d'un événement, et sont subies passivement. Pour N. Frijda, les émotions sont profondément dépendantes de l'action, et l'action est motivée par les effets qu'elle peut produire, permettant de changer la relation entre un individu et son environnement.

1.6 Conclusion

Les travaux présentés ont mis en évidence qu'il existe un grand nombre de théories sur les émotions, présentant des points communs, mais aussi des divergences. La valence,

c'est-à-dire l'aspect positif ou négatif d'un événement, et l'intensité, c'est-à-dire la force de l'affect ressenti, sont des notions communes à toutes les théories. En revanche le nombre d'émotions ou d'affects, la façon de les représenter, et les processus d'évaluation qui y conduisent ne font pas l'objet d'un consensus. En effet, les théories psychologiques considèrent des aspects différents des processus émotionnels, et font également des hypothèses différentes sur ces processus. Dans toutes les théories que nous avons examinées, la théorie OCC (Ortony *et al.*, 1988) semble la plus appropriée pour être utilisée dans un modèle d'intelligence artificielle en raison de sa précision et de sa démarche d'analyse structurale des émotions. Cependant, elle contient un assez grand nombre de variables dont la valeur peut être difficile à déterminer en pratique, et cette théorie n'a pas été pensée pour gérer les comportements. Nous verrons au chapitre suivant quelles implications cela peut avoir pour les modèles informatiques qui s'en inspirent. La théorie des tendances à l'action de Frijda (2004) fournit quant à elle un lien manquant entre l'émotion et l'action. Cette théorie ne comprend toutefois pas de principes généraux suffisamment précis pour être facilement implémentée. Il n'est en effet pas évident d'identifier de façon formelle les facteurs déclenchant une tendance à l'action. Nous verrons au chapitre 3 une autre théorie psychologique orientée sur l'action, moins connue des chercheurs en Informatique Affective, qui propose des principes généraux convenant mieux à une implémentation.

Chapitre 2

Modèles en Informatique Affective

2.1 Introduction

Les modèles en informatique affective ont comme objectif d'améliorer la crédibilité des personnages virtuels, en leur donnant des moyens d'exprimer des émotions, ou de prendre en compte des facteurs émotionnels lorsqu'ils choisissent un comportement. Ces modèles peuvent aussi être un moyen d'expérimenter des théories psychologiques des émotions. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons en particulier aux modèles informatiques qui simulent des catégories d'émotion, de sorte que ces catégories influencent le processus de sélection d'un comportement. Une majorité de ces modèles se fondent en tout ou partie sur la théorie OCC (Ortony *et al.*, 1988), que nous avons présentée dans le chapitre précédent. Nous dressons d'abord un panorama général de ce type de modèle section 2.2, puis nous présentons en détail trois modèles illustrant les caractéristiques de ce type d'approche : *The Affective Reasoner* (Elliott, 1992) en section 2.3, ALMA (Gebhard, 2005) en section 2.4, et EMA (Gratch et Marsella, 2004) en section 2.5. Ces 3 modèles sont également reconnus comme faisant partie des travaux majeurs dans le domaine de l'Informatique Affective, et sont largement cités. Nous mettons en lumière les points forts et les limitations de chacun d'entre eux, que nous pourrions mettre en contraste avec les travaux présentés dans les chapitres suivants, fondés sur un autre type d'approche.

2.2 Principes d'un modèle informatique des émotions

Les modèles manipulant des émotions sont des modèles qui simulent des variables représentant des catégories d'émotion. Ces modèles sont divisés en deux classes selon la représentation des émotions qu'ils adoptent. Les *modèles dimensionnels* utilisent des axes représentant des dimensions affectives, et font correspondre une catégorie d'émotion à une zone de cet espace dimensionnel (Gebhard, 2005). Les *modèles discrets* représentent les émotions par des variables discrètes, souvent associées à une intensité représentant leur niveau d'activation, c'est-à-dire à quel point une émotion est ressentie (Elliott, 1992; Ochs *et al.*, 2009). Dans leur article sur les modèles informatiques des émotions, S. Marsella *et al.* font une distinction entre ces deux types de représentation (Marsella *et al.*, 2010). Ces modèles, profondément inspirés des théories psychologiques sur l'évaluation cognitive des émotions que nous avons abordées section 1.4, ont des caractéristiques communes. Les agents ont des *croyances* sur leur environnement, et parfois des *but*s qu'ils souhaitent atteindre, ainsi que des *plans* leur permettant d'atteindre ces buts. Ces éléments rappellent le modèle BDI, une architecture fréquemment utilisée dans les systèmes multi-agents, dont

certaines modèles affectifs se réclament directement, comme EMA (Gratch et Marsella, 2004).

À la différence d'une architecture BDI classique, les modèles cognitifs affectifs manipulent des *variables affectives*. Un processus d'*évaluation* permet de déterminer une valeur pour ces variables, et elles influencent les *stratégies* choisies par un agent. Les modèles cognitifs se différencient par les variables d'évaluation, les variables affectives, et le type des stratégies qu'ils prennent en compte. Un grand nombre de ces modèles s'inspire de la théorie de l'évaluation cognitive OCC (Ortony *et al.*, 1988), du nom de ses auteurs Ortony, Clore et Collins, qui a été la première théorie psychologique pensée pour être utilisée dans le domaine de l'Intelligence Artificielle. Cette théorie permet de déterminer quelle est l'émotion ressentie par un agent, grâce à une classification établie sur des variables d'évaluation (voir section 1.4.2). Elle a été implémentée pour la première fois par Elliott (1992).

Les travaux précurseurs sur modèles affectifs cognitifs peuvent être illustrés par les travaux de Colby (1981) sur le modèle PARRY, et de Dyer sur les modèles BORIS (Lehnert *et al.*, 1983), OpEd (Mueller *et al.*, 1985), et DAYDREAMER (Alvarado *et al.*, 1986).

Travaux de Colby PARRY est un agent conversationnel conçu et implémenté par le psychiatre Colby (1981), capable de dialoguer avec des utilisateurs humains. PARRY simule une personne paranoïaque pensant être poursuivie par la mafia. L'agent interprète les phrases de l'utilisateur humain afin d'y déceler des intentions malveillantes. Lorsqu'il en détecte une, une émotion est activée selon la nature de l'intention malveillante. S'il s'agit d'une menace physique, l'émotion de peur est activée, s'il s'agit d'une menace psychologique, c'est l'émotion de colère, et s'il s'agit des deux menaces à la fois, c'est l'émotion « méfiance » (*mistrust*). PARRY module l'agressivité de ses réponses verbales en fonction de l'état émotionnel dans lequel il se trouve.

Travaux de Dyer Dyer a participé à la conception de 3 modèles successifs, chacun d'eux apportant un niveau de sophistication supplémentaire par rapport au précédent. Le premier modèle est BORIS (Lehnert *et al.*, 1983), destiné à inférer des émotions à partir de textes narratifs. Ce modèle représente une émotion grâce à 6 attributs : l'*agent* qui ressent l'émotion, la *force* de l'émotion, la *polarité* de l'émotion (positive ou négative), les *attentes* d'un agent (satisfaites ou non satisfaites), le *statut* du but (atteint ou non atteint), et l'*agent vers qui l'émotion est dirigée*. Par exemple, une émotion de polarité positive, dirigée vers aucun agent, dont le but est atteint, mais dont les attentes sont non satisfaites correspond au « soulagement ». L'auteur du modèle ne limite pas la représentation des émotions à un ensemble défini. Il précise qu'il est possible de spécifier n'importe quelle émotion souhaitée, et que l'on peut même définir avec ces attributs des états pour lesquels il n'y aurait pas de mot correspondant dans le langage. Cette caractéristique le distingue des autres modèles, qui proposent généralement un ensemble d'émotions bien défini. OpEd (Alvarado *et al.*, 1986), une extension de BORIS permettant la représentation de croyances. DAYDREAMER (Mueller *et al.*, 1985), conçu à la suite de OpEd, est un modèle affectif intégrant de la planification. Les buts sont divisés en deux parties : il y a les buts à long terme, comme réussir un entretien d'embauche, et les buts de contrôle (*control goals*), qui sont des conditions pour parvenir aux buts à long terme, comme se relaxer pour réussir cet entretien. Il existe 4 buts de contrôle qui sont :

- **la rationalisation** : le but de rationaliser un échec afin de réduire l'impact d'un état émotionnel négatif ;

- **la revanche** : le but d’empêcher un autre agent d’atteindre un but afin de réduire son propre agacement ;
- **le retournement de succès ou d’échec** : le but d’imaginer un scénario avec un résultat opposé afin d’inverser la polarité d’un état émotionnel ;
- **la préparation** : le but de développer des scénarios possibles pour déterminer les conséquences possibles d’une action.

Les modèles de Colby et Dyer sont fondés sur des principes qui vont être utilisés par une majorité de modèles affectifs développés par la suite : ils utilisent des variables d’évaluation mises à jour d’après les entrées du système, ces variables d’évaluation permettent d’activer des variables affectives, et les stratégies d’un agent sont influencées par ces variables affectives. On comprend donc que les trois grands enjeux pour les modèles cognitifs manipulant des variables émotionnelles sont : (i) la définition d’une représentation des émotions, (ii) la définition du déclenchement de ces émotions et (iii) l’influence de ces émotions sur un ensemble d’aspects comme les expressions faciales ou verbales, les stratégies cognitives permettant de réguler ces émotions, les manifestations physiologiques (*e.g.* rougir, trembler), et le comportement (*e.g.* confrontation, évitement).

2.3 *The Affective Reasoner*

L’objectif de *The Affective Reasoner* d’Elliott (1992) est de représenter les affects et la personnalité des agents afin de les rendre plus réalistes. Selon l’auteur du modèle, ces facteurs étaient insuffisamment pris en compte par les modèles d’intelligence artificielle. Pour répondre à cet objectif, il a implémenté la théorie d’évaluation cognitive OCC Ortony *et al.* (1988) pour attribuer des états émotionnels aux agents, et a utilisé ces catégories pour sélectionner des actions de types variés (expressions faciales ou gestes, traitement de l’information, régulation des émotions, planification). Un agent est également capable d’attribuer des émotions aux autres agents par observation de leur comportement et de l’environnement. *The Affective Reasoner* représente 24 émotions, contre 22 dans la théorie OCC. Ce modèle utilise une représentation *discrète* des émotions.

Activation des Émotions L’activation des émotions repose sur la correspondance de *schémas*, déterminée au moyen d’un algorithme d’unification. Les buts, les principes et les préférences d’un agent sont stockés dans une base de connaissance sous forme de schémas, qui représentent ses centres d’intérêt. En parallèle, il existe une file dans laquelle sont stockés des événements, également représentés sous forme de schéma. Lorsqu’un événement est déclenché, son schéma est comparé à ceux des centres d’intérêt de l’agent. S’il existe une correspondance entre un de ces schémas et le schéma de l’événement, alors cet événement est déclaré pertinent pour l’agent, et le processus d’attribution d’émotion est lancé. Dans ce cas, pour chaque correspondance trouvée, le modèle crée une structure appelée EECR (*Emotion Eliciting Relation Condition*), contenant des variables d’évaluationinstanciées d’après la situation. Lorsque la valeur des variables d’une structure EECR correspond à une émotion, alors cette émotion est activée. Plusieurs émotions peuvent donc être activées en même temps.

Une base de données représentant les centres d’intérêt des autres agents est également disponible, afin de permettre à un agent d’inférer si une situation a des conséquences pour d’autres agents. De la même façon, si une correspondance est trouvée entre la situation et les centres d’intérêt d’un autre agent, alors des émotions peuvent être activées. Ces émotions déclenchées par ce qui arrive aux autres agents (*Fortune-of-Others Emotions*) sont distinctes des émotions déclenchées par ce qui arrive à l’agent lui-même (*Direct Emotions*).

Les 9 variables d'évaluation que contient un EECR sont :

- **soi** (*self*) : l'identité de l'agent à qui les émotions sont attribuées ;
- **autre** (*other*) : l'identité d'un autre agent ;
- **désiré par soi** : représente le fait qu'un but de l'agent est atteint (valeur *d*) ou bloqué (valeur *u*) par un événement ;
- **désiré par l'autre** : représente le fait qu'un but de l'autre agent est atteint (*d*) ou bloqué (*u*) par un événement ;
- **satisfaction** (*pleasantness*) : représente le fait que l'agent est satisfait (*p*) ou non (*d*) de la situation de l'autre agent ;
- **statut** : indique le statut de la situation, qui peut-être confirmée (*c*), infirmée (*d*), ou non confirmée (*u*) ;
- **évaluation** : représente le fait que la situation est compatible (*p*) ou non (*b*) avec les principes de l'agent ;
- **agent responsable** : indique l'agent responsable de la situation ;
- **attraction** : représente le fait que la situation est associée à un objet attirant (*a*) ou repoussant (*u*) pour l'agent.

Exemple Plusieurs exemples d'instanciation de structures EECR sont donnés par l'auteur sur la base d'un scénario. Dans ce scénario, Tom, un conducteur de moto, se fait arrêter par un policier et remettre une amende pour excès de vitesse. Cela est représenté comme un événement *indésirable* du point de vue de Tom, ce qui provoque l'émotion de détresse (*distress*) chez Tom. La structure EECR correspondant à cette interprétation est montrée sur le tableau 2.1. Dans le second exemple, Tom est dans la même situation, mais se trouve accompagné par un ami nommé Harry. Harry sait que l'événement est *indésirable* pour Tom, et cet événement est également *déplaisant* pour Harry qui est désolé pour ce qui arrive à son ami Tom. Cela provoque l'émotion de pitié (*pity*) chez Harry. La structure EECR correspondant à cette interprétation de Harry est montrée sur le tableau 2.2. Si Tom considère maintenant que le policier lui a remis une amende à tort, il interprète cet événement d'arrestation causé par le policier comme *injuste*. La structure EECR correspondant à cette autre interprétation de Tom est montrée sur le tableau 2.3.

self	other	desire-self	desire-other	pleasingness	status	evaluation	responsible agent	appeal
Tom		u						

TABLE 2.1 – Structure EECR correspondant à l'émotion de détresse ressentie par Tom (*u* : événement indésirable) (Elliott, 1992)

self	other	desire-self	desire-other	pleasingness	status	evaluation	responsible agent	appeal
Harry	Tom		u	d				

TABLE 2.2 – Structure EECR correspondant à l'émotion de pitié ressentie par Harry à propos de son ami Tom (*u* : événement indésirable, *d* : événement déplaisant). (Elliott, 1992)

Sélection des actions *The Affective Reasoner* permet de sélectionner des actions concernant des domaines variés grâce aux catégories d'émotion déclenchées. Ces domaines in-

self	other	desire-self	desire-other	pleasingness	status	evaluation	responsible agent	appeal
Tom		u				b	policeman	

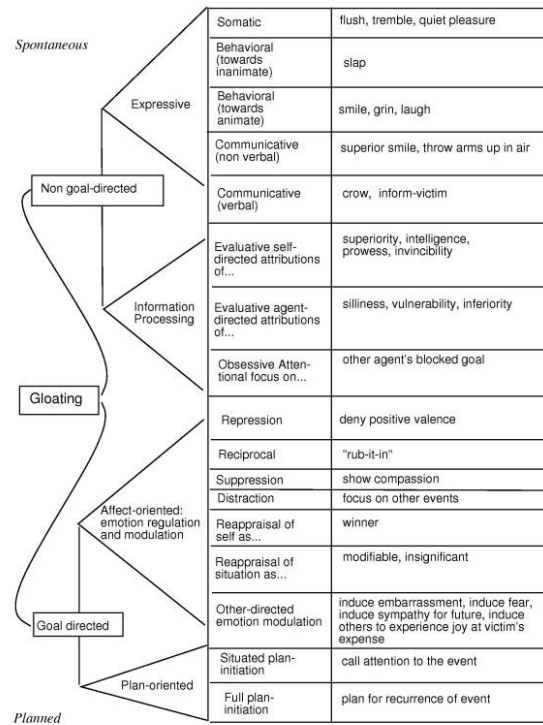
TABLE 2.3 – Structure EECR correspondant à l’émotion de colère ressentie par Tom (u : événement indésirable, b : événement injuste) (Elliott, 1992)

cluent par exemple les réponses d’ordre physiologiques (trembler, rougir), les réponses dirigées vers un objet inanimé (fermer une porte, donner un coup), les réponses dirigées vers un objet animé (pousser quelqu’un), ou encore les réponses de type « plan » (*plan initiation*), visant par exemple à répondre à une menace (par la fuite par exemple). Une émotion déclenchée active un ensemble de comportements, et un comportement est choisi parmi cet ensemble en fonction de la personnalité de l’agent, définie par des traits de tempérament (*temperament traits*). Ces traits doivent être configurés par l’utilisateur du modèle. La personnalité d’un agent est donc équivalente au comportement qu’il adopte dans un certain état émotionnel. L’auteur donne en exemple les actions associées à l’émotion *gloating* (que l’on pourrait traduire par « se réjouir du malheur des autres »), que nous montrons que la figure 2.1. Les réponses pour les autres catégories d’émotion ne sont pas détaillées. Comme plusieurs émotions peuvent être activées, plusieurs réponses peuvent être possibles. Lorsque des actions incompatibles sont planifiées, un processus de sélection aléatoire permet de supprimer ces compatibilités. Le processus de sélection des actions se déroule de la façon suivante :

- à l’arrivée d’un nouvel événement, ce dernier est interprété par un agent. S’il existe des conditions déclenchant des émotions (qui sont déterminées grâce aux EECR), alors elles sont transmises au module de sélection d’action ;
- dans ce module, chaque émotion active une portion du répertoire d’action qui est propre à cet émotion, et propre à cet agent ;
- ces résultats sont filtrés par les traits de personnalité de l’agent, qui servent à déterminer comment l’agent choisit de manifester ces émotions ;
- généralement, une seule action est sélectionnée pour chaque trait de tempérament et chaque émotion.
- l’ensemble des actions sélectionnées sont passés à un module chargé de résolution de conflit, afin de déterminer d’éventuelles incompatibilités entre les actions (par exemple sauter de joie, ou réfléchir calmement). S’il existe des incompatibilités, alors un ensemble d’actions compatibles est choisi aléatoirement par ce module ;
- enfin, les actions sélectionnées sont ajoutées à une file de processus afin d’être réalisées par l’agent.

Points forts et limitations de l’approche La contribution de *The Affective Reasoner* est de fournir un modèle implémenté de la théorie OCC, permettant à un agent de raisonner sur les émotions. Il fournit ainsi à un agent la capacité d’interpréter une situation en lui associant une catégorie d’émotion. Ce modèle propose également un répertoire d’actions varié, allant des expressions faciales aux stratégies cognitives. En revanche, il comporte une limite importante sur la façon dont certaines actions sont sélectionnées. Elles le sont grâce à l’activation de catégories d’émotion, déclenchées en fonction de facteurs propres à un événement. Par exemple, l’émotion de colère survient chez un agent s’il attribue la responsabilité d’un événement indésirable à un autre agent. L’auteur ne donne pas la liste complète des actions associées à la colère, mais on peut imaginer d’après les exemples qu’il

FIGURE 2.1 – Réponses Emotionnelles (Elliott, 1992)



donne que la colère est associée entre autres aux actions « insulter quelqu'un », « frapper quelqu'un », « trembler », et « claquer la porte ». Dans ce cas, il semble cohérent que l'agent puisse exprimer de la colère au moyen d'actions comme « claquer la porte » ou « trembler ». Par contre, on peut s'interroger sur la sélection d'une action impliquant des effets plus importants, telle que « insulter quelqu'un » ou « frapper quelqu'un ». *The Affective Reasoner* semble ne pas prendre en compte l'effet qu'une telle action pourrait avoir, en particulier blesser physiquement ou mentalement l'autre agent, et /ou l'empêcher de nuire. D'après la procédure de sélection de ce modèle, lorsque l'émotion de colère est déclenchée, une action pourrait être choisie aléatoirement entre « insulter quelqu'un » ou « frapper quelqu'un » (éventuellement les deux en même temps si elles sont compatibles). Or cette règle de sélection pourrait produire des comportements incohérents. Par exemple, si se faire doubler dans une file d'attente déclenche de la colère chez l'agent doublé, il va alors frapper ou insulter un autre agent, ce qui se produit peu fréquemment en réalité car ces actions peuvent avoir des effets très négatifs pour l'individu qui en est victime. La prise en compte de ces effets devrait être envisagée pour obtenir des comportements mieux adaptés à la situation. La théorie OCC n'ayant pas été conçue pour sélectionner des actions, on peut comprendre que cette limite apparaisse dans le processus de sélection proposé par *The Affective Reasoner*. Nous allons voir ci-après (section 2.5) que le modèle EMA a su répondre à cette limite, en prenant en compte les effets d'un comportement, et en utilisant les catégories d'émotion uniquement pour la sélection d'expressions faciales.

2.4 ALMA

À la différence du modèle *The Affective Reasoner* (Elliott, 1992), qui utilise une représentation discrète des émotions, le modèle ALMA (Gebhard, 2005) utilise aussi une

+P+A+D	Exubérant (<i>Exuberant</i>)	-P-A-D	S'ennuie (<i>Bored</i>)
+P+A-D	Dépendant (<i>Dependant</i>)	-P-A+D	Dédaigneux (<i>Disdainful</i>)
+P-A+D	Relaxé (<i>Relaxed</i>)	-P+A-D	Anxieux (<i>Anxious</i>)
+P-A-D	Docile (<i>Docile</i>)	-P+A+D	Hostile (<i>Hostile</i>)

TABLE 2.4 – Octants des humeurs de l'espace PAD

représentation dimensionnelle. Il est intéressant de l'étudier pour déterminer quelles implications peut avoir ce type de représentation. D'autre part, ce modèle permet de représenter l'humeur d'un agent, qui est considérée comme un état affectif de plus longue durée qu'une émotion. Cette humeur est utilisée pour sélectionner des comportements expressifs ou verbaux, et permet donc de donner une cohérence dans le temps aux comportements sélectionnés par un agent, en évitant des changements de comportement trop abrupts. Ce travail représente une contribution supplémentaire par rapport à la théorie OCC (Ortony *et al.*, 1988) et à son implémentation, *The Affective Reasoner*, que nous venons de présenter.

L'auteur distingue trois types d'affect :

- **les émotions**, considérées comme un affect à court terme. Elles sont déclenchées à la suite d'un événement, d'une action, ou par un objet. Une fois qu'une émotion est activée, elle s'atténue et disparaît de l'attention de l'agent ;
- **les humeurs**, considérées comme des affects à moyen terme. Elles ne sont généralement pas reliées à un événement concret, une action ou un objet. Ce sont des états affectifs stables ;
- **la personnalité**, considérée comme un affect à long terme par l'auteur. Elle reflète les caractéristiques individuelles d'un agent.

L'activation et l'intensité des 24 catégories d'émotions représentées sont déterminés par le modèle cognitif OCC (Ortony *et al.*, 1988). La représentation des humeurs est fondée sur la théorie Plaisir, Activation et Dominance (PAD) de Mehrabian (1996). Les 5 traits de personnalité utilisés sont issus du modèle BigFive (McCrae et John, 1992). Ces traits sont : l'ouverture à l'expérience, la conscience, le névrosisme, l'agréabilité, et l'extraversion. Le modèle ALMA prend en charge le calcul de l'humeur, et son influence sur les expressions comportementales et verbales de l'agent.

Calcul de l'Humeur ALMA est fondé sur la théorie Plaisir, Activation et Dominance (PAD) de Mehrabian (1996). Cette théorie représente l'humeur sur un espace à trois dimensions qui sont le Plaisir, l'Activation, et la Dominance. Dans le modèle ALMA, chaque dimension s'étend dans un intervalle $[-1, 1]$. L'humeur est déterminée d'après une classification établie sur la valeur des axes : $+P$ et $-P$ pour plaisant et déplaisant, $+A$ et $-A$ pour excité et non excité, ainsi que $+D$ et $-D$ pour dominant et soumis. La classification des 8 humeurs correspondant à ces critères est donnée tableau 2.4.

À l'initialisation de la simulation, une humeur est calculée pour chaque agent i d'après ses traits de personnalité de la façon suivante :

- $Plaisir_i = 0.21 * extraversion_i + 0.59 * agreabilite_i + 0.19 * nevrosisme_i$
- $Activation_i = 0.15 * ouverture_i + 0.30 * agreabilite_i - 0.57 * nevrosisme_i$
- $Dominance_i = 0.25 * ouverture_i + 0.17 * conscience_i + 0.60 * extraversion_i - 0.32 * agreabilite_i$

Ce calcul est issu du modèle PAD (Mehrabian, 1996). Au cours de la simulation, l'évolution de l'humeur dépend des émotions activées chez l'agent. Le modèle de Mehrabian (1996) dresse une correspondance entre plusieurs catégories d'émotions et l'espace PAD.

Emotion	P	A	D	Octant d'Humeur
Admiration	0,5	0,3	-0,2	+P+A-D Dépendant
Colère	-0,51	0,59	0,25	-P+A+D Hostile
Peur	-0,64	0,60	-0,43	-P+A-D Anxieux
Espoir	0,2	0,2	-0,1	+P+A-D Dépendant
Joie	0,4	0,2	0,1	+P+A+D Exubérant
Amour	0,3	0,1	0,2	+P+A+D Exubérant

TABLE 2.5 – Correspondance entre les Émotions et l'Espace PAD

Cependant, certaines des 24 émotions issues du modèle OCC ne sont pas listées dans la théorie PAD. Le concepteur du modèle ALMA a donc du fixer lui même les valeurs PAD des émotions manquantes. Pour cela, il a exploité la similarité de ces émotions manquantes avec d'autres émotions décrites dans le modèle PAD. Le tableau 2.5 donne un exemple des valeurs PAD pour quelques unes des 24 catégories d'émotions, ainsi que leur correspondance avec une humeur.

L'humeur d'un agent est influencée par ses émotions actives. Afin de calculer cette humeur, on détermine d'abord la valeur d'une variable intitulée « centre virtuel de l'émotion » (*virtual emotion center*). Il s'agit du centre de toutes les émotions actives sur l'espace PAD. Ensuite, si la position courante de l'humeur de l'agent se trouve entre le point $[0, 0, 0]$ de l'espace PAD et le centre virtuel de l'émotion, alors l'humeur courante est attirée par ce centre, elle s'en rapproche. L'auteur appelle cela la phase d'*attraction*. Si l'humeur courante de l'agent se situe au même niveau ou au dessus du centre virtuel de l'émotion, alors l'humeur courante est repoussée plus loin dans l'octant de l'humeur dans laquelle elle se trouve. Cela est intitulé la phase de *poussée*. Le temps que prend une humeur pour se déplacer pendant une phase d'attraction ou de poussée a été fixée à 10 minutes.

Sélection Les influences de l'humeur et des émotions d'un agent sur son expression verbale et comportementale sont les suivantes :

- **formulation des phrases** : toutes les phrases des personnages virtuels sont scriptées, et il existe différentes phrases correspondant à différentes humeurs. Par exemple, quand un personnage est d'humeur relaxée les phrases sont plus longues et plus fleuries. S'il est d'une humeur hostile, les phrases sont plus courtes, plus précises et plus rudes.
- **stratégies de dialogue** : si un personnage représentant un professeur est d'humeur relaxée quand un de ses étudiants donne une mauvaise réponse, le professeur fournit une explication détaillée de la question. En revanche si le professeur est d'humeur docile ou s'ennuie, il donne des explications plus courtes.
- **comportement par défaut** : si un personnage est d'humeur hostile son comportement par défaut est de faire des mouvements expressifs de la tête, du regard, et à croiser les bras.
- **caractéristiques des gestes conversationnels** : si le personnage est relaxé, ses gestes et sa posture seront moins prononcés.
- **expressions faciales** : les expressions faciales sont utilisées refléter l'émotion dominante chez un personnage.

Exemple L'exemple donné par l'auteur implique deux agents virtuels, Sven qui est un étudiant, et Valérie son professeur. La tâche de Valérie est de fournir des informations

sur la leçon du jour et de poser des questions. Dans un épisode de simulation, Sven est d’humeur hostile et Valérie est d’humeur relaxée. En raison de son humeur, Sven donne d’abord peu de réponses, et de façon sèche. Mais les encouragements de Valérie rendent peu à peu Sven exubérant, et cela le conduit à des réponses de plus en plus amicales. Dans un autre exemple, l’auteur montre une image représentant le professeur dans une humeur hostile et dans une humeur relaxée, faisant face à la même situation. Sa posture, ses gestes et la façon de formuler ses phrases reflètent son humeur actuelle et son émotion dominante.

Points forts et limitations de l’approche Le modèle PAD est capable de représenter à la fois des états affectifs à court terme, les émotions, et des états affectifs à long terme, les humeurs. L’humeur d’un agent évolue au fil du temps, car elle est influencée par les émotions courantes de cet agent. Cette prise en compte de l’humeur est intéressante pour éviter des problèmes d’oscillation du comportement, pouvant être causés par des émotions variant trop brusquement. Par exemple, un agent pourrait passer d’un sourire à une expression de colère plusieurs fois de suite dans un court laps de temps. Cependant, les limitations du modèle PAD sont similaires à celles du modèle *The Affective Reasoner* concernant la sélection d’un comportement. Elle est apparemment effectuée uniquement en fonction de l’humeur ressentie, sans prendre en compte les effets du comportement produit. Ce modèle utilise également de nombreuses combinaisons de variables numériques pour déterminer les émotions et les humeurs, ce qui peut poser des problèmes dans la configuration du modèle. Par exemple, il semble difficile de configurer la valeur de chaque trait de personnalité d’un agent en anticipant les effets de ces valeurs sur les résultats obtenus.

2.5 EMA

Le modèle EMA (Marsella et Gratch, 2009) prend en charge l’évaluation cognitive d’une situation, et l’influence de cette évaluation sur la sélection de *stratégies d’adaptation*. L’objectif principal des auteurs du modèle est de simplifier certaines théories psychologiques existantes sur l’évaluation cognitive, comme celles de Smith et Kirby (2000) et Scherer (2001), que nous avons abordées section 1.4. Ces théories utilisent plusieurs niveaux parallèles de processus d’évaluation, et d’après Marsella et Gratch (2009) ces différents niveaux compliquent inutilement les processus d’évaluation. Dans le modèle EMA, l’évaluation et l’inférence sont des processus distincts intervenant à un même niveau : la représentation mentale qu’un agent se fait de la situation. Les auteurs font une différence entre la construction de cette représentation, qui peut être lente et séquentielle, et son évaluation, qui est rapide, parallèle et automatique. Les concepteurs du modèle souhaitent que EMA puisse générer des prédictions pouvant être comparées aux véritables réactions de sujets humains. Ils envisagent, dans la tradition de l’Intelligence Artificielle, la simulation informatique comme un moyen d’évaluer les théories psychologiques. Ce modèle utilise une représentation discrète des émotions, permettant de sélectionner des expressions faciales.

Représentation des Connaissances L’état de l’environnement d’un agent est représenté par des conjonctions de propositions, appelés des états, qui sont vrais ou faux en fonction des croyances de l’agent. Par exemple, un état désignant un personnage non blessé (*-INJURED*) qui porte un parapluie (*U-HAVE*) est noté $-INJURED \wedge U-HAVE$. Chaque état est associé à deux variables de décision : la *préférence* de l’agent pour cet état, représentée par une valeur d’utilité $U \in [-100, 100]$, et la *confiance* de l’agent sur la valeur de

vérité de cet état, représentée par une valeur de probabilité $P \in [0, 1]$. Chaque action a que peut faire un agent a des pré-conditions, une durée, et des effets. Une action est associée à deux valeurs de probabilité : $P_E \in [0, 1]$, qui est la probabilité que l'action soit exécutée, et $P_I \in [0, 1]$, qui est la probabilité qu'un agent ait l'intention d'exécuter l'action.

Interprétation Causale Les représentations qu'un agent se fait à propos d'une situation sont réunies dans une structure de données appelée « interprétation causale ». Elle comprend en même temps les plans, les croyances, les intentions de l'agent, mais aussi les événements avec leur probabilité et leur degré d'utilité pour l'agent.

L'interprétation causale est organisée en trois parties : passé, présent, et futur, qui correspondent à un processus de raisonnement. Le passé (*Past*) représente les actions que l'agent imagine s'être produites dans le passé, avec un certain degré de confiance P . Cette partie contient aussi les relations causales entre les actions et les états. Par exemple sur la figure 2.3 extraite des travaux des auteurs (Gratch et Marsella, 2004), l'action « approuver le traitement par morphine » (*Approve Treatment*) qui a été réalisée dans le passé est responsable de l'état « morphine approuvée » (*Morphine Approved*). Le présent (*Present*) représente l'interprétation de l'agent sur la valeur de vérité des états actuels de l'environnement. Par exemple dans la figure 2.3, l'état « morphine approuvée » est vrai selon l'interprétation de l'agent Tom avec une parfaite certitude ($P = 100\%$). Le futur (*Future*) représente les plans que l'agent ou d'autres agents de son environnement peuvent réaliser. Par exemple sur la figure 2.3, on voit que l'agent Tom peut réaliser l'action « donner de la morphine » (*Give-Morphine*). Nous revenons sur l'exemple donné dans cette figure plus tard dans cette section.

L'interprétation causale d'un agent peut contenir de nombreux événements passés ou futurs, qui ont une importance significative pour l'agent. Un événement est considéré comme significatif lorsqu'il facilite ou inhibe un état d'utilité non nulle pour l'agent. EMA peut gérer plusieurs événements de façon simultanée, considérés sous différents points de vue (le propre point de vue de l'agent, et l'idée que se fait l'agent du point de vue des autres agents).

Variables d'Évaluation Les variables d'évaluation utilisées par le modèle EMA (Marsella et Gratch, 2009) sont :

- **le point de vue** : l'utilité d'un état peut varier selon le point de vue de l'agent qui l'évalue. Par exemple, un docteur peut considérer que la mort d'un patient n'est pas souhaitable, mais le patient lui-même peut considérer que sa mort est souhaitable s'il souffre trop ;
- **l'importance** : l'importance d'un état pour un agent est représentée par une valeur d'utilité ;
- **la désirabilité** : un événement est désirable s'il facilite un état avec une utilité positive ou inhibe un état avec une utilité négative, et indésirable s'il facilite un état d'utilité négative, et inhibe un état d'utilité positive ;
- **la probabilité** (*likelihood*) : représente la certitude qu'un agent a sur un événement, c'est à dire s'il va ou non se produire (ou s'il s'est ou non déjà produit). Cette valeur vaut 0 ou 1 ;
- **la prévisibilité** (*expectedness*) : représente le caractère attendu ou non d'un événement ;
- **l'attribution causale** : l'attribution causale permet de déterminer quel agent est responsable d'un état, et plus particulièrement sur quel agent reporter une faute ou un bienfait. Selon les auteurs, elle implique donc également l'intention de l'agent

responsable, représentée par la variable P_I .

- **le contrôle** : le contrôle est la capacité d'un agent à inverser la valeur positive ou négative d'un état au moyen d'une action. Par exemple, si un agent se trouve trop près d'une cible pour la frapper avec un parapluie, le contrôle de l'action « frapper » est faible. Si au contraire il se trouve à une distance suffisamment grande, le contrôle de l'action « frapper » est élevé.
- **le changement** : le changement représente la probabilité qu'un état change grâce à l'intervention d'un agent autre que celui qui est en train d'évaluer la situation.

Les valeurs initiales des variables ci-dessus pour chaque état et chaque agent doivent être déterminées par l'utilisateur du modèle. Au cours de la simulation, elles sont mises à jour en fonction des effets des stratégies qu'un agent sélectionne.

Sélection d'une stratégie Quand un agent effectue une opération cognitive, comme mettre à jour une intention, une fenêtre de création de stratégie (*coping elicitation frame*) est créée. Elle contient des *objets*, qui sont les agents, les tâches et les états concernés par cette opération cognitive. Si la valeur maximum positive ou minimum négative de l'évaluation d'un objet dépasse une constante pré-définie par l'utilisateur du modèle, alors une stratégie d'ajustement concernant cet objet peut être appliquée (les conditions d'application de ces stratégies sont décrites ci-après). Par exemple sur la figure 2.3, l'action « donner de la morphine » (*Give-Morphine*) aboutit aux états « mort précipitée » (*Death Hastened*) et « souffrance terminée » (*End Suffering*). Le premier état représente l'évaluation de valeur négative minimum, et le second représente l'évaluation de valeur négative maximum. Il est donc possible pour l'agent d'appliquer des stratégies sur ces états. Si plusieurs stratégies peuvent être utilisées dans une même situation, une heuristique fixe des préférences pour les stratégies en prenant en compte la capacité de contrôle de la situation, et la probabilité que la situation s'arrange d'elle même (le détail de l'heuristique n'est pas donné). La stratégie préférée est appliquée par l'agent, et s'il reste encore des stratégies applicables, elles sont appliquées séquentiellement par ordre de préférence.

Stratégies Les stratégies d'adaptation (*coping*) sont considérées comme des réponses à une situation émotionnelle négative, qui permettent de modifier cette situation. Les auteurs d'EMA ont choisi de considérer également les réponses face à des événements positifs. Dans leur modèle, une stratégie peut prendre la forme d'un processus psychologique, comme le déni, ou d'une action physique, comme la fuite (Gratch et Marsella, 2004; Marsella et Gratch, 2009). Certaines stratégies ont des effets sur la façon dont un agent interprète une situation, en modifiant par exemple l'utilité ou la probabilité d'un état. Les stratégies d'adaptation implémentées par les auteurs (Gratch et Marsella, 2004) sont :

- **la planification** : elle consiste à élaborer l'intention de réaliser une action (ou une séquence d'actions) permettant d'atteindre un état désiré, ou de bloquer une menace sur un état désiré. Par exemple, si le docteur Tom souhaite réduire l'état de souffrance son patient, il va former l'intention « donner de la morphine » ;
- **la réinterprétation positive** : cette stratégie représente le fait de se focaliser sur les conséquences positives d'un événement, plutôt que sur ses conséquences négatives. Concrètement, elle consiste à augmenter l'utilité des conséquences positives d'un événement. Par exemple, en début de simulation le docteur Tom pourrait ne pas donner de morphine à son patient parce qu'il pense que le coût de cette action (précipiter la mort du patient) dépasse les bénéfices (réduire la souffrance du patient). Après l'application de la stratégie de *réinterprétation positive*, le bénéfice pourrait dépasser le coût. La valeur de l'augmentation de l'utilité d'un état pour

- cette stratégie est fixée par l'utilisateur du système ;
- **l'acceptation** : cette stratégie représente le fait d'accepter qu'une conséquence négative soit inévitable. Elle peut être appliquée pour l'évaluation de valeur négative minimum (c'est-à-dire généralement un événement très négatif). Lorsqu'elle est appliquée, le module de planification arrête la recherche de plans ayant pour but d'éviter cette conséquence.
 - **déni / pensée positive** : représente le fait de nier la réalité d'un événement. Cette stratégie consiste à attribuer à certains événements négatifs une probabilité plus faible de se produire. Elle peut être appliquée pour l'évaluation de valeur négative minimum. L'ajustement de cette probabilité doit être définie par l'utilisateur ;
 - **le désengagement** : cette stratégie représente le fait qu'un agent s'investisse moins par rapport à un but en diminuant l'utilité d'un état désiré. En conséquence, l'agent abandonne les actions visant à atteindre cet état. Cette stratégie est distincte de l'*acceptation*, dans laquelle l'utilité est inchangée.
 - **réattribution de la responsabilité (*shift blame*)** : cette stratégie consiste à attribuer la responsabilité d'une action à un autre agent. Elle peut être appelée lorsqu'un événement a des conséquences négatives à cause de l'agent évaluant la situation. Ce dernier peut alors attribuer la responsabilité de cet événement à un autre agent.

Émotions Le modèle EMA peut déterminer une émotion ressentie par un agent en fonction de la probabilité et de l'utilité d'un événement (voir figure 2.2). Ces émotions sont utilisées uniquement pour la sélection d'expressions faciales, et n'interviennent pas dans la sélection des stratégies d'adaptation (Marsella et Gratch, 2009).

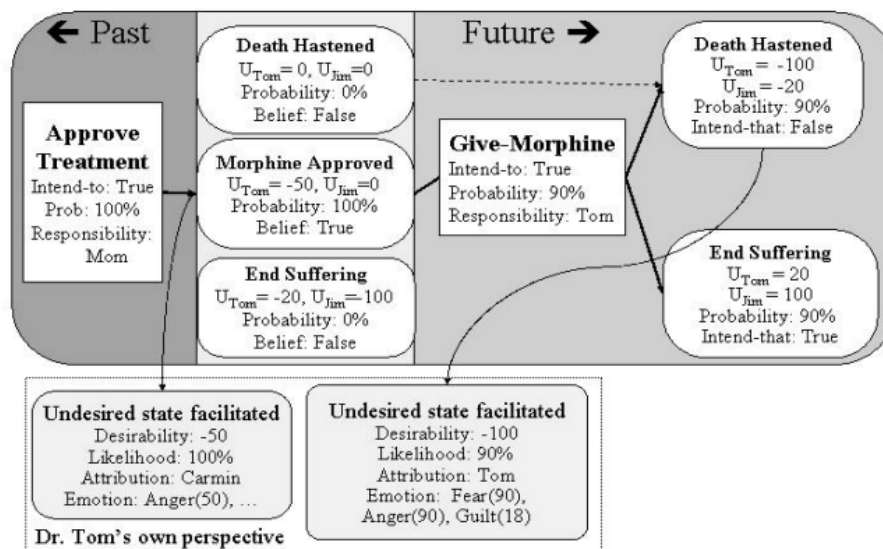
FIGURE 2.2 – Attribution des Emotions (Marsella et Gratch, 2009)

Table 2: Mapping from appraisal pattern to emotion label	
Appraisal pattern for proposition "p"	Emotion
Expectedness(self, p) = low	Surprise
Desirability(self, p) > 0 & Likelihood(self, p) < 1.0	Hope
Desirability(self, p) > 0 & Likelihood(self, p) = 1.0	Joy
Desirability(self, p) < 0 & Likelihood(self, p) < 1.0	Fear
Desirability(self, p) < 0 & Likelihood(self, p) = 1.0	Sadness
Desirability(self, p) < 0 & Causal attribution(self, p)=other & Controllability(self, p) ≠ low	Anger
Desirability(other) < 0, causal attribution(p)=self	Guilt

Exemple Les auteurs donnent un exemple du déroulement de la dynamique du modèle EMA sur un scénario mettant en scène trois agents : un patient malade nommé Jim, un médecin nommé Tom, et la mère du patient malade. Le médecin peut réaliser l'action « donner de la morphine » (*Give-Morphine*), ce qui a pour effet de soulager la douleur du patient Jim en aboutissant sur l'état « souffrance terminée » (*End Suffering*), mais aussi de précipiter sa mort en aboutissant à l'état « mort précipitée » (*Death Hastened*). Le premier état est désirable pour le médecin, mais le second est fortement indésirable. La mère de Jim a la possibilité de réaliser l'action « approuver le traitement par morphine » (*Approve Treatment*), autorisant ainsi le docteur à réaliser l'action « donner de la morphine ». Dans ce scénario, les auteurs expliquent l'évolution de l'interprétation de la situation par Tom.

À un point du scénario, la mère du patient malade a approuvé un traitement à base de morphine pour son fils Jim, ce qui autorise le médecin à réaliser l'action « donner de la morphine » dans le futur. Or, cet événement conduit à l'état « mort précipitée », qui a une utilité fortement négative pour le médecin ($U_{Tom} = -100$) et une probabilité très élevée de se produire ($P = 90\%$). L'interprétation causale de Tom à ce moment est montrée sur la figure 2.3. Tom utilise alors la stratégie de *déni*, lui permettant de réduire la probabilité que la mort de son patient soit accélérée. À l'itération suivante, la probabilité de l'état « mort précipitée de Jim » est diminuée grâce à cette stratégie ($P = 12,5\%$). Cette nouvelle interprétation de Tom est montrée sur la figure 2.4. L'application de cette stratégie représente le fait que le médecin pense finalement qu'il y a de faibles chances que son patient meure.

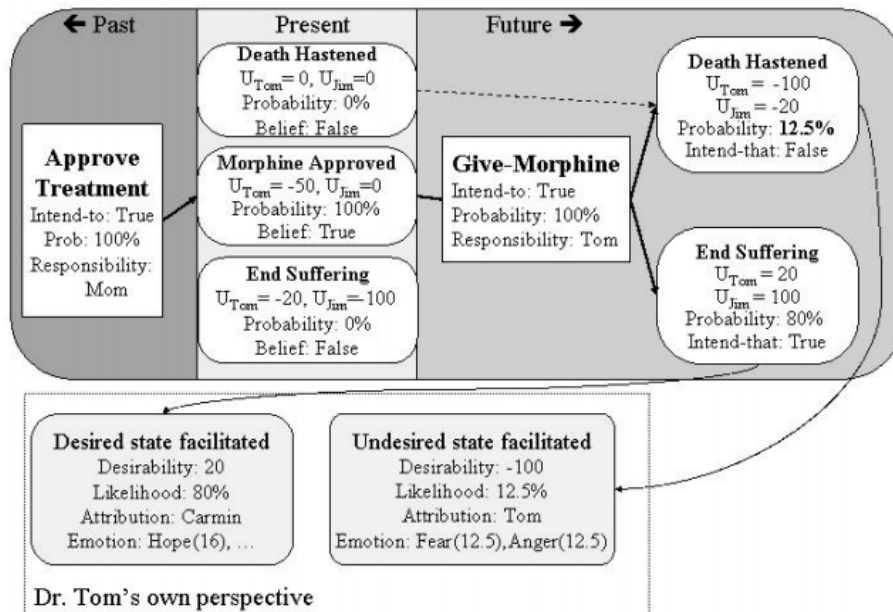
FIGURE 2.3 – Interprétation causale de Tom après que la mère ait approuvé le traitement par morphine (Gratch et Marsella, 2004)



Points forts et limitations de l'approche Le modèle EMA est fondé sur une architecture décisionnelle classique, où un agent prend une décision en fonction de l'utilité des états accessibles et de leur probabilité. La valeur ajoutée de ce modèle est de permettre à un agent de modifier les valeurs numériques associées à ces états, en les réinterprétant grâce à différentes stratégies. Les auteurs assimilent ce processus de réinterprétation à des réponses émotionnelles. Cette approche est intéressante pour tester des hypothèses psychologiques sur les stratégies d'adaptation. Toutefois, si l'on souhaite appliquer ce modèle en simulation multi-agents, deux problèmes importants se posent :

1. **les paramètres** : il y a un nombre assez important de paramètres numériques à définir pour chaque agent par le concepteur du modèle, et la définition de ces valeurs ne semble pas intuitive (notamment les différentes valeurs de probabilité). De plus, le concepteur du modèle doit définir lui-même dans quelle mesure les valeurs des variables sont modifiées par certaines stratégies. Par exemple, il faut définir de combien augmente l'utilité d'un état quand un agent utilise la stratégie *réinterprétation positive*.
2. **le déclenchement des stratégies** : les conditions dans lesquelles sont appliquées les stratégies ne semblent pas suffisamment définies. Par exemple, la stratégie de *ré-*

FIGURE 2.4 – Interprétation causale de Tom après qu’il ait appliqué la stratégie de « déni » (Gratch et Marsella, 2004)



interprétation positive peut-être appliquée pour augmenter l'utilité d'un état positif. Si elle est tout le temps applicable, et renouvelable dans le temps, cela signifie que les conséquences positives d'une action finiront toujours par l'emporter. Ainsi, si un agent a la possibilité d'assommer un piéton dans la rue pour lui voler de l'argent, et que cette action conduit à deux états : « piéton assommé » avec une utilité de -50 , et « agent riche » avec une utilité de 20 , au bout d'un certain temps l'utilité de « agent riche » va l'emporter sur celle de « piéton assommé », et l'agent va choisir d'assommer le piéton. Sur le long terme, il n'y a donc pas de cohérence avec les utilités initialement définies, et cela pourrait conduire à la réalisation de comportements peu crédibles. Le même type de problème se pose pour les autres stratégies.

Ces deux types de problèmes peuvent rendre ce modèle difficile à utiliser dans une simulation multi-agents où les agents doivent conserver un comportement cohérent quelque soit le scénario auquel ils sont confrontés.

2.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les principes des modèles informatiques manipulant des variables affectives, et détaillé le fonctionnement de trois d'entre eux. Ces modèles consistent en deux phases : une *phase montante* permettant de déterminer quel état affectif est ressenti par un agent à l'aide d'un raisonnement, et une *phase descendante*, consistant à appliquer les effets de l'émotion ressentie sur la sélection d'action. Ces modèles permettent à un agent de simuler des comportements expressifs (voix, visage, posture), et lui donnent le moyen d'interpréter une situation avec une émotion, afin de communiquer l'état émotionnel ressenti. Cependant, nous avons constaté que la configuration de ces variables affectives peut être une tâche difficile, et que déterminer une association entre des catégories d'émotion et des comportements peut poser certains problèmes, par exemple parce qu'un même comportement peut être associé à plusieurs catégories. Dans le chapitre

suivant, nous présentons des travaux en psychologie reposant sur une approche *constructiviste* des émotions, dont les modèles informatiques peuvent s'inspirer pour contourner ces limitations.

Chapitre 3

Autres théories psychologiques importantes

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons des travaux en psychologie fondamentaux pour les contributions présentées dans cette thèse. Ces travaux semblent avoir été peu utilisés par les modèles existants en Informatique Affective, et nous allons voir qu'ils offrent des solutions compatibles avec nos objectifs de recherche. Nous souhaitons définir un modèle d'émergence des émotions, dont le principe est de considérer que les catégories d'émotion sont des interprétations d'un observateur humain à propos des comportements produits par le modèle. Elles n'ont ainsi pas besoin d'être simulées dans l'architecture du modèle. Cette approche est motivée par la théorie constructiviste des émotions, que nous présentons section 3.2. D'autre part, si la sélection de ces comportements ne repose pas sur des catégories d'émotion, il est alors nécessaire de déterminer quels processus en sont à l'origine. Comme nous souhaitons définir un modèle de simulation pour des personnages virtuels, ces processus doivent être capables de rendre compte d'une grande variété de comportements, individuels ou sociaux. De plus, ils doivent être suffisamment généraux pour être appliqués à différents scénarios. Nous verrons section 3.3 que la théorie COR proposée par le psychologue S. E. Hobfoll (Hobfoll, 1989, 1998) offre une base théorique nous permettant de définir un tel modèle. La notion de ressource jouant un rôle central dans la théorie COR, nous nous intéresserons également aux théories des besoins dans la section 3.4. Cette analyse complémentaire à la théorie COR nous permettra de mieux identifier les différents types de ressource existant pour un individu, sur le plan matériel, social, ou psychologique.

3.2 La psychologie constructiviste

3.2.1 Définition

D'après la théorie constructiviste, chaque phénomène mental que les personnes ressentent et nomment, comme par exemple la sensation d'une émotion, est un événement composé d'éléments de base qui ne sont eux-mêmes pas spécifiques à ce phénomène. C'est-à-dire qu'un même élément peut-être impliqué dans plusieurs phénomènes à la fois. Ces phénomènes sont donc créés par construction, et n'existent pas de façon isolée. Selon Barrett et Bliss-Moreau (2009), les approches constructivistes en psychologie ont été fondées par Wundt et Judd (1894) et James (1890). James a travaillé sur la façon dont les aspects

sensoriels, viscéraux, moteurs, vasculaires, forment les blocs élémentaires de la pensée, et Wundt s'est attaché à la contrepartie mentale de ces signaux qu'il a appelée « affect ». L'affect se construit sur les sensations internes et externes perçues par un individu. Selon Wundt, les états affectifs ont trois qualités indépendantes : (i) le caractère « plaisant / déplaisant » (*pleasantness*), correspondant à la valence, (ii) « l'excitation / dépression » (d'après Sander et Scherer (2009), cette dimension est décrite comme actif/passif dans des recherches ultérieures), (iii) la « tension / relaxation ». L'auteur pense que les émotions sont des compositions d'éléments psychiques. Les éléments de base des émotions seraient l'affect et les idées reliées au vécu d'expériences précédentes. Cette définition de l'émotion est très proche du point de vue de Barrett et Bliss-Moreau (2009), selon lequel les émotions sont construites grâce à des conceptualisations.

La perspective *socio-constructiviste* considère quant à elle que la plupart des comportements, attitudes, états de l'être humain sont des constructions purement sociales et culturelles (Gergen, 1985), cité dans Nugier (2009)), c'est à dire des connaissances acquises par le biais de la socialisation, construites par une culture pour cette culture (Niedenthal, 2007). Les socio-constructivistes reprochent à la plupart théoriciens des émotions basiques de trop s'attarder sur les ressemblances entre les cultures, et pas assez sur leurs différences (Nugier, 2009). Comme nous l'avons vu (section 1.3.2), les termes émotionnels ne désignent pas les mêmes choses d'une langue à l'autre. Ces études sur le langage constituent le support de la perspective socio-constructiviste, qui situe l'interprétation au cœur du déclenchement de l'émotion.

3.2.2 Le Constructivisme selon L.F. Barrett

La psychologue L.F. Barrett apporte une vision moderne de la théorie constructiviste, en considérant les connaissances actuelles sur les émotions dans plusieurs disciplines (Barrett, 2006; Barrett et Bliss-Moreau, 2009). Sa thèse principale est que les émotions ne sont pas des objets existant en soi, mais des perceptions façonnées par notre culture et notre façon de voir les choses. Les émotions seraient nommées à la façon des couleurs, qui correspondent à des découpages différents selon les cultures. Pour la psychologue, l'émotion est le résultat d'un acte de catégorisation, c'est à dire une interprétation, d'une perception affective.

Selon Barrett (2006), les individus pensent souvent que faire l'expérience d'une émotion donne accès à l'émotion elle-même. Elle affirme que dans le domaine de la psychologie, les chercheurs considèrent souvent que les gens font l'expérience d'une émotion parce qu'ils « ont » cette émotion. Cette idée les conduit à penser qu'une émotion est un mécanisme interne guidant un petit ensemble de réactions. Ils admettent par exemple qu'un individu ressent de la peur quand le mécanisme de peur est déclenché, et que ce sentiment façonne sa perception et ses décisions. L'expérience d'une émotion est considérée comme une preuve claire que l'émotion a été déclenchée. Mais selon l'auteur, ce n'est pas parce que les gens associent automatiquement un comportement à une émotion de « peur » que cette peur représente un concept valide sur le plan scientifique. Ainsi le comportement figement (en anglais *freezing*), qui consiste à rester immobile en présence d'un danger, est un comportement qui est lié sémantiquement à la peur, mais cela ne signifie pas qu'il existe un module de peur provoquant ce comportement. L'objectif de Barrett (2006) est de présenter une approche différente, selon laquelle les émotions ne sont pas considérées comme des entités, mais des interprétations. Nous avons illustré sur la figure 3.1 la vue « entité » des émotions (d'après Barrett (2006)) , et sur la figure 3.2 une vue des émotions comme des interprétations.

Dans son travail, Barrett (2006) s'appuie entre autres sur des travaux en physiologie et

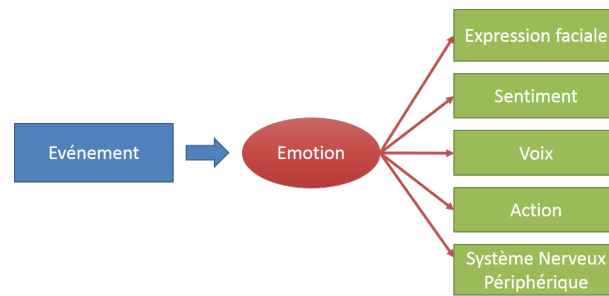


FIGURE 3.1 – Illustration de la vue entité des émotions, d’après Barrett (2006).

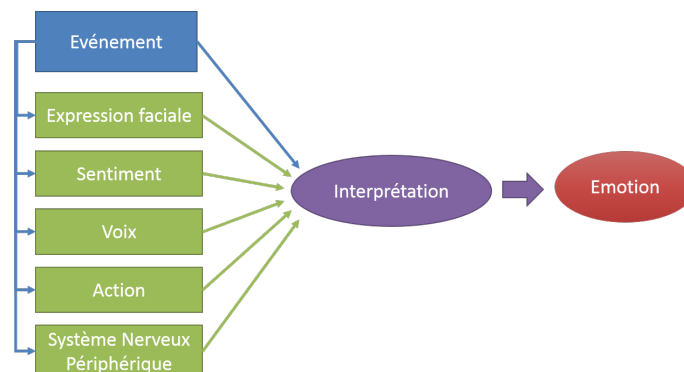


FIGURE 3.2 – Illustration de la vue des émotions comme interprétations.

en neurobiologie. Elle affirme qu’en général, les études ne trouvent pas de signaux physiologiques distinctifs correspondant à chaque émotion de base (comme la joie ou la colère). Par exemple, le système nerveux périphérique montre des réponses spécifiques dans des conditions de menace ou de défi ainsi que pour les affects négatifs versus positifs, mais ces réponses ne permettent pas la différenciation entre des émotions comme la colère, la tristesse ou la peur. En ce qui concerne les expressions faciales, les mesures effectuées sur la contraction des muscles faciaux permettent surtout d’établir des distinctions sur les affects positifs et négatifs, ainsi que sur l’intensité. Il en est de même pour les réponses comportementales comme le combat ou la fuite, qui semblent davantage correspondre à la situation dans laquelle se trouve un individu plutôt qu’à une catégorie d’émotion. Une étude de Lang *et al.* (1990) montre que la peur peut être associée à plusieurs réponses comportementales allant du comportement du figement (*freezing*) au combat. Selon Barrett il y a donc plusieurs comportements correspondant à la même émotion, et plusieurs émotions correspondant au même comportement. Ce point de vue rejoint celui évoqué par Ortony *et al.* (1988) dans la théorie OCC. D’après Barrett (2006), beaucoup de théoriciens affirment que les émotions ont un support neurobiologique, cependant aucun corrélat ne semble avoir été trouvé pour la colère, la tristesse, le dégoût, la joie. L’amygdale, une aire du cerveau souvent associée à la peur, pourrait en fait être associée au traitement de la nouveauté ou de l’incertitude (Schwartz *et al.* (2003); Davis *et al.* (2001), cités dans Barrett (2006)). L’activation de l’amygdale ventrale semble aussi bien associée à la surprise qu’à la peur (Kim *et al.* (2003, 2004), cités dans Barrett (2006)). Concrètement, les scientifiques n’ont aucun moyen de mesure pour déterminer objectivement l’émotion ressentie par un individu. Quand on veut savoir si une personne ressent une émotion, on doit le

lui demander, et la réponse verbale de cette personne est le seul moyen d'identifier cette catégorie.

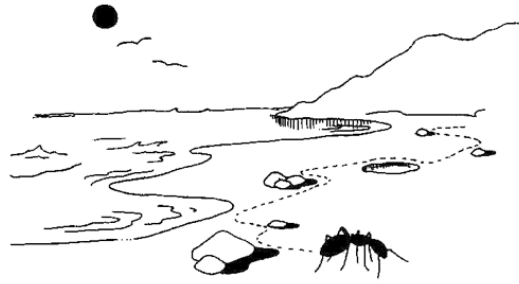
Selon Barrett (2006), suffisamment de preuves ont été accumulées pour affirmer que le manque de cohérence dans la description scientifique de chaque catégorie d'émotion est plutôt la règle que l'exception. Pour la psychologue, une hypothèse compatible avec ce manque de cohérence est de considérer les émotions comme des catégorisations construites par un individu, et non comme des entités primitives biologiquement inscrites en chacun de nous.

3.2.3 Implications de la psychologie constructiviste pour les modèles informatiques des émotions

L'idée centrale du constructivisme est donc que les émotions sont des constructions, individuelles et culturelles, et non des entités fixes ancrées biologiquement. Elles sont construites à partir de plusieurs éléments comme les sensations d'un individu (*e.g.* rythme cardiaque, température corporelle) et la situation dans laquelle il se trouve (*e.g.* présence d'un danger, réussite d'une épreuve). Nous avons vu au chapitre 1 section 1.3 que d'après certaines théories (James, 1890; Schachter et Singer, 1962), l'état d'excitation d'un individu peut-être interprété différemment en fonction de la situation dans laquelle se trouve ce dernier, c'est-à-dire en fonction des autres éléments du contexte en plus de cet état d'excitation. Si les termes désignant les émotions sont des constructions faites à partir de combinaisons de plusieurs éléments, et dépendant de nos connaissances pour désigner ces combinaisons, il peut en exister une infinité. Comme nous l'avons vu, les termes désignant les émotions font partie d'un vocabulaire ouvert : ils n'ont pas d'équivalent strict de culture à culture, voire aucun équivalent, et certains ont disparu ou sont apparus au cours de l'histoire d'une même langue. Dans ces conditions, faut-il utiliser des catégories d'émotion dans l'architecture des modèles informatiques ? Sait-on réellement à quoi ces termes correspondent ? Ne faut-il pas s'intéresser, comme le suggère Wierzbicka (2009), aux éléments basiques dissimulés sous ces termes, plutôt que de tenter de faire une liste de toutes leurs combinaisons et interprétations possibles ? Les auteurs de la théorie OCC, que nous avons présentée en section 1.4.2, ont eu comme objectif de ne pas proposer une théorie à propos des « mots » désignant les émotions. Pourtant, leur analyse structurelle est bien organisée autour de mots désignant des catégories d'émotion. Lourenço (2001) nous met en garde sur l'utilisation des mots en psychologie, qui peuvent biaiser un raisonnement scientifique et cacher certains concepts pertinents.

Ces interrogations nous amènent à un exemple bien connu présenté par Simon (1969), qui est celui du trajet d'une fourmi. L'auteur propose d'imaginer une fourmi qui avance sur une plage, et poursuit : « Observons cette fourmi poursuivant laborieusement son chemin à travers une grève modelée par le vent et les vagues. Elle avance tout droit, tourne à droite pour escalader plus facilement une petite dune abrupte, contourne un caillou, s'arrête un instant pour échanger quelques informations avec un compatriote. » Ce comportement peut paraître complexe, et si on soumet le dessin du trajet de la fourmi à un observateur, il va provoquer des réactions diverses et probablement des réponses variées à ces questions (voir le dessin présenté sur la figure 3.3). Selon Volken (2001), certains pourront voir dans ce dessin la trace d'un grimpeur habile dans une paroi difficile et accidentée, ou celle d'un bouchon flottant sur un torrent sauvage, d'autres y verront la folle course d'un joueur de rugby portant le ballon vers le but adverse ou encore l'enregistrement du cours d'une action soumise aux aléas de la bourse. Pourtant, les mécanismes à l'origine du trajet de la fourmi sont simples.

FIGURE 3.3 – Trajet d'une fourmi sur une plage (Simon, 1969)



Faisons le rapprochement entre ce scénario de la fourmi et l'étude des émotions : les mécanismes de base qui régissent le déplacement de la fourmi sont les *blocs élémentaires* à l'origine de son trajet, et la façon dont on peut qualifier ce déplacement particulier sont des *interprétations* ce trajet. Par exemple, si un observateur dit que la fourmi « fait un virage à gauche », il s'agit d'une interprétation de l'observateur évoquée par la forme particulière du trajet. Ce sont les connaissances de l'observateur, la façon dont il a appris à catégoriser le monde dans son milieu culturel, qui lui permettent de dire qu'à ce *pattern* particulier correspond l'expression « virage à gauche ». Mais cela ne signifie pas que parmi les mécanismes de base permettant à la fourmi de se déplacer, il existe un mécanisme de « virage à gauche ».

Dans cet exemple, nous pouvons considérer qu'un terme émotionnel est équivalent à une interprétation telle que « virage à gauche », et que les mécanismes de base régissant le déplacement de la fourmi sont les blocs de base évoqués par la psychologie constructiviste. Si on adopte cette approche dans la conception d'un modèle informatique, on ne peut pas utiliser les termes émotionnels comme blocs de base pour la sélection du comportement. Ces termes émotionnels sont considérés comme des catégorisations, utilisés pour synthétiser des informations et les communiquer, ce qui est la fonction première du langage. Une question se pose alors d'emblée : quel sont les blocs de base étant à l'origine des comportements pouvant être qualifiés par des termes émotionnels ? La théorie du psychologue (Hobfoll, 1989) semble apporter une réponse à cette question.

3.3 Théorie de la COnservation des Ressources (*COR theory*)

3.3.1 Principe général

La théorie de la conservation des ressources est une théorie sur le stress proposée par le psychologue S. E. Hobfoll (Hobfoll, 1989, 1998). Son but est de pouvoir prédire le niveau de stress d'un individu, et de déterminer les actions pouvant lui permettre de réduire ce stress. Il s'agit d'une théorie traitant du fonctionnement normal d'un individu, non atteint d'une pathologie psychologique. Le concept central de la théorie COR est la notion de ressource, qui représente tout ce qui a de valeur pour un individu, et qui se présente sous la forme d'objets, de conditions, de caractéristiques personnelles ou d'énergie. Concrètement cela signifie qu'une ressource peut être un objet matériel représentant une voiture aussi bien qu'une ressource psychologique comme l'estime de soi. Nous reviendrons ci-après en détail sur la description de ces types de ressources.

L'idée générale de cette théorie est que les gens s'efforcent de conserver, protéger et faire prospérer leurs ressources. Le *stress* survient chez un individu lorsque :

1. des ressources sont menacées d'être perdues :

2. des ressources sont effectivement perdues ;
3. des efforts ont été investis pour obtenir des ressources, mais ils n'ont pas été récompensés.

Lorsque les individus sont confrontés à des menaces sur leurs ressources, ils cherchent à les protéger. Lorsqu'ils ne sont pas confrontés à des menaces, ils s'efforcent de développer des surplus de ressources pour compenser la possibilité d'une perte future. Lorsqu'ils développent des surplus de ressources, ils éprouvent un bien-être positif, appelé *eustress*. Le modèle de conservation de ressources est orienté vers l'action, car il précise ce que les individus font lorsqu'ils sont confrontés ou non au stress.

La théorie COR repose sur deux principes fondamentaux :

1. *les pertes de ressources sont beaucoup plus significatives pour un individu que les gains de ressources.* En conséquence, la motivation à éviter une perte de ressource est beaucoup plus puissante que la motivation à gagner une ressource. L'auteur précise qu'il n'est pas possible de mesurer précisément cette différence, mais qu'elle est très importante. Il s'appuie des travaux en psychologie pour affirmer que la perte joue un rôle fondamental dans le stress ressenti par un individu, et que les événements les plus importants du point de vue d'un individu sont ceux associés à des pertes de ressources. Par exemple, d'après les travaux de T.H. Holmes et R. H. Rahe (Holmes et Rahe, 1967) cités par Hobfoll, la perte d'un époux / d'une épouse et le divorce sont jugés chacun comme des événements plus importants qu'un mariage.
2. *les individus doivent investir des ressources dans le but de prévenir des pertes futures, ou favoriser des gains futurs.* Les individus peuvent par exemple dépenser du temps ou de l'argent dans le but d'obtenir d'autres ressources. La confiance est un autre exemple de ressource pouvant être investi dans une relation. Si la relation réussit, elle apporte de nouvelles ressources et l'investissement de départ est récompensé.

La théorie COR considère aussi bien le plan individuel que collectif. Un individu peut faire appel à un groupe afin d'obtenir les ressources souhaitées, et le groupe peut exercer des demandes en ressources sur un individu. Par exemple, en situation de stress il est fréquent pour un individu de chercher des ressources de soutien social, en allant discuter avec ses amis ou sa famille. Il peut également exister des rivalités entre les groupes, lorsqu'ils entrent en compétition pour obtenir des ressources. Hobfoll cite en particulier le travail de Caughey (1975), décrivant comment des groupes de mineurs se sont opposés pour obtenir un droit d'exploitation sur des terrains.

Une autre idée importante de la théorie COR est la notion de *spirale des pertes* et de *spirale de gains*. Lorsqu'un individu dispose de peu de ressources, il aura davantage de difficultés à protéger les ressources qui lui reste, et à investir de nouvelles ressources pour prévenir les pertes futures et en gagner de nouvelles. C'est ainsi que peut s'engager une *spirale des pertes* pour cet individu. Au contraire, plus un individu possède de ressources, moins il est affecté par les pertes, et plus il peut investir pour prévenir des pertes potentielles et gagner de nouvelles ressources. Il se retrouvera alors dans un processus de *spirale des gains*.

Pour Hobfoll (1998), les ressources convoitées par un individu dépendent avant tout de son milieu culturel. Son approche est différente de celle de Maslow *et al.* (1970) que nous présentons ci-après section 3.4.2, selon laquelle les grands types de besoins d'un individu sont innés. Grâce à une expérimentation menée sur des participants, S. E. Hobfoll a isolé 74 ressources qui représentent les ressources les plus valorisées pour la société occidentale. Elles sont présentées dans le tableau 3.1. On peut remarquer sur ce tableau que certaines ressources sont citées en double, puisque la même ressource est évoquée pour plusieurs

acteurs. Par exemple : « santé pour soi-même », « santé pour ses enfants », « santé pour son conjoint/partenaire », « santé pour la famille, les amis ». Il y a également certaines ressources qui apparaissent plusieurs fois sous une forme différente comme « argent pour acheter des extras », « argent pour épargner, pour les cas d'urgence », « argent pour se déplacer », « aide financière », « crédit financier », « stabilité financière ». La santé, le temps, l'argent, l'affection et la compétence sont des types de ressources qui ressortent clairement de cette liste, apparaissant sous des dénominations différentes.

Personal transportation (car, truck, etc.)	Adequate food	Adequate financial credit
Feeling that I am successful	Larger home than I need*	Feeling independent
Time for adequate sleep	Sense of humor	Companionship
Good marriage	Stable employment	Financial assets (stocks, property, etc.)
Adequate clothing	Intimacy with spouse or partner	Knowing where I am going with my life
Feeling valuable to others	Adequate home furnishings	Affection from others
Family stability	Feeling that I have control over my life	Financial stability
Free time	Role as a leader	Feeling that my life has meaning/purpose
More clothing than I need*	Ability to communicate well	Positive feeling about myself
Sense of pride in myself	Providing children's essentials	People I can learn from
Intimacy with one or more family members	Feeling that my life is peaceful	Money for transportation
Time for work	Acknowledgment of my accomplishments	Help with tasks at work
Feelings that I am accomplishing my goals	Ability to organise tasks	Medical insurance
Good relationship with my children	Extras for children	Involvement with church, synagogue, etc.
Time with loved ones	Sense of commitment	Retirement security (financial)
Necessary tools for work	Intimacy with at least one friend	Help with tasks at home
Hope	Money for extras	Loyalty of friends
Children's health	Self-discipline	Money for advancement or self-improvement (education, starting a business)
Stamina/endurance	Understanding from my employer/boss	Help with child care
Necessary home appliances	Savings or emergency money	Involvement in organisations with others who have similar interests
Feeling that my future success depends on me	Motivation to get things done	Financial help if needed
Positively challenging routine	Spouse/partner's health	Health of family/close friends
Personal health	Support from co-workers	
Housing that suits my needs	Adequate income	
Sense of optimism	Feeling that I know who I am	
Status/seniority at work	Advancement in education or job training	
Note : * Although luxury resources, groups repeatedly admitted investing more in these two luxury resources than other resources they deemed more important.		

TABLE 3.1 – COR Resources - From S.E. Hobfoll (1998)

3.3.2 Typologie des ressources

Hobfoll a proposé plusieurs méthodes de classification des ressources, fondées sur leurs propriétés.

Ressources internes et externes La classification la plus simple consiste à classer les ressources en externes ou internes.

- **ressources internes** : ressources possédées par le moi (*self*) ou dans le domaine du moi. Par exemple l'estime de soi, les compétences pour réaliser un travail ;
- **ressources externes** : ne sont pas possédées par le moi, mais y sont extérieures. Par exemple un emploi, le soutien social, un statut économique.

Selon l'auteur cette classification est trop large pour établir des distinctions utiles, bien qu'elle ait été adoptée par un certain nombre de travaux en psychologie (Holahan et Moos (1987) et Sarason *et al.* (1986), cités par Hobfoll (1998)). Certaines ressources internes pourraient servir à gérer des ressources externes. Par exemple, la ressource interne de « maîtrise » (*mastery*) pourrait permettre de décider à quel moment il faut faire appel à une ressource externe de « soutien social » pour faire face à une situation de stress. Les ressources internes pourraient être aussi plus facilement accessibles pour un individu que les ressources externes, car l'acquisition de ressources externes demanderait plus de temps et serait soumise à plus de contraintes que les ressources internes. Pour ces raisons, les psychologues ont établi une différence entre les ressources internes et externes.

Classification structurelle Cette classification subdivise les ressources en 4 catégories :

- **les ressources objets** (*object resources*) : ressources qui ont une présence physique (diamants, équipement de maison).
- **les ressources personnelles** (*personal resources*) : compétences et traits individuels. L'auteur ne donne pas de définition d'un trait et d'une compétence mais fournit quelques exemples : l'aplomb social et la capacité à diriger pour les compétences, ainsi que l'estime de soi, l'optimisme, l'efficacité, ou l'espoir pour les traits.
- **ressources de condition** (*condition resources*) : ces ressources permettent d'obtenir d'autres ressources, et de façon générale elles jouent un rôle important dans l'acquisition et la protection. Cette catégorie inclut : être en bonne santé, avoir un emploi, être titularisé, avoir de l'ancienneté, mariage, et dans certaines sociétés être le premier garçon à être né dans une fratrie. Certaines de ces conditions doivent être méritées comme un mariage ou une titularisation, et d'autres sont héritées, comme le rang social, la santé ou l'endurance. Ces ressources sont souvent longues à acquérir, et elles sont fortement désirées et valorisées car elles fournissent un accès à d'autres ressources.
- **les ressources d'énergie** (*energy resources*) : elles se caractérisent par leur faculté de pouvoir être échangées avec les ressources des trois autres catégories. Elles incluent la monnaie, le crédit et les connaissances. Elles ne perdent pas de valeur, contrairement à une voiture une fois qu'elle est achetée, et elles peuvent être stockées en attendant d'être échangées.

D'après Hobfoll la faiblesse de cette classification repose sur le fait qu'une ressource peut appartenir à deux catégories à la fois. Par exemple la santé peut être une ressource de condition ou une ressource personnelle, et le soutien social peut être une ressource de condition ou une ressource d'énergie. Elle permet malgré tout de dégager des catégories qui jouent un rôle différent dans le processus de stress.

Classification Organisée autour de la Survie Cette classification est hiérarchique et repose sur la survie.

- **ressources primaires** : ces ressources sont indispensables à la survie. Elles incluent les vêtements, la nourriture, un abri, le pouvoir de maîtriser son environnement

(dépendant par exemple de connaissances sur comment faire pousser sa nourriture, ou des compétences professionnelles).

- **ressources secondaires** : ces ressources contribuent indirectement aux ressources primaires, comme le soutien social, l’attachement au groupe, les liens maritaux ou romantiques, l’espoir et l’optimisme.
- **ressources tertiaires** : ces ressources incluent les choses qui sont symboliquement liées aux ressources primaires et secondaires, comme l’argent, les ressources montrant un statut social (une maison luxueuse, une automobile luxueuse, des bijoux), un environnement de travail, ou des conditions qui facilitent l’accès aux ressources secondaires (amitiés, adhésion à des organisations).

Selon Hobfoll cette hiérarchie est utile car elle est hiérarchique, et pourrait être employée pour déterminer les conséquences d’un gain ou d’une perte de ressource en fonction de sa position dans la hiérarchie. D’autre part, cette classification peut apporter un éclairage sur la façon dont un individu attribue une valeur à une ressource.

Ressources limitées et illimitées Freund et Riediger (2001), s’appuyant sur la théorie de Hobfoll, distinguent les ressources limitées, pour lesquelles les individus vont entrer en compétition, des ressources illimitées. Les ressources limitées sont des ressources dont la quantité est finie, qui s’épuisent soit au fil du temps, soit parce qu’elles sont utilisées. Il s’agit de ressources comme l’argent, le temps, et le soutien social. Les ressources illimitées sont celles qui servent à utiliser les ressources finies, comme des traits de personnalité ou des processus liés à la motivation. Certains travaux attestent toutefois que de telles ressources internes pourraient être finies, et nécessiteraient un certain temps avant d’être régénérées (Baumeister *et al.*, 1998). La classification entre ressources limitées et illimitées ne semble donc pas si évidente à déterminer.

3.3.3 Intérêt de la théorie COR pour la simulation des comportements émotionnels

Selon la psychologue D.H. Martinez (Martinez, 2007), la théorie COR de Hobfoll est la théorie de l’évaluation pouvant être interprétée la plus facilement sur le plan comportemental. En effet, un individu *agit* selon l’état de ses ressources. Elle estime aussi que c’est la théorie du stress pouvant être la plus facilement testée (dans une perspective psychologique), parce qu’elle repose sur des concepts plus concrets que d’autres théories.

Sur le plan computationnel, nous pensons que cette théorie est bien adaptée pour la simulation de comportements affectifs en comparaison les théories que nous avons présentées au chapitre 1. Elle se différencie sur deux caractéristiques principales :

- *elle est orientée sur le comportement, et non sur l’interprétation d’une émotion* : il est possible de déterminer d’après cette théorie comment les comportements sont sélectionnés, en prenant en compte leurs effets sur les ressources d’un individu et la valeur qu’un individu accorde à ces ressources, sans avoir recours à la simulation de catégories d’émotion.
- *elle propose des principes généraux bien compréhensibles et concrets* : lorsqu’une ressource est menacée un individu essaye de la protéger, sinon il essaye d’acquérir de nouvelles ressources. Ces deux grands types de comportements peuvent s’appliquer à tout type de ressource et dans n’importe quelle situation, conférant à cette théorie un caractère générique.

La théorie COR n’est pas suffisamment formalisée pour être directement utilisable par un modèle informatique, mais elle semble adéquate pour déterminer un modèle d’agent

capable de réaliser des comportements affectifs. Ses principes généraux permettent d'établir la dynamique de base de l'architecture, fondée sur l'acquisition et la protection de ressources, et le concepteur du modèle est libre de déterminer les comportements et les ressources disponibles pour un agent. De notre point de vue, elle fournit un très bon niveau d'abstraction, à la fois généralisable et pouvant être facilement adapté. Nous verrons au chapitre 5 comment nous avons choisi d'adapter cette théorie pour un modèle informatique.

Nous avons vu que la théorie COR dresse une liste de 74 ressources importantes dans la vie d'un individu de culture occidentale. Nous allons voir dans la section suivante qu'il existe plusieurs autres types de ressources pouvant être représentés, correspondant aux besoins d'un individu.

3.4 Théories des besoins

La théorie COR de Hobfoll (1989) renvoie à la théorie des besoins, qui cherche à déterminer quels sont les besoins fondamentaux d'un être humain, et à les hiérarchiser. Ce sujet a été largement étudié par les psychologues et les théories des besoins sont nombreuses. Dans cette section, nous présentons seulement les plus représentatives du domaine, afin d'apporter un éclairage sur les différents types de ressources pouvant exister.

3.4.1 Murray : les besoins psychogéniques

La liste des besoins psychogéniques de Murray (1938) se distinguait des théories du besoin de son époque, qui ne considéraient que les besoins biologiques. Murray a souhaité introduire une dimension psychologique à ces besoins, et il a ainsi distingué deux types de besoin : les besoins primaires biologiques comme les besoins en oxygène, eau et nourriture, et les besoins secondaires psychologiques comme l'indépendance et l'accomplissement de soi. La liste de Murray comprend 27 besoins psychogéniques, divisés en 8 catégories :

I) Besoins correspondant à des actions sur les objets inanimés :

- Conservation (*Conservance*) : collecter, réparer, nettoyer et préserver les objets.
- Ordre (*Order*) : arranger, organiser, ranger les objets ; être scrupuleusement précis.
- Possession (*Retention*) : chercher à garder ses objets ; refuser de les donner ou de les prêter ; être économe, avare, parcimonieux.
- Construction (*Construction*) : construire et organiser.

II) Besoins pour des actions ambitieuses et prestigieuses :

- Supériorité (*Superiority*) : ce besoin est composé des besoins d'accomplissement et de reconnaissance décrits ci-dessous.
- Accomplissement (*Achievement*) : surpasser les obstacles ; exercer toute sa puissance ; vouloir réussir des activités difficiles le plus rapidement possible (il s'agit d'un besoin élémentaire qui peut être activé par n'importe quelle action ou par un autre besoin).
- Reconnaissance (*Recognition*) : être enthousiasmé par les compliments ; imposer le respect ; afficher avec vantardise ses réussites et ses exploits ; rechercher les distinctions, le prestige social et les honneurs.
- Exhibition (*Exhibition*) : attirer l'attention des autres ; choquer, exciter, amuser les autres.

III) Besoins correspondant à la nécessité de préserver un statut ou éviter l'humiliation :

- Évitement (*Infavoidance*) : éviter l'humiliation, la honte et le ridicule.
- Défense (*Defendance*) : se défendre contre les blâmes et l'adversité.
- Contrer (*Counteraction*) : défendre ostensiblement son honneur.

- Préservation (*Inviolacy*) : désir de préserver une bonne réputation, d'éviter les critiques, de maintenir une distance psychologique. Ce besoin est lui-même constitué des besoins évitement, défense, contrer expliqués ci-dessus.

IV) Besoins liés à l'exercice du pouvoir :

- Domination (*Dominance*) : influence ou contrôle des autres ; persuader, prohiber, dicter.
- Déférence (*Deference*) : admirer et coopérer avec un allié respecté et admirable.
- Similance (*Similance*) : empathie ; imiter ou émuler autrui.
- Autonomie (*Autonomy*) : résister aux influences ou à la coercition ; défier l'autorité ; rechercher l'indépendance.
- Contrariété (*Contrarience*) : agir différemment des autres ; être unique ; prendre des orientations non conventionnelles.

V) Besoins sadiques-masochistes :

- Aggression (*Aggression*) : s'attaquer à autrui ; faire du mal, accuser, ridiculiser, punir sévèrement ; sadisme.
- Soumission (*Abasement*) : se rendre, abandonner, accepter la punition, s'excuser, se confesser, se déprécier ; masochisme.

VI) Évitement de la désapprobation publique ou celle des parents :

- Évitement des blâmes (*Blamavoidance*) : éviter les remontrances, l'ostracisme, les punitions en inhibant les impulsions asociales ou non conventionnelles ; se comporter de façon rigide, obéir à la loi.

VII) Besoins liés à l'affection :

- Affiliation (*Affiliation*) : créer des relations amicales et des associations ; accueillir, joindre, vivre avec les autres ; coopérer et s'entretenir avec les autres ; aimer les autres.
- Rejet (*Rejection*) : snober, rejeter, ignorer autrui ; rester indifférent aux autres ; faire de la discrimination
- Materner (*Nurturance*) : s'occuper, aider, protéger autrui ; exprimer sa sympathie avec les autres.
- Aidance (*Succorance*) : recherche d'aide, de protection de sympathie ; être dépendant.
- Ludique (*Play*) : se relâcher, s'amuser, éviter les tensions trop importantes.

VIII) Besoins associés à la vie sociale :

- Connaissance (*Cognizance*) : explorer ; poser des questions ; satisfaire sa curiosité ; regarder, inspecter, écouter.
- Présentation (*Exposition*) : relater les faits ; démontrer et pointer ; donner des informations, interpréter.

Comme on peut le constater la liste de Murray contient des besoins exprimés sous la forme de comportements (Contrer, Agression, Materner), et d'autres sous la forme de ressources (Reconnaissance, Connaissance). Ils ne se situent donc pas tout à fait au même niveau, et devraient être traités différemment s'ils étaient intégrés à un modèle informatif. On peut aussi remarquer que cette liste contient plusieurs besoins liés à l'acquisition (*Possession, Reconnaissance, Affiliation, Connaissance*), ainsi que plusieurs besoins liés à la protection (*Défense, Préservation, Contrer*). Ces comportements peuvent être mis en parallèle avec la théorie COR de Hobfoll (1989), qui repose sur l'acquisition et la protection de ressources.

3.4.2 Maslow : la hiérarchie des besoins

La théorie des besoins la plus connue est sûrement celle de Maslow *et al.* (1970), qui représente les besoins comme des étages dans une pyramide. Les besoins sont organisés

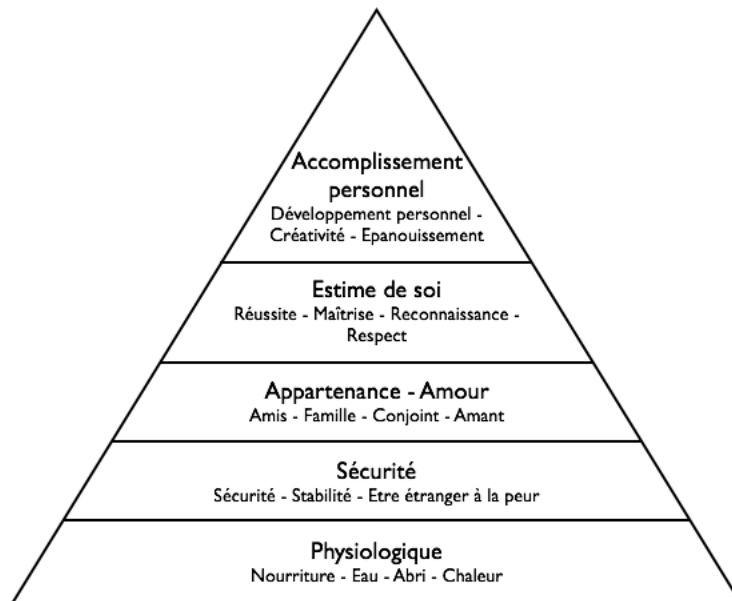


FIGURE 3.4 – Pyramide des Besoins de Maslow

selon une hiérarchie : plus un besoin est bas dans la pyramide, plus il est prioritaire par rapport aux besoins situés plus haut. Lorsqu'un besoin d'un certain niveau dans la hiérarchie est satisfait, un besoin d'un niveau supérieur apparaît. Maslow précise qu'il n'est pas nécessaire qu'un besoin soit satisfait à 100% pour que le besoin du niveau immédiatement supérieur apparaisse. Il donne l'exemple suivant : si un besoin *A* n'est satisfait qu'à 10%, alors le besoin *B* de l'étage supérieur n'est pas du tout ressenti par l'individu. En revanche si *A* est satisfait à 25% alors *B* peut émerger à 5%, et si *A* devient satisfait à 75% alors *B* émerge à 50%. Cet exemple donné par l'auteur est illustratif, et n'est pas accompagné d'une formule permettant de calculer le pourcentage d'activation d'un besoin. On peut toutefois imaginer que la définition de règles précises concernant ces pourcentages pourrait soulever des difficultés, car aucune théorie psychologique ne semble les préciser.

Les 5 besoins de base de la théorie de Maslow classés du plus prioritaire au moins prioritaire sont :

1. les besoins physiologiques ;
2. les besoins de sécurité ;
3. les besoins d'appartenance et d'amour ;
4. les besoins d'estime ;
5. le besoin d'accomplissement de soi.

Le besoin d'accomplissement de soi correspond au sentiment de faire ce qu'on sait faire le mieux. Les besoins d'estime se divisent en deux parties : estime de soi, et estime reçue de la part des autres. Maslow précise qu'il est impossible et inutile de dresser une liste complète des besoins physiologiques, car ils peuvent être aussi nombreux qu'on le souhaite selon le niveau de spécificité que l'on choisit. Le tableau 3.2 montre déjà que les besoins physiologiques cités par l'auteur sont assez nombreux, incluant par exemple les besoins en protéines ou les besoins en calcium.

En plus des besoins de base cités précédemment, Maslow ajoute des besoins cognitifs. Selon lui, ils correspondent à des moyens de satisfaire ses besoins de base, mais ils existent

Physiological Needs	(1) Water content of the blood, (2) Salt content, (3) Sugar content, (4) Protein content, (5) Fat content, (6) Calcium content, (7) Oxygen content, (8) constant Hydrogen-ion level, and (9) constant Temperature of the blood (from Cannon 1932); Minerals, Hormones, Vitamins; Sexual Desire, Sleepiness, Cheer Activity and Exercise, Maternal Behavior, Sensory Pleasures (tastes, smells, tickling, stroking); Inertia, Laziness, Least Effort; Activity, Stimulation, Excitement;
Safety Needs	Stability, Dependency, Protection; Freedom from fear, anxiety and chaos; Need for Structure, Order, Law, and Limits; Strength in the Protector; Job with Tenure and Protection, Saving Account, Insurance of various kinds (medical, dental, unemployment, disability, old age); preference for Familiar rather than unfamiliar things; Religion, Philosophy.
Belonginess and Love Needs	Giving and Receiving Love Affection; Training Groups, Personal Growth Groups, Intentional Communities; expression of Love and Affection in sexuality;
Esteem Needs	Self Esteem : desire for Strength, Achievement, Adequacy, Mastery, Competence; Esteem of Others : Reputation or Prestige (respect or esteem from other people), Status, Fame, Glory, Dominance, Recognition, Attention, Importance, Dignity, Appreciation.
Self-actualization Need	Desire to become more and more what one idiosyncratically is, to become everything that one is capable of becoming.
Desire to Know and to Understand	Knowledge, Systematizing the Universe, Freedom of Inquiry and Expression, Curiosity, Learning, Philosophizing, Experimenting.
Aesthetic Needs	Beauty

TABLE 3.2 – Les Besoins de Base, A.H. Maslow (1987)

aussi en tant que tels, indépendamment d'autres besoins. Il liste deux catégories de besoins cognitifs :

1. le besoin de savoir et de comprendre ;
2. les besoins esthétiques.

Le besoin de savoir est prioritaire sur le besoin de comprendre. Les besoins esthétiques correspondent à l'attraction que les individus ont pour la beauté et leur répulsion pour la laideur (de leur environnement, par exemple). Le tableau 3.2 présente les sous-catégories de besoins propres à chacun des 7 besoins de base cités précédemment.

Selon Maslow, les besoins d'un individu sont pré-déterminés et peu liés au contexte ou à la culture. Les besoins cités dans cette théorie sont donc considérés comme innés et universels, valables pour tout individu. L'auteur fait néanmoins remarquer qu'il y a des exceptions dans la hiérarchie des besoins. En fonction de la personnalité et de la situation d'un individu, certains étages peuvent être intervertis. Ainsi, le besoin d'estime peut-être plus important que le besoin d'amour pour certains individus, le besoin d'amour peut être totalement désactivé chez une personne psychopathe, et un individu qui ne manque jamais de nourriture peut considérer que ce besoin ne fait pas partie des plus importants.

3.4.3 Hiérarchie de Maslow révisée Kenrick *et al.* (2010)

Plus récemment, Kenrick *et al.* (2010) ont proposé un nouveau modèle fondé sur la théorie de Maslow *et al.* (1970). Leur objectif est d'actualiser cette théorie au vu des

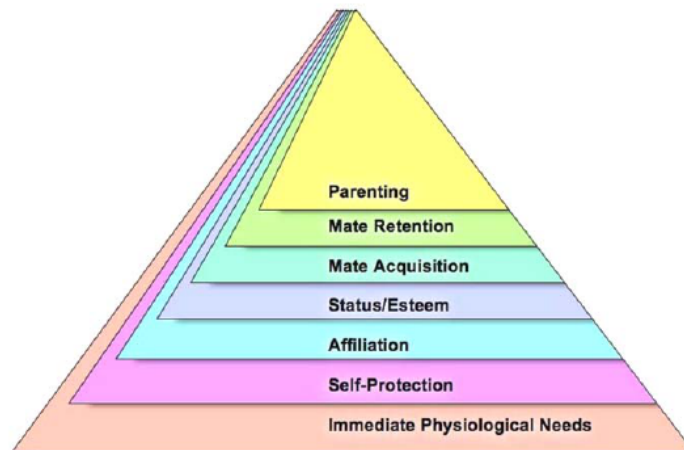


FIGURE 3.5 – Pyramide de Maslow révisée Kenrick *et al.* (2010)

connaissances actuelles en biologie évolutionnaire, anthropologie et psychologie. La place de certains besoins dans la hiérarchie est révisée, et d'autres sont supprimés (« accomplissement de soi ») ou renommés (le besoin de « sécurité » devient le besoin de « protection de soi »). Un schéma de cette nouvelle pyramide est montré figure 3.5.

Contrairement à Maslow, Kenrick *et al.* (2010) affirment que les besoins dépendent beaucoup du contexte. Ils établissent une liste des déclencheurs contextuels d'un besoin, ainsi que des facteurs individuels influençant un besoin. Par exemple, le besoin en nutriments est déclenché par des odeurs de nourriture ou par un manque d'énergie au niveau métabolique, et le facteur individuel pouvant moduler ce besoin sont les variations génétiques d'un individu concernant son système métabolique. Les auteurs identifient pour chaque type de besoin les opportunités qui permettent de le satisfaire, et aussi les menaces qui risquent de renforcer davantage ce besoin. Par exemple, pour le besoin estime/statut les opportunités sont des formations d'alliances, des accès à des ressources, et des possibilités d'accouplement, tandis que les menaces sont la perte de statut, d'image sociale, ou de ressources et de possibilités d'accouplement. Cette distinction entre opportunités et menaces vis à vis d'un besoin rejoint la notion d'acquisition et de protection de ressources proposée par Hobfoll (1989). Le concept de ressource est d'ailleurs fréquemment utilisé chez Kenrick *et al.* (2010), qui évoque les ressources sociales et physiques dont un être humain est pourvu.

3.4.4 Baumeister : la ressource Ego

D'après Baumeister *et al.* (1998) il existe une ressource dans laquelle nous puisons à chaque fois que nous réalisons un acte volontaire, qui serait comparable à la force ou à l'énergie. Exercer un contrôle sur une situation, comme s'empêcher de manger des chocolats qui sont à notre portée, utiliserait cette ressource qui serait rare et néanmoins très importante. Les individus auraient appris à ne pas utiliser trop fréquemment cette ressource afin de l'épargner, et éviter de contrôler son comportement permettrait de la conserver. Des expériences menées en laboratoire par les auteurs ont montré qu'elle semblait être disponible en quantité limitée. Des actes comme résister à une tentation ou mentir réduisent la quantité de cette ressource. Lorsqu'un individu fait appel à cette ressource, par la suite cela impacte négativement ses performances pour résoudre des tâches intellectuelles (par

exemple résoudre des anagrammes), et cela le rend également plus passif, moins enclin à faire des actions. Les auteurs supposent qu'il faut un certain délai avant que cette ressource ne se renouvelle, mais la longueur de ce délai est actuellement inconnue.

La prise en compte de cette ressource pourrait être intéressante dans le cadre d'un modèle informatique et représenter la perte de contrôle chez un agent. Il faudrait identifier quels comportements puisent dans cette ressource, et quels autres ne l'affectent pas, c'est à dire quels comportements présenteraient suffisamment de bénéfices pour qu'un agent veuille le faire, et en même temps suffisamment d'inconvénients pour qu'il se retienne de le faire.

3.5 Conclusion

À la lumière de l'approche constructiviste, nous avons vu dans ce chapitre qu'il est possible d'envisager que les comportements associés aux émotions ne soient pas la conséquence de l'activation de catégories d'émotion. Les comportements émotionnels pourraient provenir de processus plus élémentaires, comme le besoin de se protéger face à une menace. La théorie COR du psychologue S. E. Hobfoll (Hobfoll, 1989) peut nous permettre de simuler ces processus, car selon cette théorie la motivation à réaliser un comportement repose sur le souhait d'acquérir et de protéger des ressources. Ce principe est compatible avec les théories de l'évaluation émotionnelle, qui postulent que les émotions visent le maintien d'une relation particulière d'un individu avec son environnement. En examinant les théories des besoins, nous avons aussi constaté qu'il existe une grande variété de ressources pouvant être représentées, et que leur type et leur description varie selon les théories. Il sera donc important de prendre du recul sur ces théories, afin de déterminer quelles sont les ressources appropriées dans le cadre d'une simulation multi-agents. Nous verrons dans la deuxième partie de ce manuscrit que nous nous sommes basés pour cela sur les comportements que nous avons souhaité représenter dans le cadre de différents scénarios (chapitres 6, 7, 8, et 9).

Chapitre 4

Modèles d'émergence des émotions

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons un ensemble de modèles de l'état de l'art existant dont l'approche correspond à celle d'un modèle d'émergence des émotions. Nous avons défini le concept de *modèle d'émergence des émotions* afin de représenter les modèles dont le but est de simuler des phénomènes émotionnels sans avoir recours à des variables représentant des catégories d'émotion. Ces émotions apparaissent par émergence, dans les yeux de celui qui observe un agent simulé, grâce aux propriétés du modèle. Comme dans la psychologie constructiviste (Wundt et Judd, 1894; James, 1890; Barrett et Bliss-Moreau, 2009), les émotions sont vues comme des *constructions mentales*, issues de l'interprétation de plusieurs *éléments* perçus par un individu. Sur le plan informatique, ces éléments sont toutes les sorties de l'architecture du modèle, et la construction est l'interprétation que fait un observateur humain à propos de ces sorties. Comme les sorties du modèle ne sont pas influencées par des catégories d'émotion, elles dépendent d'autres processus. Nous allons voir dans la section 4.2 que les modèles d'émergence des émotions proposent chacun des mécanismes différents, et revendiquent leur inspiration de la psychologie ou de la neurobiologie. La simulation des émotions au moyen de modèles d'émergence semble être apparue dans les années 1980, mais ce sont des modèles cognitifs plus complexes qui se sont imposés par la suite. Plus récemment, l'intérêt pour les modèles d'émergence semble connaître un renouveau, probablement en raison des problèmes posés par les architectures intégrant des variables émotionnelles. Ces modèles restent toutefois encore peu nombreux, et cet axe de recherche a d'importantes perspectives de développement. Dans la section 4.3, nous montrons en quoi les modèles d'émergence des émotions présentent un intérêt pour la simulation de comportements émotionnels, en les comparant avec les modèles d'émotion que nous avons présentés au chapitre 2. Enfin, comme il est indispensable d'évaluer le modèle que nous allons proposer, nous abordons section 4.4 l'évaluation des modèles d'émotion, en considérant à la fois les modèles manipulant des émotions et les modèles d'émergence des émotions.

4.2 Modèles

4.2.1 Les Véhicules de V. Braitenberg

V. Braitenberg est un chercheur en neurosciences connu pour son ouvrage « Véhicules, Expériences en Psychologie Synthétique » (Braitenberg, 1986). Ce travail fait partie des premiers modèles considérant explicitement les émotions comme un phénomène émergent.

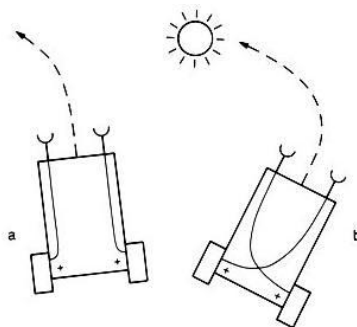


FIGURE 4.1 – Véhicules 2a et 2b (Braitenberg, 1986)

Dans ce livre, l'auteur présente une succession de petits robots, les *véhicules*, ayant chacun une configuration particulière. Chaque version d'un véhicule comporte des ajouts par rapport à la version précédente, de sorte que le robot exhibe de nouveaux comportements. D'après l'auteur, ces ajouts permettent de qualifier le comportement du robot avec des termes différents, comme par exemple des émotions. Le travail de Braitenberg est théorique car il s'agit avant tout d'une expérience de pensée, mais les véhicules peuvent être facilement construits. Ces robots sont équipés de détecteurs, capables de détecter l'intensité de signaux variés dans l'environnement, et d'un moteur de chaque côté afin qu'ils puissent se déplacer.

Peur et Agression Le véhicule numéro 2 est présenté dans un chapitre intitulé « Peur et Agression ». Ce véhicule comporte 2 détecteurs et 2 moteurs, répartis de chaque côté. Plus un détecteur détecte de lumière, plus le moteur relié au détecteur s'active. Les connections du véhicule 2b sont croisées, mais pas celles du véhicule 2a (voir figure 4.1). Lorsque le véhicule 2a s'approche par un côté d'une source de plus en plus lumineuse, il s'en détourne. En revanche, lorsque le véhicule 2b s'approche de la source par un côté, il va se diriger vers la source jusqu'à possiblement la heurter. Selon Braitenberg, après avoir observé les robots pendant quelques instants, on peut exprimer les affirmations suivantes à leur sujet : les deux véhicules *n'aiment pas* la source de lumière, le véhicule 2a est un *lâche*, tandis que le véhicule 2b est *agressif*.

Amour Le véhicule numéro 3 est présenté dans un chapitre intitulé « Amour ». Le véhicule numéro 3 comporte toujours 2 détecteurs et 2 moteurs, mais cette fois les connections sont inhibitrices. C'est à dire que plus un détecteur détecte de lumière, moins le moteur qui y est connecté s'active. Les connections du véhicule 3b sont croisées, mais pas celles du véhicule 3a (voir figure 4.2). Les deux véhicules vont ralentir à l'approche d'une source de lumière, et accélérer dans les endroits sombres. C'est à dire qu'ils vont passer plus de temps près des sources lumineuses. Le véhicule 3a avec les connections non croisées va s'approcher de la source, jusqu'à se trouver face à elle, et ne plus bouger. Le véhicule 3b va en revanche se rapprocher de plus en plus lentement de la source, et s'il l'approche par un côté il va repartir et s'éloigner de la source en accélérant. Selon l'auteur, on peut qualifier le comportement de ces robots avec les mots suivants : ils *aiment* tous les deux la source de lumière, le véhicule 3a *aime profondément* la lumière, restant en *admiration* devant elle, tandis que le véhicule 3b est un *explorateur*, il peut rester près de la source un petit moment, mais repartir dans d'autres directions.

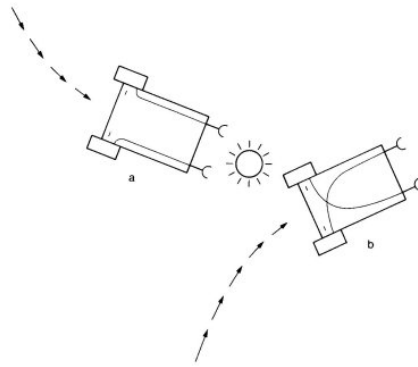


FIGURE 4.2 – Véhicules 3a et 3b (Braitenberg, 1986)

Système de Valeurs On équipe ensuite le véhicule 3 avec 4 paires de détecteurs, sensibles chacune à un type de stimulus : la lumière, mais aussi la température, la concentration d'oxygène, et la quantité de matière organique. La première paire de détecteurs a des connections excitatrices non croisées avec les moteurs, la seconde paire des connections excitatrices croisées, la troisième et la quatrième des connections inhibitrices croisées et non croisées. En observant le robot, on peut se rendre qu'il n'aime pas les fortes températures, qu'il semble ne pas du tout aimer les sources de lumière, et qu'il préfère un environnement bien oxygéné et avec beaucoup de molécules organiques. V. Braitenberg affirme qu'un observateur admettrait que ce véhicule 3c a un système de *valeurs*, ou autrement dit des préférences.

Le travail de V. Braitenberg montre que des comportements paraissant complexes peuvent en fait émerger de systèmes dont la conception est très simple. Dans son introduction, il explique qu'en étudiant la neuro-anatomie de certains systèmes, il est venu à bout de plusieurs difficultés et a fait certaines distinctions qu'il n'avait pas pu entrevoir avec une approche philosophique du problème. Son ouvrage est destiné à nous faire comprendre cette démarche.

4.2.2 Le nouveau « Fungus Eater » de R. Pfeifer

Le nouveau « Fungus Eater » est un travail proposé par R. Pfeifer (Pfeifer, 1994), dont la motivation est de trouver une solution pour pallier certains problèmes liés aux modèles d'émotion. Ces problèmes sont liés à des interrogations sur plusieurs aspects comme : la fonction des émotions, leur caractère universel et leurs spécificités culturelles, ou encore les facteurs influençant leur intensité. Nous avons vu au chapitre 1 qu'il est difficile de déterminer précisément ces aspects. La proposition de Pfeifer (1994) est de ne pas représenter d'émotion dans son modèle, mais de s'en tenir à des processus plus simples, et de constater si des interprétations émotionnelles de ces comportements peuvent émerger de cette architecture. De cette façon, les problèmes associés à la représentation des émotions ne se posent plus. Pour étudier les émotions avec cette approche, l'auteur s'inspire d'un modèle de robot autonome déjà existant conçu par Toda et Crombag (1982).

Le « Fungus Eater » de Toda L'approche de Toda et Crombag (1982) est une alternative à la psychologie traditionnelle, qui consiste à étudier des systèmes *complets* en les simplifiant, plutôt qu'en cherchant à modéliser précisément et séparément chacune de leurs caractéristiques (la mémoire, le langage, l'apprentissage, la perception, l'émotion, etc.). Un système est considéré comme complet s'il se comporte de façon autonome dans

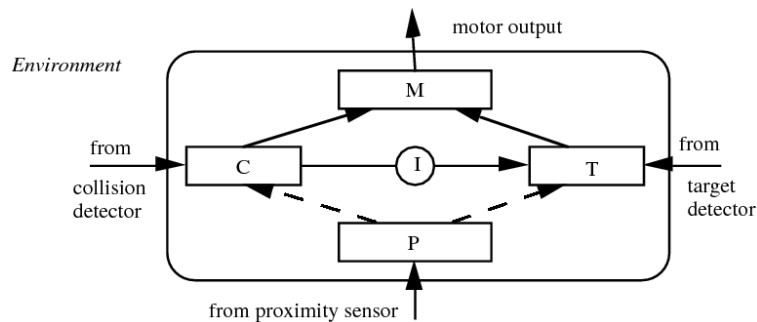


FIGURE 4.3 – Architecture du Réseau de Neurones - Les lignes en pointillées montrent les connexions modifiables (Pfeifer, 1994).

un environnement sans l'intervention d'un intermédiaire humain. Il doit posséder des capacités de perception, de décision, et doit pouvoir réaliser des actions motrices. L'expérience initiale de Toda et Crombag (1982), intitulée « *The Solitary Fungus Eater* », a consisté à modéliser une créature envoyée sur une planète lointaine pour collecter de l'uranium. Plus elle collecte d'uranium, plus elle est récompensée. La créature se nourrit d'un type de champignon présent sur cette planète. Elle a un collecteur de champignon, des moyens de locomotion (jambes), un organe de décision (cerveau) et des organes de récupération (bras). Tout activité demande de l'énergie, y compris « penser ». Si le niveau de nourriture tombe à 0 la créature est morte. Elle possède deux détecteurs, un pour la vision et un pour la détection d'uranium. Le travail de Pfeifer reprend ce même cadre expérimental pour étudier les émotions, en définissant un nouveau « Fungus Eater ».

Architecture du Nouveau « Fungus Eater » Le robot utilisé dans l'expérience de Pfeifer (1994) comporte plusieurs détecteurs. Il est équipé de détecteurs de proximité p , dont l'activation est élevée si le robot se trouve proche d'un obstacle et faible sinon, ainsi que de détecteurs de collision c qui sont déclenchés lorsqu'une collision survient. Il y a également deux détecteurs de cible t , localisés de chaque côté du robot, qui peuvent détecter des cibles quand elles sont dans le champ de détection. Le robot a deux roues, dirigées individuellement par des moteurs électriques. L'agent est composé d'un réseau de neurones prenant en entrée les différents détecteurs, et utilise un mécanisme de décision simple n'incluant pas d'émotion. Il y a une couche de neurones pour chaque type de détecteur, et une couche pour le moteur. Le robot a deux réflexes qui sont « faire demi-tour après une collision » et « si cible détectée, se tourner en direction de la cible ». L'action par défaut est d'avancer tout droit. Les connexions vers la sortie du réseau sont codées en dur, elles correspondent aux réflexes. Les connexions provenant des entrées peuvent être modifiées via un apprentissage Hebbien¹ avec facteur d'oubli (ce facteur intervient pour limiter l'augmentation du poids lors de l'apprentissage). De plus, un élément I donne une préférence au robot pour l'évitement par rapport à l'approche. Un schéma de cette architecture est montré sur la figure 4.3. Selon Pfeifer, cette architecture est extrêmement simple, et elle ne doit pas être véritablement considérée comme un « modèle ».

Observations des Comportements du Robot Le robot a été testé dans un environnement comprenant une cible et des murs (voir figure 4.4). Lorsqu'on met en marche le robot après la première initialisation, il heurte des obstacles. Peu à peu, il apprend à les

1. L'apprentissage Hebbien repose sur le principe que deux neurones en activité au même moment créent ou renforcent leur connexion de sorte que l'activation de l'un par l'autre sera plus facile à l'avenir.

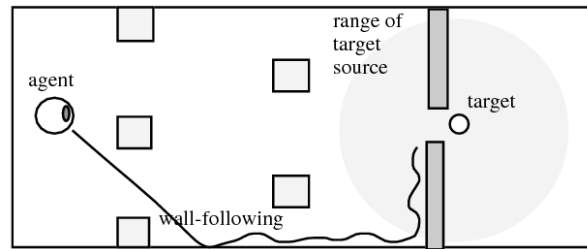


FIGURE 4.4 – Environnement - Le robot peut percevoir la cible à l'intérieur du disque grisé (Pfeifer, 1994).

éviter grâce à l'apprentissage Hebbien. Il semble ensuite *anticiper* les obstacles. Un autre phénomène observable est que s'il existe des cibles (de la lumière) se trouvant proche des murs, le robot suit les murs, même en l'absence de lumière. Des personnes ayant observé ce comportement ont affirmé : « c'est une stratégie du robot pour trouver de la nourriture car la nourriture se trouve près des murs ». Ou encore « le robot espère trouver de la nourriture parce qu'il a appris que la nourriture se trouvait près des murs ». Si le robot est attiré dans un coin où il y a de la lumière, et dans lequel il ne peut plus avancer, il va bouger d'avant en arrière pendant un certain temps, puis se retourner et s'en aller. Des individus en ont déduit que le robot était frustré ou agacé, et qu'il était parti. Les observateurs ont utilisé ces qualificatifs alors que le robot modélisé n'a aucune connaissance sur les endroits où se trouve la nourriture, ni stratégie, ni mécanisme d'anticipation, ni d'élément représentant la frustration. Tous les comportements du robot sont survenus par émergence entre les interactions d'un simple réseau de neurones et son environnement. Les émotions comme l'*agacement* ou l'*espoir* ont été attribuées uniquement par l'observateur. D'après l'auteur, cela montre qu'une approche émergente peut permettre de simuler des comportements émotionnels, sans tomber dans les difficultés liées à la représentation des émotions. Il conclut sur la nécessité d'explorer cette voie, jusqu'à parvenir à un niveau de complexité qui soit proche de celui des êtres humains.

Points forts et limitations de l'approche L'approche de Pfeifer permet de contourner tous les problèmes rencontrés par les architectures manipulant des émotions. C'est un avantage conséquent, car choisir une représentation des émotions appropriée, et configurer les paramètres choisis peut demander beaucoup de temps au concepteur d'un modèle. Un avantage important évoqué par Pfeifer est aussi que ce type d'approche permet de concevoir des systèmes ayant une grande capacité d'adaptation, c'est à dire utilisables dans plusieurs types d'environnement. En effet, plus un système est simple, plus il est facile de passer d'un environnement à un autre, et moins il y a de problèmes d'incompatibilité.

La cohérence de l'approche émergente avec les travaux en psychologie est un point qui pourrait être mieux mis en valeur. En effet, Pfeifer évoque principalement les problèmes liés à la manipulation des émotions, mais parle peu des approches psychologiques compatibles avec l'approche émergente. Cela pourrait conduire à penser que l'approche émergente ne fait que contourner des problèmes au lieu d'y apporter une réponse, et qu'elle se limite à « faire semblant » qu'un robot ou un agent puisse avoir des émotions. Pourtant, le fait de considérer une émotion comme une interprétation, et non comme une entité guidant le comportement, peut être mis en relation avec le courant de la psychologie constructiviste (voir section 3.2). Il ne s'agit pas d'un simple contournement de problème, mais d'une véritable différence dans la façon d'envisager la simulation de comportements émotionnels.

Les limitations de ce modèle concernent son cadre d'application restreint, et l'hypothèse

que des observateurs humains peuvent décrire le comportement de l'agent avec des termes émotionnels n'a pas été évaluée au moyen d'un protocole. Nous verrons dans la seconde partie de ce manuscrit comment nous avons conçu un modèle d'émergence des émotions pour des personnages virtuels dans un système multi-agents, et quel protocole nous avons mis en place pour l'évaluer.

4.2.3 Le modèle de Dörner et al.

Le modèle proposé par Dörner *et al.* (2006) cherche à représenter l'évolution des états motivationnels² et émotionnels d'un agent, ainsi que leurs conséquences sur les processus cognitifs de cet agent. Par exemple, un individu qui échoue plusieurs fois de suite à une tâche va estimer que ses chances de succès deviennent de plus en plus faibles, et il va être en colère. La colère conduit à des processus de pensée spécifiques. Si ensuite l'individu progresse vers son but en réussissant des tâches, alors il va penser qu'il est capable de résoudre le problème. Cela correspond à une émotion de fierté, qui va amener l'individu à penser de façon différente. Afin de représenter ces changements, chaque agent du modèle de Dörner et al. a des besoins qui évoluent dans le temps, comme la faim ou le besoin d'affiliation (c'est-à-dire le besoin d'avoir de bonnes relations avec les autres), ainsi que des motivations à faire certains comportements, évoluant en fonction des besoins. Les agents sont des souris devant survivre dans un environnement, ayant par exemple la possibilité d'agresser d'autres souris ou de leur « sourire ».

Dörner et al. considèrent que l'approche consistant à envisager les émotions comme des modules indépendants n'est pas fructueuse. Au lieu de cela, ils considèrent qu'une émotion correspond à des modulations de processus motivationnels et cognitifs, mais qu'elle n'existe pas en dehors de ces processus. Ils donnent l'exemple de l'émotion de colère, qui se caractérise par : un fort degré d'activation physiologique, une capacité de perception diminuée, une capacité de planification diminuée et rapide, ainsi qu'une forte tendance à l'action menant souvent à de l'agressivité, c'est à dire une tendance vers un comportement irréfléchi et risqué. D'après les auteurs, si on élimine toutes les caractéristiques ci-dessus, il ne reste plus rien de l'émotion de colère. La colère n'est pas un facteur qui influence le comportement, mais est une certaine « couleur » des processus motivationnels et cognitifs. C'est-à-dire qu'elle n'est pas une variable du modèle, mais une interprétation que l'on peut faire de l'état courant du système. Nous pouvons voir un parallèle fort entre ce modèle et l'approche du psychologue W. James, qui considère qu'une émotion n'existe pas en dehors des symptômes physiologiques, ainsi que celle de la psychologue L.F. Barrett, qui fait une analogie entre l'interprétation d'une émotion et l'interprétation d'une couleur (nous avons abordé ces travaux section 3.2).

Les besoins Chaque souris a 6 besoins différents, représentés chacun sous la forme d'un réservoir. Plus un réservoir se désemplit, plus le besoin correspondant au réservoir est important. Les auteurs séparent les besoins en deux catégories : les besoins existentiels qui sont les plus importants, représentés par la faim, la soif et la douleur, et ensuite d'autres besoins qui sont l'affiliation (le besoin de liens avec le groupe), la certitude (le besoin de prédictabilité) et la compétence (besoin de maîtrise). Le réservoir d'affiliation se remplit grâce à des signaux de « légitimité » comme un « sourire », qui indiquent si un organisme est accepté en tant que membre du groupe. Le réservoir de certitude se remplit lorsque les prédictions effectuées sont vérifiées, et se vide lorsque des événements

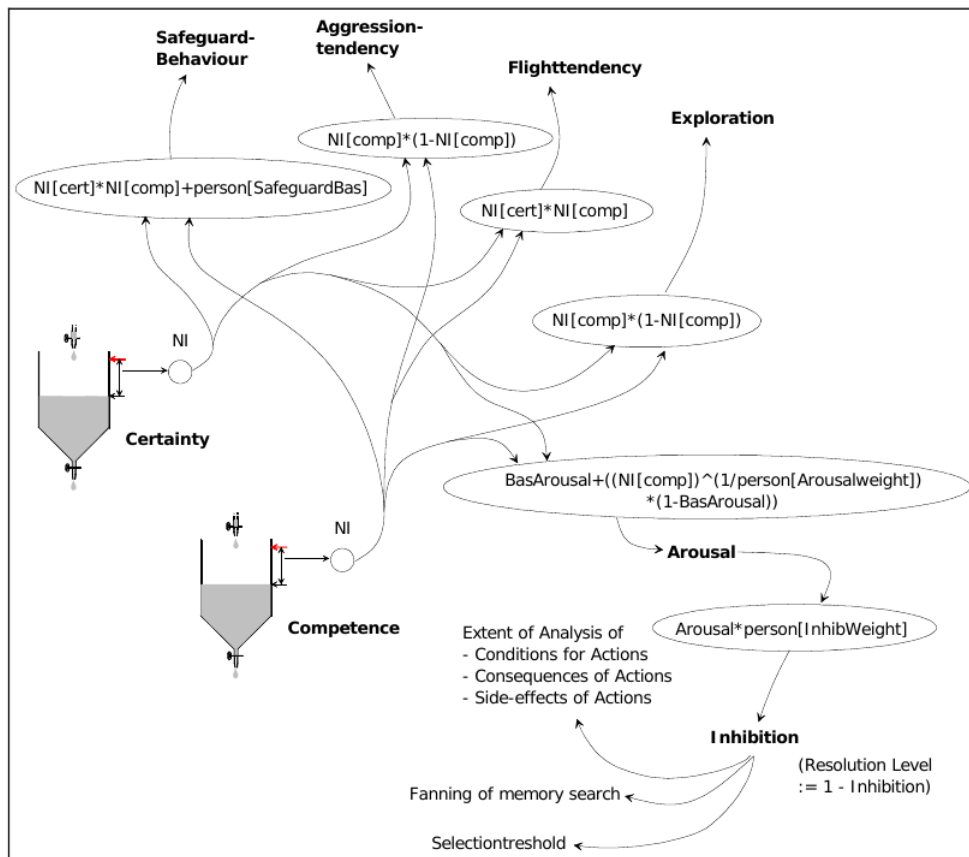
2. Une motivation est une action réalisée pour répondre à un besoin interne tel que la faim ou la soif. Plus ce besoin interne est important, plus la motivation à le satisfaire est importante.

sont nouveaux et incertains. Le réservoir de compétence se remplit lorsqu'une action a été effectuée avec succès, et se vide lorsqu'une action aboutit à un échec.

Les motivations Pour chaque réservoir on définit un intervalle de niveau qui est estimé comme acceptable. Si le niveau du contenu d'un réservoir est en dessous de son niveau acceptable, alors l'agent essaye d'établir un plan dans le but de satisfaire le besoin correspondant au réservoir, et ainsi de le ramener à un niveau acceptable. Une action faisant partie d'un plan est une motivation, par exemple « boire » ou « manger ». Au même moment, plusieurs réservoirs peuvent être en dessous de leur niveau acceptable. L'agent doit alors choisir entre satisfaire un besoin plutôt qu'un autre, et c'est la motivation ayant la valeur la plus forte qui est sélectionnée par l'agent. La valeur d'une motivation est déterminée directement par la valeur du besoin auquel elle est censée répondre, et par les caractéristiques personnelles d'un agent. Pour être sélectionnée, la motivation de valeur maximale doit être supérieure à la motivation en cours plus une certaine constante appelée « seuil de sélection ». Cela permet d'éviter des phénomènes d'oscillations, c'est à dire le fait que l'agent change de motivation trop souvent.

Exemple Les auteurs donnent un exemple de leur modèle en détaillant comment les besoins de « compétence » et de « certitude » ainsi que les traits de personnalité d'un agent influencent les motivations comme « agresser » ou « fuir », ainsi que la façon dont les informations sont traitées par un agent. Un agent peut en effet inhiber sa capacité à traiter l'information. Plus l'inhibition sera forte plus l'agent négligera les effets à long terme et les conditions de ses actions. Ces motivations sont calculées d'après des formules dont les paramètres sont les valeurs des besoins et des caractéristiques personnelles d'un agent. Par exemple, les motivations des comportements d'agression, de fuite et d'exploration sont calculées à partir des besoins de compétence et de certitude. La motivation d'inhibition, ayant une influence sur le traitement de l'information, est calculée à partir de l'excitation et d'une caractéristique personnelle de l'agent liée à l'inhibition. La valeur de l'excitation, notée $Arousal \in [0, 1]$, est calculée en fonction de son niveau courant noté $BasArousal$, du besoin de compétence, et d'une caractéristique personnelle de l'agent associée à l'excitation notée $person[ArousalWeight] \in [0, 1]$. Cette valeur est définie comme $Arousal = BasArousal + (NI[comp]^{(1/person[ArousalWeight])} * (1 - BasArousal))$. Le détail des formules de l'exemple est donné sur la figure 4.5, extraite des travaux des auteurs Dörner *et al.* (2006).

Points forts et limitations de l'approche Le modèle proposé par Dörner *et al.* est inspiré des architectures motivationnelles classiques (Tyrrell (1993), de Sevin et Thalmann (2005)). Dans ces architectures, des besoins internes influencent des motivations à effectuer certaines actions. En retour, chaque action effectuée met à jour un type de besoin. Par exemple un niveau de « faim » élevé renforce la motivation « manger », et si l'action de « manger » est effectuée elle diminue le niveau de faim. L'originalité du modèle de Dörner *et al.* est de considérer que les processus émotionnels peuvent aussi être modélisés par ce type d'architecture. Les auteurs introduisent à cet effet des besoins qui ne sont pas classiquement utilisés par les architectures motivationnelles. Par exemple, ils utilisent les besoins de compétence et de certitude, qui correspondent à des concepts psychologiques, et qui influencent les motivations d'agression et de fuite. Ils prennent également en compte l'influence des motivations sur la capacité de traitement de l'information (ces influences ne sont toutefois pas clairement définies). Cependant, les formules utilisées dans le modèle

FIGURE 4.5 – Régulations émotionnelles Dörner *et al.* (2006)

basées sur ces variables psychologiques n'ont pas été justifiées par les auteurs. Une évaluation concernant la crédibilité des comportements obtenus grâce à ces formules devrait être conduite. De plus, l'utilisation de nombreuses variables numériques et leur utilisation combinée dans les formules peuvent rendre le paramétrage du modèle difficile. Concernant la simulation des émotions, les auteurs considèrent que certains paramètres de leur modèle correspondent à des émotions particulières. Par exemple le risque de se faire mordre par les autres est directement assimilé à de la « peur ». Cette interprétation en « peur » faite par les auteurs devrait être vérifiée dans un processus d'évaluation impliquant des observateurs humains, afin de savoir si le modèle produit effectivement des configurations pouvant être interprétés comme des émotions.

4.2.4 Processus et gestion de ressources

Dans leurs travaux, S. Rank et P. Petta (Rank et Petta, 2007) proposent un modèle d'émotion basé sur les *processus* et la gestion de *ressources*. Ce modèle ne contient pas de variables émotionnelles. Les auteurs souhaitent modéliser des phénomènes décrits dans les théories des émotions sans utiliser de représentation symbolique des émotions. Leur approche s'appuie sur Tabasco (Petta, 2003), un modèle d'intelligence artificielle située n'utilisant pas les émotions comme objets réifiés, c'est-à-dire comme entités. D'après les auteurs, les modèles d'émotion sont importants pour construire des agents intelligents pouvant avoir des échanges sociaux, et ils peuvent aussi servir à comprendre la psychologie humaine. Cependant, l'utilisation de nombreux symboles pour représenter des états internes, et la disponibilité de ressources en quantité illimitée peuvent selon eux biaiser les modèles informatiques en les rendant moins réalistes. Par exemple, en robotique il est crucial de déterminer si une ressource matérielle est disponible pour effectuer une action. Rank et Petta proposent donc une alternative aux architectures cognitives, en présentant un modèle capable de gérer la disponibilité des ressources, dont le but est de produire des simulations fiables tout en restant compatible avec les théories des émotions. De notre point de vue, la robotique induit en effet davantage de contraintes matérielles, mais dans certains cas les personnages virtuels peuvent justement offrir un moyen de tester des modèles psychologiques pouvant difficilement être mis en oeuvre sur un robot en raison de ces limitations matérielles. Les expressions faciales sont par exemple plus faciles à représenter au moyen d'un personnage virtuel, et les modèles d'expressions faciales pour les personnages virtuels prennent déjà en compte la disponibilité des ressources requises qui sont les muscles faciaux (Vinayagamoorthy *et al.*, 2006). La ressource n'est pas un concept nouveau dans la simulation de personnages virtuels, nous verrons au chapitre 5 comment nous avons étendu sa définition et son utilisation. En revanche, la proposition d'une architecture capable de produire des phénomènes émotionnels uniquement grâce à des processus et des ressources est originale, et apporte une contribution sur les modèles d'émergence des émotions.

Les processus Dans le modèle de S. Rank et P. Petta (Rank et Petta, 2007), les processus permettent de modéliser la notion de compétences proposée par le psychologue N. Frijda (Frijda, 1988), c'est-à-dire un système ayant des récepteurs pouvant déclencher de comportements, et des critères permettant d'assurer le bon fonctionnement du système. Un processus est concurrent et modélise une partie de l'activité d'un agent. Il peut être actif ou dormant. S'il est actif, une ressource « temps de traitement » lui est allouée. Un processus peut demander des ressources nécessaires à son exécution, et déclencher ou stopper un autre processus. Un état dormant peut-être activé s'il reçoit une ressource qu'il

a demandée, s'il reçoit une communication d'un autre processus, ou une notification d'un changement dans l'observation d'un processus.

Les ressources Une ressource est un concept utilisé pour représenter le contrôle limité qu'un agent peut avoir sur son environnement ou une partie qui le constitue. Par exemple, le « temps de traitement » est une ressource abstraite qui limite le nombre et la vitesse des processus concurrents. Les canaux de communication sont aussi des formes de ressources, qui permettent la communication entre les processus. Les communications peuvent être utilisées pour synchroniser des processus interdépendants. Selon les auteurs, cette notion est compatible avec l'approche de Scherer sur les interdépendances des processus d'évaluation cognitive, c'est-à-dire que le fait que certains processus nécessitent des ressources provenant d'autres processus (Scherer, 2001). Les ressources peuvent aussi être les moyens de perception d'un agent, comme les yeux, ou des actuateurs, comme les jambes.

Exemple Les auteurs illustrent leur modèle sur l'exemple du dégoût. Leur scénario modélise deux agents, une mère et son enfant, ainsi qu'un objet de l'environnement, un tas de chocolat ressemblant à une crotte de chien. Dans cet épisode, la mère est dotée d'un processus s'activant périodiquement qui est « surveiller l'enfant ». Ce processus « surveiller l'enfant » doit acquérir la ressource « yeux » afin de s'exécuter. La mère voit que son enfant est en train de se déplacer, ce qui déclenche le processus « interpréter déplacement », chargé de trouver un objet dans la direction du mouvement de déplacement, ainsi que de prédire ce que l'enfant va faire. Le processus « identifier-objet » identifie l'objet « crotte de chien », ce qui démarre un processus d'évaluation, et le processus « prédire » démarre un processus de prédiction, qui utilise une ressource « prédicteur pour l'enfant ». Le processus d'évaluation qui prend en compte l'objet identifié et la prédiction du comportement de l'enfant déclenche deux autres processus : « s'éloigner » de l'objet ou bien protéger l'enfant de l'objet, c'est à dire supprimer la menace. Comme ces deux processus utilisent une ressource commune, les « jambes », un régulateur de conflit supprime arbitrairement l'un de ces deux processus, « s'éloigner ». A la fin de l'épisode le processus d'identification de l'objet renvoie un nouveau résultat qui est « tas de chocolat ». Cet objet est évalué de façon positive et n'est plus perçu comme une menace, ce qui a pour effet de supprimer les processus liés précédemment à une évaluation négative de l'objet. Un extrait de la modélisation UML de cet épisode est montré sur la figure 4.6.

Points forts et limitations de l'approche Ce modèle a comme avantage de bien représenter la disponibilité des ressources d'un agent, et de conditionner le déclenchement de certains processus par rapport à la disponibilité de ces ressources. Il semble aussi capable de représenter un épisode de réaction émotionnelle tout en n'utilisant pas de variables émotionnelles symboliques comme des catégories d'émotion. Toutefois, la définition des processus et des ressources semble entièrement conditionnée par le scénario. Les auteurs ne mentionnent pas de processus généraux pouvant s'appliquer à tout type de scénario, sur lesquels le concepteur pourrait s'appuyer pour déterminer les processus spécifiques du scénario. L'acquisition d'une ressource est également vue comme une pré-condition nécessaire à l'exécution d'un comportement, mais ne semble pas pouvoir être considérée comme un objectif à atteindre, autour duquel pourrait s'enclencher une série de processus.

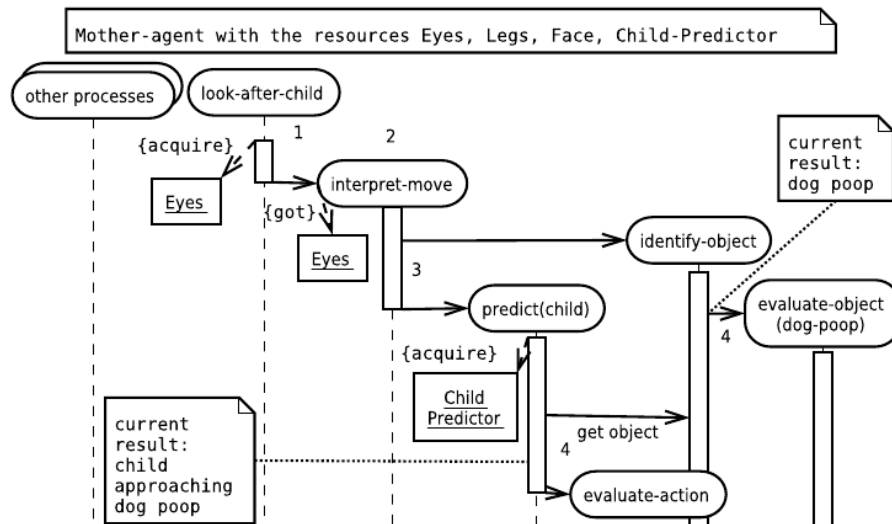


FIGURE 4.6 – Extrait des processus de l’agent « mère » pendant l’épisode de dégoût Rank et Petta (2007).

4.2.5 Modèle hormonal

Les travaux sur les modèles hormonaux des émotions semblent avoir été initiés par L. Cañamero (Cañamero, 1997). Ils concernent plus précisément la *neuromodulation*, et sont orientés vers la robotique. La neuromodulation est un phénomène neurobiologique qui correspond au relâchement d’une hormone dans le cerveau, comme la dopamine ou les endorphines. Cette hormone se diffuse sur une vaste région du cerveau, et peut influencer le fonctionnement de plusieurs aires cérébrales à la fois, si ces dernières possèdent les récepteurs requis pour cette hormone. La neuromodulation est donc un envoi massif d’information, très différent d’une transmission d’information plus locale, de neurone à neurone. Selon Cañamero (2005), la neuromodulation pourrait avoir un lien fort avec les émotions, puisque les émotions sont réputées pour influencer plusieurs éléments de nature différente, comme la perception, l’attention, les motivations et les comportements. Dans une première version de son modèle, Cañamero (1997) a explicitement utilisé des catégories d’émotion. Par la suite, l’auteur ne semble plus avoir utilisé de catégories d’émotion (Avila-Garcia et Cañamero, 2004; French et Canamero, 2005), tout en rendant compte de la capacité de ces modèles à produire des comportements émotionnels. Cañamero (2005) classe ces modèles de neuromodulation parmi les approches émergentes sur les émotions. Le modèle que nous présentons ici est un modèle motivationnel de neuromodulation n’utilisant pas de catégories d’émotion, conçu par Avila-Garcia et Cañamero (2004).

Architecture de Sélection du Comportement L’architecture est organisée en deux couches : une couche *motivationale*, et une couche *comportementale*. Un état motivationnel représente une tendance à se comporter d’une certaine façon, et son intensité est déterminée par des facteurs internes ou externes. Les *facteurs internes* sont des déficits concernant des variables internes (e.g. taux de sucre dans le sang), notés d_i . Un déficit peut provoquer la réalisation d’une action permettant de le réduire, et ainsi maintenir la variable physiologique associée dans une zone de confort. Les *facteurs externes*, notés c_i , sont des perceptions permettant de réaliser des comportements satisfaisant des variables internes. Par exemple, la vision de nourriture est un facteur externe permettant de réaliser

le comportement « se nourrir ». En plus des déficits physiologiques et des stimuli de l'environnement, il existe un autre facteur représentant un niveau hormonal, noté α , que nous expliquons ci-après. Une motivation m_i est définie par la formule : $m_i = d_i + (d_i * \alpha c_i)$. Par exemple, une motivation m_i , reliée à la réalisation du comportement « se réchauffer », dépend de l'indice externe c_i , représentant la proximité d'une source de chaleur, et d_i , le déficit de température du robot. Chaque motivation est reliée à un comportement, qui lorsqu'il est réalisé a des effets sur les déficits du robot. Par exemple « se réchauffer » réduit le déficit de température de -1.0 , mais augmente de déficit d'énergie de $+0.3$. L'architecture sélectionne le comportement correspondant à la motivation de valeur maximum. Le paramètre α est utilisé afin qu'un robot ne soit pas trop opportuniste quand sa survie est menacée. C'est-à-dire que si le robot se trouve près d'une source de chaleur et que son niveau de sucre est bas, il est possible qu'il « se réchauffe » par opportunisme, alors qu'il devrait aller chercher une ressource de nourriture pour survivre. Pour cette raison, plus la survie du robot est menacée, moins il est opportuniste, c'est-à-dire plus α est petit (le réglage du paramètre α n'est pas précisé par les auteurs). D'autre part, l'hormone α permet à un robot de pousser un autre robot pour obtenir plus facilement des ressources lorsque sa survie est menacée. Par défaut, un robot évite un autre robot, mais ce comportement de base peut être inhibé par l'hormone α (les auteurs ne précisent pas le seuil du paramètre α à partir duquel le comportement d'évitement est inhibé).

Comportements Observés Le modèle a été implémenté sur deux robots dans le contexte du *problème à deux ressources avec compétition* (*competitive two-resource problem*). Le problème à deux ressources est un protocole de test dans lequel un robot doit choisir quelle ressource consommer entre deux types de ressources présentes dans son environnement. Le problème à deux ressources avec compétition comprend deux robots au lieu d'un, se trouvant en concurrence pour accéder aux ressources. Les robots peuvent choisir les comportements suivants :

- se nourrir ;
- se réchauffer ;
- rechercher (une ressource) ;
- éviter (un obstacle).

Les robots sont équipés de deux détecteurs d'obstacle, et de deux détecteurs de lumière pour l'identification des ressources. L'évaluation du modèle a consisté à analyser l'évolution des variables de viabilité de chaque robot (durée de vie, satisfaction des variables physiologiques). Dans l'observation des comportements des robots, les auteurs ont noté que lorsqu'un des robots, appelé Uruk, évite le robot Tauron, ce comportement peut-être interprété par un observateur extérieur comme de la *peur*. Au contraire, si Uruk n'est pas en situation de survie, il va pousser Tauron, ce qui peut être qualifié comme une *agression*. Enfin, les auteurs remarquent en tant qu'observateurs externes que le déroulement général de l'expérience peut être interprété comme de la *protection de ressources*.

Points forts et limitations de l'approche La prise en compte de la neuromodulation dans la simulation des émotions est une approche très intéressante car elle est peu répandue. À long terme, ce travail pourrait permettre de modéliser l'influence d'un seul élément, un type d'hormone, sur plusieurs aspects du raisonnement et du comportement. Cependant, le cadre d'application de cette approche reste encore assez limité, et ne semble pas avoir été appliqué à des humains virtuels. Dans le modèle présenté, l'hormone influence seulement un petit nombre d'actions primaires. Dans son travail, L. Cañamero (Cañamero, 1997) a proposé qu'une hormone influence à la fois des comportements et des processus

cognitifs. Cependant, les approches par neuromodulation risquent de se heurter, comme les modèles manipulant des émotions, à des problèmes d'association entre une catégorie d'hormone et les éléments qu'elles influencent. Mais à la différence des catégories d'émotion, les hormones ont l'avantage d'être objectivement observables, ancrées biologiquement chez un individu, et on ne peut plus véritablement douter de leur influence sur le comportement des êtres humains ou des animaux, même si elle reste encore imparfaitement connue (Pfaff *et al.*, 2002). La prise en compte d'éléments contextuels, dépendants de la situation dans laquelle se trouve un agent, devra sûrement être envisagée en plus de la modélisation de ces hormones.

Concernant l'évaluation du modèle, elle a principalement consisté à analyser les variables de viabilité des robots. Cela est courant pour un système motivationnel dont l'objectif est maximiser certains critères comme le *confort*, c'est-à-dire le fait qu'un robot maintienne toutes ses variables internes à des valeurs acceptables. En revanche, l'interprétation des comportements des robots par des observateurs extérieurs n'a fait l'objet d'aucune évaluation.

Enfin, ce type de modèle à l'avantage de prendre en compte la notion d'*opportunisme*, c'est-à-dire le fait qu'un robot profite des ressources les plus immédiatement accessibles même si ce ne sont pas celles dont il a le plus besoin. Ce phénomène ne semble pas représenté ailleurs que dans les architectures motivationnelles.

4.3 Comparaison de l'approche entité et de l'approche émergente

La comparaison de l'approche émergente et de l'approche entité a été explicitement discutée par R. Pfeifer (Pfeifer, 1994) et L. Cañamero (Cañamero, 2005). Pour R. Pfeifer, l'approche émergente permet de contourner de nombreuses interrogations liées à l'utilisation de variables émotionnelles dans les modèles. Ces interrogations sont :

- les émotions peuvent-elles se décomposer en plusieurs éléments (cognitif, physiologique, expression, action) ?
- existe-il des émotions basiques qui ne peuvent pas être décomposées ?
- quelle est la priorité de la cognition par rapport à d'autres facteurs (physiologie, expression faciale, action) ?
- faut-il choisir une approche dimensionnelle ou une approche discrète ?
- quelles sont les propriétés universelles et les spécificités culturelles des émotions ?
- quelle est la fonction des émotions ?
- comment sont-elles activées (comment elles surviennent) ?
- quels facteurs influencent leur intensité ?

L'auteur explique qu'il existe de nombreux modèles répondant de façon différente à ces questions, et qu'en préférer un plutôt qu'un autre serait un choix entièrement arbitraire. D'après lui, les interrogations énumérées ci-dessus sont le fruit d'une conceptualisation inexacte des émotions, et elles ne se posent plus lorsqu'on adopte une approche différente. Au cours des chapitres précédents, nous avons vu que ces questions soulevées par R. Pfeifer sont les problèmes principaux sur lesquels travaillent les psychologues s'intéressant aux émotions. Nous avons également vu que la psychologue L.F. Barrett (Barrett, 2006) partage un point de vue similaire à celui de R. Pfeifer, en affirmant que les problèmes rencontrés dans l'étude des émotions proviennent d'hypothèses inexactes sur ce qu'elles sont réellement. D'après R. Pfeifer (Pfeifer, 1994) il conviendrait de considérer que les émotions ne sont pas des « choses », ce que L.F. Barrett appelle des *entités*, mais des phénomènes émergents, c'est à dire des *conceptualisations* selon L.F. Barrett.

D'un point de vue computationnel, l'utilisation d'une approche émergente pour la simulation du comportement apporte des avantages importants. Comme nous l'avons constaté, les modèles d'émergence établissent un lien direct entre la situation d'un agent et l'action, sans passer par une représentation émotionnelle. Cela a plusieurs implications :

1. il n'y a pas besoin d'une phase d'évaluation destinée à interpréter des signaux de l'environnement en émotions (phase montante), ni d'une phase destinée à calculer l'influence des émotions sur le comportement (phase descendante) ;
2. en conséquence du premier point, il y a moins de paramètres à définir pour le concepteur du modèle, et moins il y a de paramètres dans un modèle plus il peut être adapté facilement ;
3. également en conséquence du premier point, il n'y a pas de risque d'obtenir des comportements incohérents en raison des incertitudes dans les choix d'implémentation concernant la phase montante et la phase descendante.

En contrepartie, on pourrait reprocher aux approches émergentes leur incapacité à simuler l'effet d'une variable globale (l'émotion) sur plusieurs éléments (cognition, expression faciales, expression verbale, etc.). Le modèle de L. Cañamero (Cañamero, 2005) cherche précisément à répondre à cette limitation, en utilisant des hormones capables d'influencer des éléments variés. Mais comme nous l'avons vu, les approches utilisant la neuromodulation risquent de se heurter au mêmes problèmes que les modèles manipulant des émotions, puisqu'il est aussi nécessaire de déterminer une phase montante et une phase descendante. Il apparaît d'ailleurs qu'aucun modèle informatique manipulant des émotions ne modélise réellement cette influence globale. Dans le modèle ALMA, il semble y avoir une association directe entre les catégories d'humeurs d'un agent et les phrases qu'il peut sélectionner. Les affects ne semblent pas influencer un ensemble de capacités cognitives pouvant représenter un effet global de l'émotion. Dans le travail de Canamero (1997), les neuromodulateurs modélisés, déclenchés par des émotions, ont vocation à influencer de nombreux aspects cognitifs et comportementaux. En pratique, ils semblent influencer peu d'éléments : la force mise dans un mouvement et la réduction de la perception de la douleur. Ces questions d'influence globale d'une variable, qui ont une réalité sur le plan neurobiologique par l'action des neuromodulateurs, semblent très difficiles à mettre en œuvre dans un modèle informatique.

Revenons plus concrètement sur les difficultés rencontrées par les modèles manipulant des émotions. Le modèle OCC Ortony *et al.* (1988) permet l'attribution d'émotions à des agents. Il n'a cependant pas été élaboré pour la sélection du comportement, et des difficultés se posent pour les modèles l'ayant utilisé à cet effet. Il y a d'abord un problème d'association émotion-comportement. Par exemple, la « peur » peut aussi bien être associée à un comportement de fuite qu'à un comportement d'agression, et un comportement d'agression pourrait être aussi bien associé à la « peur » ou à la « colère ». Ensuite, comme il existe un nombre de comportements bien plus élevé que le nombre de catégories d'émotion, cela force à établir plusieurs ensembles de comportements chacun associé à une émotion, et le processus de sélection final parmi cet ensemble est effectué d'après la personnalité de l'agent (Elliott, 1992; Gebhard, 2005; Ochs *et al.*, 2008). Cette approche, que nous avons adoptée lors d'un travail sur la sélection d'énoncés (Campano et Sabourret, 2009a,b), est rendue d'autant plus difficile qu'il n'existe pas de liste exhaustive des comportements considérés comme influencés par les émotions dans les théories psychologiques, et que ces dernières ne précisent pas non plus l'influence exacte de chaque émotion sur le comportement. Le plus souvent, des émotions sont associés à certaines tendances de comportements, mais elles sont considérées davantage comme des interprétations de

ces comportements plutôt que comme leurs déclencheurs. C'est en particulier la position adoptée dans la théorie de N. Frijda sur les tendances à l'action, que nous avons détaillée section 1.5.2. Selon le psychologue, l'action est déclenchée par des facteurs tels que l'importance du but à atteindre et les coûts liés à la réalisation de l'action. Des catégories d'émotion sont associées à chaque tendance à l'action, mais ces catégories représentent uniquement l'interprétation de cette tendance, et donc probablement l'état ressenti par un individu qui observe ou réalise cette tendance.

De plus, lorsqu'un modèle utilise une représentation des catégories d'émotion, des difficultés peuvent apparaître dans la configuration du modèle. Par exemple, la valeur des paramètres comme la probabilité qu'un événement se produise et le seuil d'activation d'une émotion sont laissés à la libre appréciation de l'utilisateur du modèle. Ces valeurs ne sont pas intuitives, et les déterminer demande un travail de calibration nécessitant de faire tourner plusieurs fois une simulation pour vérifier si elles sont correctes, et les ajuster si besoin. Une fois ce travail effectué, les valeurs fixées dépendront fortement du scénario dans lequel la simulation a été effectuée.

Nous verrons dans la deuxième partie de ce manuscrit comment la définition d'un modèle d'émergence des émotions peut nous aider à répondre à ces limitations.

4.4 Évaluation des modèles d'émotion

L'évaluation d'un modèle dépend des objectifs qu'il souhaite atteindre. Les objectifs poursuivis par les modèles d'émotion peuvent être de deux ordres :

- **reproduire des théories psychologiques ou neurobiologiques** : dans ce cas, le concepteur du modèle cherche à obtenir des processus psychologiques et neurobiologiques simulés qui soient le plus proche possible de véritables processus psychologiques ou neurobiologiques humains. Pour cela, il doit s'appuyer sur un ou plusieurs travaux psychologiques ou neurobiologiques sur les émotions, et donner une définition concrète des notions et des processus décrits dans ces travaux afin de pouvoir les implémenter. Ces modèles vont davantage s'attacher à montrer que la dynamique de leur architecture peut reproduire celle d'un processus psychologique humain ;
- **obtenir des comportements crédibles / réalistes** : il s'agit de l'objectif le plus courant. Dans ce cas, le concepteur du modèle peut choisir de ne pas s'inspirer d'un travail psychologique ou neurobiologique sur les émotions, et s'il s'en inspire il peut adapter plus librement ces travaux et choisir de représenter seulement certaines caractéristiques. Pour ce type de modèle, l'évaluation consiste à vérifier que les comportements qu'il produit sont crédibles ou réalistes.

Ces objectifs ne sont pas exclusifs, car l'implémentation d'un modèle psychologique ou neurobiologique peut permettre d'obtenir des comportements crédibles, et un modèle informatique parvenant à simuler des comportements crédibles peut être considéré comme une hypothèse sur le fonctionnement psychologique ou neurobiologique d'un individu. Le modèle EMA (Gratch et Marsella, 2004) a d'ailleurs ce double objectif, puisque ses concepteurs cherchent à simuler des processus psychologiques réalistes, mais aussi à obtenir des agents virtuels crédibles pouvant être utilisés dans le cadre d'une simulation applicative (par exemple une simulation de mission pour des militaires).

L'évaluation des modèles de simulation de comportements affectifs demande souvent d'étudier des concepts subjectifs, ne pouvant pas faire l'objet de mesures aussi précises que celles portant sur un critère objectif. Par exemple, il est possible de comparer le résultat d'un algorithme de recherche du plus court chemin avec la longueur du chemin le plus court, mais à quoi comparer les résultats d'un modèle dont l'objectif est d'obtenir des

comportements émotionnels crédibles ? Pour ces types de modèles, une méthode d'évaluation possible consiste à recueillir les opinions d'observateurs humains à propos de concepts subjectifs tels que l'émotion ressentie, ou la crédibilité du comportement observé. Pour d'autres modèles mesurant des concepts moins abstraits, tels que le déplacement d'une foule lors d'une situation de panique, il est possible de comparer les résultats simulés par le modèle à des observations issues d'une vidéo réelle. Nous expliquons ci-après en quoi consistent ces deux méthodes d'évaluation.

Méthode par Questionnaire La première méthode consiste à interroger des observateurs humains à propos des concepts abstraits que l'on souhaite évaluer, comme la *crédibilité* du comportement des agents. Pour cela, on doit préparer des simulations, établir un questionnaire à propos de ces simulations, les montrer aux participants et leur faire remplir le questionnaire. Dans la dernière étape, les réponses des participants sont analysées à l'aide d'outils statistiques, ce qui permet d'infirmer ou confirmer les hypothèses émises à propos du modèle. Cette méthode a été utilisée au cours de deux évaluations conduites sur le modèle EMA Gratch *et al.* (2009); Marsella *et al.* (2009). Les participants ont été mis dans le contexte d'un jeu compétitif avec des gains et des pertes monétaires, censées provoquer des émotions et des stratégies d'adaptation chez les participants. Les participants devaient noter 5 catégories d'émotion sur une échelle de 0 à 100, pour évaluer l'intensité de leur expérience émotionnelle. Ces émotions étaient la peur, la joie, la tristesse, la colère et l'espoir. L'évaluation portait également sur la perception des participants à propos de la probabilité et de l'utilité qu'ils attachaient au fait de gagner. Ces résultats ont été comparés aux prédictions du modèle EMA.

Méthode par Comparaison avec des Vidéos Une seconde méthode consiste à analyser les vidéos de simulation produites par un modèle avec une vidéo réelle. Cette méthode a été utilisée par Bosse *et al.* (2011) et Tsai *et al.* (2011), pour évaluer si le déplacement des agents correspondait bien aux déplacements observés sur une vidéo réelle. Le contexte de leur expérience est la simulation d'une situation de panique, survenue à Amsterdam un jour de commémoration. Le modèle utilise une variable représentant un état mental qui contamine les agents situés aux alentours, résultant en un phénomène de contagion. Afin d'évaluer leur modèle, les auteurs ont utilisé l'erreur mesurée en mètres entre la position des agents de leur modèle et la position des personnes ayant été filmées pendant l'événement. Ce type de mesure objective semble relativement rare dans le domaine de l'Informatique Affective, car les modèles ne se focalisent généralement pas sur la navigation spatiale, et ne cherchent pas à reproduire exactement une situation réelle. Il serait possible d'utiliser la comparaison par vidéos de façon différente, en la combinant avec la méthode par questionnaire évoquée ci-dessus. Par exemple, on pourrait évaluer si la crédibilité des agents sur les vidéos de simulation approche celle des personnes sur les vidéos réelles. Pour cela, il conviendrait de « virtualiser » les vidéos réelles de façon à ce que les participants ne puissent pas savoir quelle vidéo est issue d'une simulation, ou quelle vidéo est issue d'une situation réelle. Ce type de méthode n'a pas encore été utilisé à notre connaissance.

L'évaluation pour les Modèles d'Émergence Les modèles d'émergence sur les émotions que nous avons présentés ne semblent pas avoir été validés par une évaluation. En particulier, le postulat de base des modèles de ce type, c'est-à-dire que des phénomènes émotionnels peuvent être simulés sans utiliser de variables émotionnelles, n'a pas été vérifié. Les auteurs expliquent que l'on peut percevoir des émotions dans les comportements

de leurs agents, mais cela est insuffisant. Il est nécessaire de vérifier si des observateurs humains reconnaissent en effet des émotions dans le comportement des agents au moyen d'un protocole d'évaluation rigoureux. Il faut aussi vérifier si ces comportements sont crédibles. En effet, les observateurs humains ont tendance à considérer que des comportements incohérents sont des comportements de type émotionnels (nous discutons ce point dans le chapitre 7). Les modèles d'émergence doivent prouver que les comportements exhibés par leurs agents sont à la fois considérés comme émotionnels et crédibles par des observateurs humains.

4.5 Conclusion

L'utilisation de variables émotionnelles dans les modèles informatiques soulève des difficultés importantes. A. Sloman (Sloman, 2001) mentionne qu'une alternative pour essayer de dépasser ces limites est d'inventer une définition précise de ce qu'est une « émotion » ou de complètement abandonner ce concept, et de proposer une nouvelle architecture. Cette seconde proposition de Sloman va dans le sens des modèles d'émergence des émotions, et rejoint la proposition de Pfeifer (1994). Ce changement d'approche est aussi motivé par la psychologie constructiviste, et notamment par les travaux de la psychologue L. F. Barrett (Barrett, 2006; Barrett et Bliss-Moreau, 2009), qui propose de voir les émotions comme des conceptualisations plutôt que comme des entités. Les modèles d'émergence existants sont en majorité appliqués à la robotique, et presque toujours sur des agents non humanoïdes, dans un contexte de survie basique, par exemple manger et boire suffisamment pour rester en vie. La seule exception semble être le travail de Rank et Petta (2007), présentant un déroulement des activités entre une mère et son enfant. Ce modèle prend en compte la notion de la disponibilité de ressources, telles que les acteurs. Il ne semble toutefois pas utiliser de processus généraux pouvant s'appliquer à tout type de scénario, sur lesquels le concepteur du modèle pourrait s'appuyer. Il semble aussi qu'un assez grand nombre de spécifications doivent être définies pour un seul agent, ce qui peut rendre difficile son utilisation dans une simulation contenant un grand nombre d'agents.

La théorie de la COnservation des Ressources du psychologue Hobfoll (1989), que nous avons présentée au chapitre 3, propose des principes généraux concernant le comportement d'un individu, valables dans tout type de contexte. Nous pensons que cette théorie peut permettre de construire un modèle d'émergence des émotions approprié à la simulation multi-agents, capable de produire des comportements émotionnels crédibles. Dans le chapitre suivant, nous présentons le modèle informatique que nous avons défini à partir de cette théorie, intitulé *Conservation of Resources-Engine* (COR-E).

Deuxième partie

Le modèle COR-E

Chapitre 5

Présentation du modèle COR-E

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'explication et à la formalisation du modèle *CO*nservation of *RE*sources *EN*gine (COR-E), conçu pour la simulation de comportements affectifs crédibles. Le modèle COR-E se classe parmi les modèles d'émergence des émotions. C'est-à-dire que les comportements affectifs qu'il produit sont sélectionnés par des processus affectifs ne dépendant pas de la simulation de catégories d'émotion. Les émotions sont considérées comme un phénomène émergent des comportements des agents et de leur situation, apparaissant par l'interprétation d'un observateur humain. Par exemple, le modèle ne simule pas de variable de « colère », mais un observateur humain peut reconnaître de la « colère » chez un agent en observant une simulation produite par le modèle.

Dans ce modèle, nous définissons le processus d'*émergence* comme la perception par un être humain d'un phénomène complexe pouvant en fait résulter de processus simples. Cette définition est illustrée par l'exemple du trajet de la fourmi donné par Simon (1969), que nous avons évoqué au chapitre 3. Le trajet de la fourmi est généré par des processus simples, mais un observateur humain peut décrire ce trajet avec des éléments d'interprétation plus complexes. Par exemple, il peut percevoir un « virage à gauche », alors que ce concept ne fait pas partie des processus permettant à la fourmi de s'orienter. Le « virage à gauche » est la reconnaissance d'un schéma particulier par un observateur humain, c'est-à-dire une catégorisation d'un ensemble de perceptions.

Cette définition de l'émergence est en lien étroit avec la définition des émotions selon l'approche constructiviste en psychologie, dont nous avons expliqué les fondements dans le chapitre 3. En effet, selon cette approche, les émotions sont des interprétations construites par un individu à partir de ses perceptions sur lui-même, sur les autres, et sur son environnement. Ces perceptions peuvent porter sur des situations cognitives, par exemple un échec ou une réussite, sur des sensations physiologiques comme le rythme cardiaque, et sur des perceptions de l'environnement comme la présence d'un incendie. Les émotions sont le résultat de la reconnaissance d'un phénomène complexe, mais ne représentent pas des processus. Dans le modèle COR-E, nous définissons une *émotion* comme une interprétation que fait un être humain à propos du comportement d'un agent et de la situation dans laquelle se trouve ce dernier. Nous distinguons la définition d'une émotion, qui est une catégorie discrète comme la « tristesse » ou la « joie », et la définition de l'*affect*, composé de la valence et de l'activation (Barrett, 2006). Le modèle COR-E simule l'affect, faisant partie des processus de base à partir desquels un observateur humain va pouvoir construire une interprétation émotionnelle.

La *crédibilité* d'un comportement est considérée dans notre modèle comme une notion

subjective, dépendant du regard de l’observateur humain. Au sens général, un comportement d’agent crédible est un comportement qu’un être humain pourrait réaliser s’il se trouvait dans la même situation que l’agent. La crédibilité est fortement dépendante du contexte. Par exemple, fuir en courant alors qu’il n’y a aucun danger serait sûrement considéré comme non crédible. La crédibilité est une notion complexe, regroupant plusieurs critères. Un comportement crédible peut être assimilé à un comportement possible, mais aussi à un comportement fréquent. Nous verrons dans l’évaluation de ce modèle au chapitre 7 que la perception de la crédibilité d’un comportement est différente selon les participants.

Le cœur de l’architecture du modèle COR-E a été conçu d’après la théorie COR de S. E. Hobfoll (Hobfoll, 1989), selon laquelle le comportement d’un individu est motivé par l’acquisition et la protection de ressources. Dans ce chapitre, nous présentons d’abord les motivations et le principe général du modèle COR-E (section 5.1), puis nous expliquons quelles variables de ce modèle peuvent être considérées comme des dimensions affectives. Nous détaillons ensuite la formalisation du modèle, des concepts utilisés au processus de sélection (section 5.3).

5.1 Motivations et principe général du modèle

L’objectif du modèle COR-E est de simuler des comportements affectifs crédibles. Plus précisément, il permet de modéliser des comportements qui *modifient la relation d’un agent à son environnement*. Nous avons vu au chapitre 1 que pour certaines théories en psychologie des émotions, cette capacité correspond à la définition d’un processus émotionnel (Lazarus et Folkman, 1984; Frijda, 2004). Les comportements du modèle COR-E ont donc des *effets*, ce qui permet à un agent d’atteindre un but au travers de ces effets en sélectionnant un comportement. Nous avons vu au chapitre 2 que ce processus est également exploité par le modèle EMA (Marsella et Gratch, 2009). Cette approche se différencie d’autres modèles, qui déclenchent des comportements lorsqu’une catégorie d’émotion est activée, sans prendre en compte leurs effets. Nous avons discuté au chapitre 1 des limitations de tels modèles, qui semblent bien adaptés à la communication d’une émotion, mais qui peuvent aussi poser problème pour certains comportements, comme ceux qui n’ont pas pour seul objet de communiquer une émotion.

Nous avons présenté dans le chapitre 4 section 4.3 les points forts de l’approche émergente des émotions pour simuler les comportements émotionnels. Les modèles d’émergence établissent un lien direct entre la situation d’un agent et l’action, sans passer par une représentation émotionnelle intermédiaire. Cette approche permet de configurer un modèle plus facilement, en anticipant mieux son impact sur les comportements produits. Elle permet aussi d’éviter certains problèmes rencontrés par les modèles manipulant des catégories d’émotion concernant la sélection des comportements. Afin de pouvoir bénéficier de ces avantages, le modèle COR-E adopte cette approche. La représentation des effets d’un comportement permet à un agent de le sélectionner uniquement selon ses effets, et non en fonction d’une catégorie d’émotion activée.

Pour déterminer un modèle de simulation de personnages virtuels reposant sur la notion d’émergence, nous nous sommes appuyés sur la théorie psychologique COR proposée par Hobfoll (1989), que nous avons présentée section 3.3. Nous avons porté notre choix sur cette théorie pour deux raisons principales que nous avons déjà évoquées : (i) elle est orientée sur le comportement, et non sur l’interprétation d’une émotion, (ii) elle propose des principes généraux bien compréhensibles et concrets. La théorie COR ne se réclame pas d’une approche émergente des émotions, car elle cherche à expliquer quels facteurs

provoquent le stress chez un individu, et comment il est possible de l'éviter. Mais comme nous allons le voir, nous avons pu définir un modèle adoptant une approche émergente à partir de cette théorie, car sa dynamique est organisée autour des effets des comportements sur des éléments relativement concrets : *les ressources*.

Le modèle COR-E a été défini d'après quatre postulats de la théorie COR (Hobfoll, 1998) :

1. les choses que les individus valorisent sont des « ressources ».
2. un événement peut être décomposé sous la forme de ressources gagnées ou perdues.
3. les individus cherchent à acquérir les ressources qu'ils ne possèdent pas, conserver les ressources qu'ils possèdent, protéger les ressources qui sont menacées, et faire prospérer les ressources qu'ils possèdent.
4. la perte de ressource est beaucoup plus importante que le gain de ressource (*principe 1* de la théorie COR).

Nous expliquons ci-après comment nous avons déterminé le principe général du modèle COR-E d'après ces quatre postulats.

Représentation du postulat n°1 Le modèle COR-E contient des *ressources*, auxquelles un *agent* attribue une *valeur*. La théorie COR postule que la valeur qu'un individu attribue à une ressource dépend principalement de sa culture, et elle se focalise davantage sur la culture occidentale. Dans une démarche thérapeutique, l'auteur de cette théorie a cherché à déterminer quelles ressources pouvaient impacter le plus fortement l'état de stress ou de bien-être d'un individu appartenant à cette culture. Le cadre d'application actuel du modèle COR-E n'a pas une visée thérapeutique, et doit s'adapter aux ressources qu'il est possible de représenter dans un environnement de simulation, en particulier pour les applications du projet Terra Dynamica (sécurité, jeux vidéo, urbanisme, transports). Dans les chapitres suivants, nous verrons que nous avons déterminé les ressources représentées dans le modèle COR-E en fonction de plusieurs scénarios d'application. Ces ressources peuvent être incluses ou non incluses dans la liste originale de la théorie COR, que nous avons donnée section 3.3.

La théorie COR ne s'intéresse pas aux préférences individuelles sur les ressources, mais à des valeurs moyennes attribuées par l'ensemble des individus de la culture occidentale. Cela n'exclut pas le fait que les individus puissent attribuer des valeurs différentes à des ressources autour de cette moyenne. Afin de représenter des agents exhibant des caractéristiques différentes, nous avons introduit des *préférences individuelles* dans le modèle COR-E. Chaque agent a des préférences individuelles sur certaines ressources, permettant de déterminer la valeur de chacune de ces ressources de son point de vue. Nous décrivons formellement les préférences d'un agent et le calcul de la valeur d'une ressource de son point de vue dans la section 5.3.1.3.

Représentation du postulat n°2 Les événements pouvant survenir dans le modèle COR-E sont des comportements réalisés par des agents, ou un changement de l'état de l'environnement (par exemple, le déclenchement d'un incendie). Ces comportements et ces états peuvent faire gagner ou faire perdre un ensemble de ressources à un ensemble d'agents. Afin de représenter ces effets, il est donc nécessaire de représenter qu'une ressource se trouve dans un certain *état* du point de vue d'un agent. Ainsi, le premier état que nous représentons est qu'une ressource puisse être *acquise* ou *non acquise* pour un agent. L'état d'une ressource correspond toujours à l'état *perçu* par un agent. Ces perceptions

sont formalisées dans la section 5.3.1.2. Nous décrivons formellement comment les états sont modifiés par les effets d'un événement section 5.3.1.5.

Représentation du postulat n°3 Dans le modèle COR-E, un agent peut réaliser un comportement lui permettant d'*acquérir* ou de *protéger* une ressource. Afin de déclencher ces deux types de comportement, nous avons défini deux états supplémentaires que peut prendre une ressource du point de vue d'un agent. Le premier état représente le fait qu'une ressource soit *menacée* ou *non menacée* du point de vue d'un agent. Si une ressource est menacée du point de vue d'un agent, ce dernier peut déclencher un comportement de *protection* afin qu'elle ne soit plus menacée. Le fait qu'un individu cherche à protéger une ressource menacée est clairement évoqué dans la théorie COR. Le second état que nous avons défini représente le fait qu'une ressource soit *désirée* ou non *désirée* du point de vue d'un agent. Si une ressource est désirée du point de vue d'un agent, ce dernier peut déclencher un comportement d'*acquisition* afin de l'obtenir. La théorie COR de Hobfoll postule qu'un individu cherche à obtenir les ressources qu'il ne possède pas. Si nous suivons strictement ce principe dans le modèle COR-E, cela signifie qu'un agent cherche à obtenir toute ressource qu'il ne possède pas représentée dans la simulation. Au vu du nombre de ressources qu'il est possible de représenter dans une simulation, nous avons préféré pouvoir déterminer un ensemble de ressources désirées par un agent, qui est un sous-ensemble des ressources qu'il ne possède pas. Le principe de déclenchement des comportements selon les états des ressources est représenté sur la figure 5.3.

Un agent a également la possibilité d'aider un autre agent à acquérir ou à protéger une ressource. La théorie COR ne précise pas explicitement si un individu peut réaliser des comportements d'acquisition et de protection pour lui-même, ou pour d'autres personnes. Elle postule que les individus réalisent ces comportements pour des ressources qu'ils valorisent. Nous en avons déduit qu'un agent i peut aider un autre agent j si i perçoit une ressource désirée ou menacée pour j , et que i accorde de la valeur à ces ressources. Nous formalisons les comportements possibles pour un agent dans la section 5.3.2.1.

Nous n'avons pas modélisé le comportement consistant à « conserver » une ressource, que nous considérons comme un état passif. Si un agent conserve une ressource cela signifie simplement que cette ressource reste acquise de son point de vue. S'il y a nécessité de réaliser un comportement permettant de conserver une ressource, cela signifie qu'elle est menacée, et ce comportement entre donc dans la catégorie des comportements de protection. Nous n'avons pas non plus modélisé le comportement consistant à faire « prospérer » une ressource acquise, comme par exemple investir de la « confiance » dans une relation pour obtenir d'autres ressources. Ce comportement peut en effet être considéré un comportement d'acquisition, dont l'effet sera de faire perdre un ensemble de ressources au départ (l'investissement), mais d'en faire gagner à plus long terme, dont éventuellement les ressources investies de départ (les bénéfices de l'investissement). Toutefois dans cette thèse nous nous intéressons principalement aux comportements de type réactif, c'est-à-dire de courte durée et comportant seulement des conséquences à court terme.

Selon la théorie COR, les ressources peuvent être de types variés, c'est-à-dire représenter des objets matériels comme une voiture, ou bien des concepts psychologiques comme la réputation. Les comportements d'acquisition et de protection peuvent donc être différents selon les types de ressources. Par exemple, les comportements d'acquisition possibles pour obtenir un ticket de train dans une gare ne seront pas les mêmes que ceux permettant de gagner de la réputation auprès de ses collègues. Ce principe est représenté sur la figure 5.1. Les comportements de protection possibles sont également déterminés selon la *cause* de la menace. Il n'est en effet pas possible pour un agent de « protester » pour protéger

une ressource si la cause de la menace n'est pas le comportement d'un autre agent. La représentation formelle des causes est présentée section 5.3.1.6. D'autre part, certains types de ressources peuvent posséder des *propriétés* que d'autres types de ressources n'ont pas. Il est possible de voler un ticket à quelqu'un, mais pas de lui voler sa santé. Pour cette raison, nous avons associé chaque ressource à un type, permettant de déterminer l'ensemble des comportements d'acquisition et de protection possibles vis à vis de cette ressource, ainsi que les contraintes dépendant des propriétés de son type. Nous présentons la formalisation des propriétés des ressources section 5.3.1.4.

La théorie COR ne précise pas formellement comment la valeur d'un comportement du point de vue d'un individu peut être calculée. Son auteur précise toutefois que le résultat d'un événement est mesuré en fonction des ressources gagnées et perdues à cause de cet événement. Il donne l'exemple d'une femme anticipant les effets d'un « divorce », qui causerait pour elle une perte d'argent, de confiance et d'estime d'elle-même, mais lui ferait gagner de la liberté et de l'espoir. Sa décision dépendra de la valeur qu'elle accorde à chacune de ces ressources. En conséquence, dans le modèle COR-E la valeur d'un comportement du point de vue d'un agent dépend de ses effets, et de la valeur des ressources concernées par ces effets. Un effet est positif s'il correspond à l'acquisition ou la protection de ressource, et négatif s'il correspond à une menace ou une perte de ressource. Un effet positif augmente la valeur du comportement, et un effet négatif la diminue. La valeur d'un comportement est calculée par une fonction additive. Par exemple le comportement « doubler » dans une file d'attente permet à l'agent qui double d'obtenir un meilleur « rang » (effet positif), mais lui fait perdre de la « réputation » (effet négatif). Les valeurs des ressources « rang » et « réputation » sont déterminées par les préférences de l'agent. Pour calculer la valeur du comportement « doubler » du point de vue de cet agent, la valeur de la ressource «rang» sera ajoutée car elle est associée à un effet positif. En revanche, la valeur de la ressource « réputation » sera soustraite car elle est associée à un effet négatif. Nous formalisons le calcul de la valeur d'un comportement du point de vue d'un agent dans la section 5.3.2.2.

Représentation du postulat n°4 Selon ce postulat, la perte d'une ressource est plus importante qu'un gain de ressource pour un individu, mais S. E. Hobfoll ne précise pas dans quelle mesure. Il affirme qu'il est difficile de calculer combien la motivation d'éviter de perdre une ressource est supérieure à la motivation d'en gagner. Afin de représenter ce postulat de façon simple, nous avons décidé de rendre la protection d'une ressource menacée toujours prioritaire par rapport à l'acquisition d'une ressource désirée. Nous discutons des conséquences de ce choix dans la section 5.3.1.4.

Par ailleurs, nous avons introduit une distinction non présente dans la théorie COR entre les comportements de protection de type *évitement*, et les comportements de protection de type *confrontation*. Cette classification est utilisée par d'autres travaux en biologie et en psychologie (Cannon, 1920; Lazarus et Folkman, 1984). L'évitement consiste à s'éloigner de la cause d'une menace, tandis que la confrontation consiste à faire face à la cause de cette menace pour trouver des moyens de la supprimer ou de la réduire. Par exemple, attaquer physiquement un agresseur ou protester verbalement contre lui sont deux comportements de type confrontation. Fuir en courant ou éviter un sujet de conversation sont deux comportements de type évitement. Dans le modèle COR-E, les comportements de type confrontation sont prioritaires par rapport aux comportements de protection de type évitement. Nous avons introduit cette distinction pour pallier le fait que le modèle COR-E ne permet actuellement pas à un agent d'anticiper des conséquences à long terme, et plus précisément le fait qu'un évitement ne prévient pas une menace future. Nous discutons

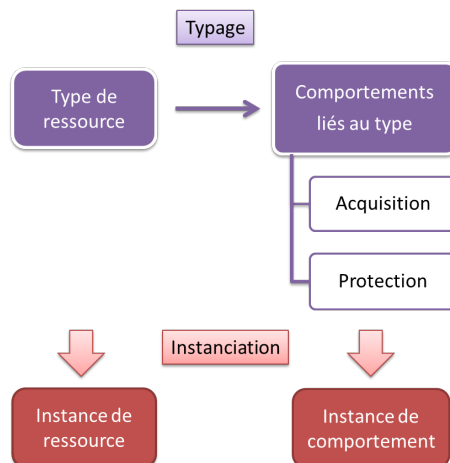


FIGURE 5.1 – Types et instances. Le type d’une ressource détermine les comportements réalisables sur les instances de ce type.

également ce choix dans la section 5.3.1.4 consacrée aux priorités.

Sélection d’un comportement La sélection d’un comportement par un agent dépend de la valeur du comportement du point de vue de l’agent, et de sa priorité. Un comportement de protection est toujours prioritaire sur un comportement d’acquisition, et un comportement de protection type confrontation est toujours prioritaire par rapport à un comportement de protection de type évitement. Un agent choisit de réaliser le comportement de valeur maximale positive parmi l’ensemble de comportements possibles prioritaires. Si pour un agent il existe plusieurs comportements possibles prioritaires de valeur maximale, alors l’agent en sélectionne un aléatoirement parmi cet ensemble.

En résumé, le modèle COR-E présente les propriétés suivantes :

1. *il représente la façon dont un agent modifie sa relation à son environnement au travers de comportements ayant des effets, dans le but d’atteindre un état souhaité.*
2. *il se classe parmi les modèles d’émergence des émotions.*
3. *la dynamique de l’architecture d’un agent se fonde sur les principes suivants :*
 - (a) *un agent essaye de protéger les ressources qu’il valorise et qui sont menacées ;*
 - (b) *lorsque que ces ressources ne sont pas menacées, il essaye d’acquérir d’autres ressources qu’il valorise et qu’il désire .*

Une vue d’ensemble de l’architecture du modèle est présentée en figure 5.2.

5.2 Les dimensions affectives du modèle COR-E

Le modèle COR-E, tout comme les autres modèles d’émergence des émotions, n’est pas exempt de variables affectives : il utilise la notion de *valence*, c’est-à-dire le fait qu’un événement soit perçu comme positif ou négatif, et la notion d’*intensité*, qui est associée à l’importance d’un événement.

La théorie de Hobfoll (1998), intègre naturellement la notion de *valence*. Le gain de ressource correspond à un événement positif, et la perte de ressource correspond à un

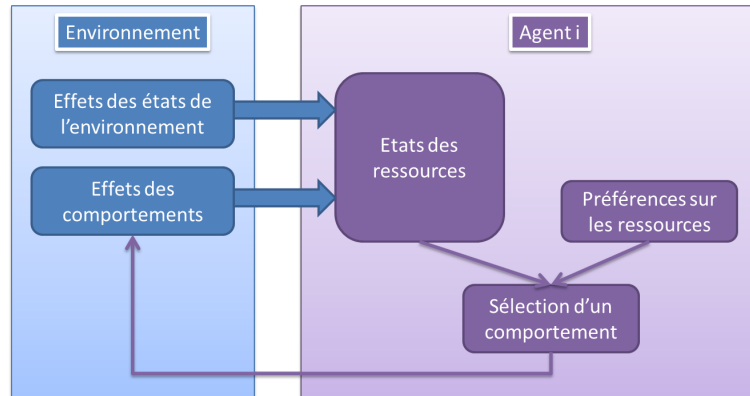


FIGURE 5.2 – Architecture générale. Les états des ressources d'un agent i sont définis par les comportements des agents et les états de l'environnement. La sélection d'un comportement par i est déterminée par les états des ressources de son point de vue et par ses préférences.

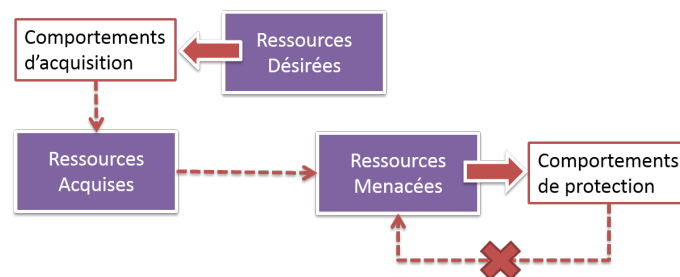


FIGURE 5.3 – Ensembles de ressources. Les ressources désirées déclenchent des comportements d'acquisition permettant de les obtenir. Les ressources menacées déclenchent des comportements de protection permettant de les protéger.

événement négatif. Dans les architectures motivationnelles (Pfeifer, 1994), cette valence correspond aux réflexes d'évitement (stimulus négatif) et d'approche (stimulus positif).

Dans la théorie COR, l'*intensité* d'un événement peut être associée à l'importance des ressources en jeu. Dans le modèle COR-E, ce sont les préférences d'un agent qui déterminent l'importance des ressources. Cette intensité n'est pas associée à des caractéristiques physiologiques comme un état d'excitation provoquant des tremblements, mais elle pourrait être utilisée pour les simuler. Dans les modèles manipulant des variables représentant des catégories d'émotions, l'intensité d'une catégorie d'émotion est dérivée de variables numériques, dont le caractère désirable ou indésirable d'un état. Par exemple dans le modèle EMA (Gratch et Marsella, 2004), cette intensité est calculée en fonction de l'utilité et de la probabilité d'un événement.

La valence et l'intensité semblent être des variables irréductibles, indispensables à la réalisation d'un modèle affectif. Ces deux notions ont une légitimité forte en psychologie, car elles sont visiblement présentes dans toutes les théories, que ces dernières utilisent ou non des concepts représentant des catégories d'émotions. Les psychologues Barrett et Bliss-Moreau (2009) pensent qu'elles constituent la base de l'expérience émotionnelle, et que ce sont des primitives psychologiques. La valence et l'intensité ont aussi une légitimité forte sur le plan biologique, puisqu'il existe des hypothèses solides sur les processus cérébraux qui y sont liés, et qu'elles peuvent être mesurées directement, sans demander à un sujet dans quel état d'excitation il se trouve ou quelle valence il ressent. Cela ne semble pas être le cas pour les états affectifs équivalents aux catégories d'émotion, comme la colère ou la tristesse, auxquels on ne peut accéder actuellement que par les sentiments exprimés verbalement par un individu (Gil, 2009).

5.3 Formalisation

5.3.1 Définitions et propriétés

5.3.1.1 Agents et ressources

L'environnement de simulation du modèle COR-E comprend des agents et des ressources. Toute ressource présente dans l'environnement est considérée comme une instance de ressource, et chacune d'entre elles est associée à un type. Nous définissons $\mathcal{T} = \{ty_1, ty_2, \dots, ty_n\}$ un ensemble fini de types de ressources, $\mathcal{R} = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ un ensemble fini d'instances de ressources, et $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ un ensemble fini d'agents. Le type unique d'une ressource $r \in \mathcal{R}$ est noté $type(r) \in \mathcal{T}$. **Exemple** : soit $hamburger_1$ et $reputation_1 \in \mathcal{R}$ deux instances de ressources représentant respectivement un hamburger et de la réputation, nous pouvons définir $type(hamburger_1) = Hamburger$ et $type(reputation_1) = Reputation$.

5.3.1.2 États des ressources

Toute ressource $r \in \mathcal{R}$ peut être dans un ou plusieurs états pour un agent $i \in \mathcal{A}$. Elle peut être *désirée* ou *non désirée*, *acquise* ou *non acquise*, et enfin *menacée* ou *non menacée*. Comme nous l'avons vu, ces états ont été définis d'après la théorie COR. Afin de les représenter, chaque agent $i \in \mathcal{A}$ a trois ensembles d'état de ressources :

- $RD_i \subset \mathcal{R}$: les ressources *désirées* par i . Si une ressource r appartient à cet ensemble elle est désirée par i , sinon elle est non désirée par i ;

- $RA_i \subset \mathcal{R}$: les ressources *acquises* de i . Si une ressource r appartient à cet ensemble elle est acquise pour i , sinon elle est non acquise pour i ;
- $RM_i \subset \mathcal{R}$: les ressources *menacées* appartenant à i . Si une ressource r appartient à cet ensemble elle est menacée pour i , sinon elle est non menacée pour i ;

Certaines contraintes s'appliquent sur l'union et l'intersection de ces ensembles :

- une ressource désirée par un agent est une ressource que cet agent ne possède pas. Formellement, $RD_i \cap RA_i = \emptyset$;
- si une ressource est menacée pour un agent, alors elle est acquise pour cet agent. Formellement, $RM_i \subset RA_i$, ce qui implique $RM_i \cap RD_i = \emptyset$.

Par ailleurs, une ressource $r \in \mathcal{R}$ peut ne se trouver dans aucun de ces ensembles, elle n'est alors ni menacée, ni acquise, ni désirée.

Les ensembles que nous venons de décrire représentent les états réels des ressources, et non les états des ressources perçus par un agent. Par exemple, un agent peut considérer qu'une ressource est menacée alors que ce n'est en réalité pas le cas. S'il a peur des chiens, il peut imaginer que sa vie est en danger dès qu'un chien l'approche, même si ce n'est pas le cas parce que le chien n'a aucune intention de le blesser. Par ailleurs, les états des ressources pour un agent ne sont pas forcément perçus par un autre agent. Par exemple, un agent i pourrait ne pas percevoir qu'un agent $j \neq i$ souhaite obtenir une ressource r de type *Diplome*. Pour ces raisons, nous avons défini des ensembles d'état perçu, représentant l'état d'une ressource pour un agent $i \in \mathcal{A}$ perçu par un agent $j \in \mathcal{A}$ (avec j non nécessairement différent de i). Chaque agent $i \in \mathcal{A}$ a une perception sur l'état des ressources de tout agent $j \in \mathcal{A}$.

Pour tout couple $i, j \in \mathcal{A}^2$, ces trois ensembles d'état perçu sont :

- $P_i(RD_j)$: les ressources que i perçoit comme désirées par j ;
- $P_i(RA_j)$: les ressources que i perçoit comme acquises pour j ;
- $P_i(RM_j)$: les ressources que i perçoit comme menacées pour j .

Les contraintes sur l'union et l'intersection de ces ensembles sont identiques à celles que nous avons définies pour les ensembles d'état réel.

Par souci de simplification, pour désigner un ensemble d'état d'un agent i perçu par un agent j , nous utiliserons la notation E_i au lieu de la notation $P_j(E_i)$ dans la suite de ce travail, sauf lorsque la distinction entre l'ensemble d'état réel et l'ensemble d'état perçu sera nécessaire (c'est-à-dire lorsque l'ensemble d'état perçu sera différent de l'ensemble d'état réel).

5.3.1.3 Préférences et calcul de la valeur d'une ressource

Afin qu'un agent puisse attribuer une valeur à une ressource, nous avons défini des préférences sur des ressources pour chaque agent. Elles peuvent représenter deux sortes de préférences : des préférences *normatives*, correspondant par exemple aux préférences culturelles d'un individu, ou à des ressources favorisant la survie, et des préférences *individuelles*, représentant les préférences propres d'un individu. Par exemple, le fait de valoriser l'argent ou le travail sont des préférences normatives, car elles sont à la fois valorisées par la culture d'un individu occidental, et favorisent aussi sa survie. Ces préférences peuvent être partagées par une majorité d'agents, mais pas nécessairement tous. Les préférences individuelles sont des variations pouvant exister entre les préférences de différents agents. Par exemple, pour un agent représentant un politicien, les ressources de type « Réputation » pourraient être préférées à beaucoup d'autres ressources, car il est important de préserver ce type de ressource quand on est politicien. Nous avons vu que la théorie COR traite davantage des ressources valorisées par un ensemble d'individus. Elle est donc reliée aux préférences normatives. Le modèle COR-E permet de déterminer des préférences

individuelles, de sorte que les agents puisse adopter des comportements différents dans la même situation. Comme nous le verrons plus tard au chapitre 7, les préférences jouent un rôle important dans la crédibilité des comportements d'un agent.

Nous avons fait le choix d'utiliser des préférences qualitatives, c'est-à-dire représentées par une relation d'ordre sur un ensemble de ressources qui permet de les comparer entre elles. Les préférences quantitatives consistent quant à elles à attribuer directement une valeur à une ressource. Nous avons fait ce choix pour faciliter la configuration du modèle pour l'utilisateur. Selon Torlone et Ciaccia (2002), les préférences qualitatives ont un pouvoir d'expression plus général que les préférences quantitatives, car elles peuvent s'appliquer quand il est impossible de quantifier une préférence. Elles seraient aussi plus faciles à définir pour l'utilisateur d'un système. G. Meyer (Meyer, 2006) affirme également qu'il est plus facile pour un utilisateur d'exprimer des préférences de façon qualitative que quantitative. Selon lui, permettre aux humains de spécifier facilement ces préférences et aux machines de les manipuler efficacement est un point très important. Il précise que certains chercheurs ont proposé d'utiliser des informations qualitatives, afin de simplifier la spécification des fonctions d'utilité (Ha et Haddawy, 1999; McGeachie et Doyle, 2002). Comme le modèle COR-E utilise des préférences sur des ressources de types variés, y compris de type psychologique, nous pensons aussi qu'il est plus facile pour un utilisateur d'attribuer des préférences qualitatives à ces ressources. Par ailleurs, les valeurs d'utilité dérivées des préférences qualitatives peuvent être adaptées automatiquement lorsque ces préférences sont modifiées (McGeachie et Doyle, 2002), alors que des préférences quantitatives supportent moins bien ces modifications. Nous détaillerons plus précisément cet aspect au chapitre 8 en comparant le modèle COR-E avec un modèle manipulant des préférences quantitatives. Les préférences qualitatives comportent toutefois des limitations, car il est impossible de définir qu'une ressource est très fortement préférée à une autre, ou légèrement préférée à une autre. Nous discutons des solutions pour pallier ces limitations dans la partie perspectives de cette thèse.

Pour chaque agent $i \in \mathcal{A}$, nous définissons une relation de préférences $\succeq_i^{\mathcal{R}'}$ sur un domaine d'instances de ressources $\mathcal{R}' \subset \mathcal{R}$, représentant les préférences de l'agent i sur les ressources de \mathcal{R}' . Une relation de préférences est un pré-ordre complet, c'est-à-dire une relation réflexive et transitive sur \mathcal{R}' . Si $r \succeq_i^{\mathcal{R}'} r'$, alors nous dirons que r est *faiblement préférée* à r' du point de vue de i . Si $r \succeq_i^{\mathcal{R}'} r'$ et que $r' \not\succeq_i^{\mathcal{R}'} r$, alors nous dirons que r est *strictement préférée* à r' du point de vue de i , ce qui est noté $r \succ_i^{\mathcal{R}'} r'$. Enfin, si $r \succeq_i^{\mathcal{R}'} r'$ et que $r' \succeq_i^{\mathcal{R}'} r$, alors nous dirons que r est *indifférente* à r' du point de vue de i , ce qui est noté $r \sim_i^{\mathcal{R}'} r'$. Pour simplifier la configuration du modèle COR-E, nous n'autorisons que les préférences strictes et les relations d'indifférence.

Afin d'attribuer une valeur à une ressource $r \in \mathcal{R}'$ du point de vue d'un agent i , notée $v(r, i)$, nous avons déterminé une fonction linéaire $f : \mathcal{R}' \rightarrow \mathbb{R}$ donnant la valeur d'une ressource en fonction des préférences d'un agent. Grâce à cette fonction, nous souhaitons qu'une ressource $r \in \mathcal{R}'$ strictement préférée à une ressource $r' \in \mathcal{R}'$ ait une plus grande valeur que r' , que deux ressources indifférentes aient la même valeur, et que la valeur la plus faible soit égale à 1.

Cette fonction f respecte donc les propriétés suivantes :

- si $\forall r' \in \mathcal{R}' - \{r\}$, $r' \succ_i^{\mathcal{R}'} r$, alors $v(r, i) = 1$ (les ressources les moins préférées ont une valeur de 1) ;
- si $r \sim_i^{\mathcal{R}'} r'$, alors $v(r, i) = v(r', i)$ (deux ressources indifférentes ont la même valeur) ;
- si $r \succ_i^{\mathcal{R}'} r' \wedge \nexists r''$ tq. $(r \succ_i^{\mathcal{R}'} r'' \wedge r'' \succ_i^{\mathcal{R}'} r')$, alors $v(r, i) = v(r', i) + 1$.

Cela signifie que plus une ressource est préférée par un agent i , plus la valeur de la ressource est grande pour i . De plus, si $r \notin \mathcal{R}'$, alors $v(r, i) = 0$. Autrement dit si un

agent i ne possède aucune relation de préférence pour une ressource r , alors elle ne vaut rien de son point de vue. Cela permet à l'utilisateur du modèle de ne pas spécifier des préférences sur toutes les ressources de la simulation pour chaque agent, et de représenter des ressources n'ayant aucune valeur pour un agent.

Exemple : nous définissons un ensemble $\mathcal{R}' \subset \mathcal{R} = \{r_1, r_2, r_3\}$, et une relation de préférences pour un agent $i \in \mathcal{A}$ telle que $r_1 \succ_i^{\mathcal{R}'} r_2$ et $r_2 \sim_i^{\mathcal{R}'} r_3$. La valeur de chacune des ressources pour l'agent i est : $v(r_1, i) = 2$, $v(r_2, i) = 1$, $v(r_3, i) = 1$.

Un agent ne souhaite pas nécessairement acquérir une ressource qu'il ne possède pas et dont la valeur est supérieure à 0 de son point de vue. Comme une simulation peut éventuellement contenir un très grand nombre de ressources dont la valeur serait supérieure à 0 pour un agent i , nous avons déterminé un ensemble de ressources désirées RD_i de façon à pouvoir restreindre les ressources que i souhaite acquérir. Cette solution permet de mieux contrôler la configuration d'un agent et ses comportements possibles, mais demande aussi de configurer les ressources désirées, ce qui peut être une limitation.

5.3.1.4 Propriétés des types de ressources

Un type de ressource a des attributs booléens qui définissent : (i) des contraintes sur l'acquisition des instances de ressources de ce type, (ii) la façon dont les ressources désirées sont mises à jour. Ces attributs n'ont pas été définis dans la théorie originale de Hobfoll (1989). Ils ont été déterminés au cours de l'implémentation de plusieurs scénarios avec le modèle COR-E, qui ont demandé de mettre en place des contraintes pour gérer les mécanismes d'acquisition des ressources. Par ailleurs, un de ces attributs a une influence sur la mise à jour de l'ensemble des ressources désirées d'un agent. Les attributs d'un type $ty \in \mathcal{T}$ sont :

- **exclusif ou non exclusif** : si pour un type ty , $exclusif_{ty}$ vaut vrai, alors un agent ne peut posséder qu'une seule instance de ressource de ce type au même moment. Sinon, il peut posséder plusieurs ressources de ce type au même moment. Formellement, $\forall i \in \mathcal{A}, \forall r \in RA_i$, si $exclusif_{type(r)}$, alors $\nexists r' \neq r \in \mathcal{R}$ tq. $r' \in RA_i \wedge type(r) = type(r')$. En conséquence, si un événement a pour effet de faire acquérir une ressource r de type exclusif ty à un agent i , cet événement a aussi pour effet de faire perdre toute ressource $r' \neq r$ de type ty présente dans RA_i (nous formalisons les effets section 5.3.1.5). Par exemple, nous considérons qu'une ressource de type « Rang » dans une file d'attente est exclusive, car un agent ne peut occuper qu'un seul rang de cette file à la fois¹. Lorsqu'un agent réalise un comportement lui permettant d'acquérir une ressource de ce type, il sait que ce comportement va aussi lui faire perdre son rang actuel dans la file s'il en a un.
- **partageable ou non partageable** : si pour un type ty , $partageable_{ty}$ vaut vrai, alors une instance de ressource de ce type peut-être possédée par plusieurs agents au même moment. Sinon, elle ne peut être possédée que par un seul agent au même moment. Formellement, $\forall i \in \mathcal{A}, \forall r \in RA_i$, $partageable_{type(r)} = faux \rightarrow \nexists j \neq i \in \mathcal{A}$ tq. $r \in RA_j$. Un exemple de type de ressource partageable serait une coupe remportée lors d'un championnat en équipe. Tous les membres de l'équipe championne auraient l'instance de coupe de ce championnat dans leurs ressources acquises. Un

1. Nous ne gérons pas le fait qu'un agent i puisse demander à un agent $j \neq i$ d'occuper un rang pour lui dans la file.

exemple de type de ressource non partageable est une place dans une file d'attente, qui ne peut être acquise que par un seul agent au même moment.

- **personnel ou non personnel** : si pour un type ty , $personnel_{ty}$ vaut vrai, alors une instance de ressource de ce type ne peut pas être possédée par un autre agent que celui auquel elle est initialement attribuée, et ce à aucun moment. Formellement, soit \mathcal{T} l'ensemble des unités de temps possibles, $\forall t, t' \in \mathcal{T}^2, \forall r \in \mathcal{R}$, si $personnel_{type(r)} \wedge r \in RA_i$ au temps t , alors $\nexists j \neq i \in \mathcal{A}$ tq. $r \in RA_j$ au temps t' . Par exemple, une ressource représentant la santé d'un agent est de type personnel. Chaque agent possède une instance de ressource de ce type, et elle ne peut pas être acquise par un autre que lui. En revanche, cet agent peut éventuellement perdre une instance de ce type (en présence d'un incendie par exemple). De plus, si une ressource de type personnel est supprimée de l'ensemble des ressources acquises d'un agent RA_i , elle est automatiquement ajoutée à son ensemble de ressources désirées RD_i . Cela représente le fait que les ressources personnelles d'un agent sont constitutives de lui-même, et qu'il cherchera à acquérir de nouveau toute ressource personnelle qui a été perdue. Cette mise à jour des ressources désirées n'est pas évoquée dans la théorie COR de Hobfoll, car cette théorie postule que les individus cherchent à obtenir les ressources qu'ils ne possèdent pas. Dans le modèle COR-E, comme l'ensemble des ressources désirées par un agent i ne contient pas nécessairement toutes les ressources que l'agent i ne possède pas, il est nécessaire de déterminer des méthodes pour gérer l'ajout de ressources dans cet ensemble. Les ressources personnelles pourraient ne pas être les seules à être ajoutées dans l'ensemble RD_i lorsqu'elles sont perdues. Nous discutons cet aspect dans la partie perspectives de ce manuscrit.

5.3.1.5 Comportements et effets

Dans le modèle COR-E, un agent peut réaliser un comportement lui permettant de *modifier sa relation à son environnement*, ce qui correspond à un processus émotionnel (Lazarus et Folkman, 1984; Frijda, 2004). Cette relation à l'environnement est exprimée dans notre modèle par le point de vue de l'agent sur l'état des ressources de la simulation. Un agent a la possibilité de modifier les états des ressources en réalisant des comportements, qui ont des *effets* sur ces états. Par exemple, si la « vie » d'un agent est *menacée* par un feu, le comportement « éteindre le feu » permet de protéger la « vie » de l'agent en faisant en sorte qu'elle ne soit *plus menacée*. Si une « voiture » est *désirée* par un agent, le comportement « voler la voiture » réalisé par cet agent aura pour effet que la « voiture » soit *acquise* pour lui, et donc qu'elle ne soit *plus désirée*. Les états des ressources du point de vue d'un agent peuvent aussi changer en raison du comportement d'autres agents, ou d'états apparaissant dans l'environnement (par exemple, présence d'un feu). Les effets d'un comportement sur l'état des ressources tiennent une place centrale dans la sélection du comportement.

Nous notons $\mathcal{C} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ l'ensemble des comportements. Par souci de simplification pour la présentation du modèle formel, nous considérons ces comportements comme complètement instanciés. Ainsi, « Tom double Emma » est un comportement différent de « Emma double Tom ». Nous notons $agent(c)$ l'agent qui réalise le comportement c , et nous définissons $\forall c \in \mathcal{C}, \exists i \in \mathcal{A}$ tq. $agent(c) = i$. Un comportement n'est en effet instancié que lorsqu'un agent considère la possibilité de le réaliser.

Effets d'un comportement Les effets d'un comportement peuvent s'appliquer à différents moments de sa réalisation, et sont de plusieurs types. Un comportement a des *effets*

initiaux, qui s'appliquent dès le début de sa réalisation, et des *effets terminaux* s'appliquant à la fin de sa réalisation, lorsqu'il s'est terminé avec succès. Par ailleurs, certains effets initiaux peuvent être annulés automatiquement lorsque le comportement est interrompu, abandonné ou terminé, comme nous l'expliquons en détail ci-après. L'application d'effets à différents moments dans la réalisation d'un comportement est essentielle pour deux raisons. Tout d'abord, dans la simulation certains comportements peuvent durer relativement longtemps, et attendre la fin du comportement pour appliquer ses effets pourrait occasionner des temps de réaction trop longs dans certaines situations. Par exemple, lorsqu'un agent se déplace dans une file d'attente pour doubler un ou plusieurs agents, la place qu'il quitte doit être perçue comme immédiatement disponible par les autres agents, c'est-à-dire qu'elle n'est plus acquise pour l'agent qui double. Il ne serait pas logique d'attendre que cet agent ait terminé de doubler pour représenter le fait que sa place ne lui est plus acquise, ce qui ne permettrait pas à un autre agent de la prendre. Les simulations du projet Terra Dynamica sont en temps-réel, et ce type de contrainte doit être pris en compte. D'autre part, l'application d'effets à différents moments permet aussi à un agent de réagir de façon à protéger une ressource, ou à interrompre un comportement lorsqu'il entraîne des conséquences négatives. Par exemple, si un agent i double un agent j , la place possédée par l'agent j est menacée dès que i commence à doubler. Par contre, la place de j ne sera perdue pour j que lorsque i aura réalisé complètement son comportement. Cela laisse suffisamment de temps à l'agent j pour percevoir que sa place est menacée par i , et pour déclencher un comportement de protection contre i . En retour, si la riposte de l'agent j menace des ressources possédées par l'agent i , alors i peut interrompre son comportement si la balance des ressources perdues et gagnées n'est plus avantageuse de son point de vue. Les agents ont en effet une représentation des causes des menaces, que nous décrivons section 5.3.1.6. Le processus de sélection d'un comportement est détaillé section 5.3.2.4.

Un comportement c a quatre types d'*effets* sur les ensembles de ressources de certains d'agents, et ces effets peuvent être initiaux ou terminaux. Nous notons $ptnts(c) \subset \mathcal{A}$ l'ensemble des agents concernés par ces effets. La notation $ptnts$ correspond à la notion de patients, représentant ceux qui subissent les effets d'un comportement.

$\forall i \in ptnts(c)$, les effets appliqués quand le comportement c démarre sont :

- $R_c^{init+}(i)$, instances de ressources *acquises* pour i ;
- $R_c^{inito}(i)$, instances de ressources *protégées* pour i ;
- $R_c^{init\bullet}(i)$, instances de ressources *menacées* pour i ;
- $R_c^{init-}(i)$, instances de ressources *perdues* pour i .

$\forall i \in ptnts(c)$, les effets appliqués quand le comportement c se termine avec succès sont :

- $R_c^{term+}(i)$, instances de ressources *acquises* pour i ;
- $R_c^{termo}(i)$, instances de ressources *protégées* pour i ;
- $R_c^{term\bullet}(i)$, instances de ressources *menacées* pour i ;
- $R_c^{term-}(i)$, instances de ressources *perdues* pour i .

Nous définissons les contraintes suivantes sur la configuration de ces ensembles :

- $\forall r \in \mathcal{R}, r \in R_c^{init+}(i) \rightarrow r \notin R_c^{init-}(i)$: si une ressource est acquise pour i au début du comportement c , alors elle ne peut pas être perdue pour i au début du comportement ;
- $\forall r \in \mathcal{R}, r \in R_c^{term+}(i) \rightarrow r \notin R_c^{term-}(i)$: si une ressource est acquise pour i à la fin du comportement c , alors elle ne peut pas être perdue pour i à la fin du

- comportement ;
- $\forall r \in \mathcal{R}, r \in R_c^{init-}(i) \rightarrow r \notin R_c^{inito}(i) \cup R_c^{init\bullet}(i) \cup R_c^{init+}(i)$: si une ressource est perdue au début du comportement c pour i , elle ne peut pas être protégée, menacée, ou acquise pour i au début du comportement ;
 - $\forall r \in \mathcal{R}, r \in R_c^{term-}(i) \rightarrow r \notin R_c^{termo}(i) \cup R_c^{term\bullet}(i) \cup R_c^{term+}(i)$: si une ressource est perdue à la fin du comportement c pour i , elle ne peut pas être protégée, menacée, ou acquise pour i en fin de comportement ;
 - $\forall r \in \mathcal{R}, r \in R_c^{init\bullet}(i) \rightarrow r \notin R_c^{inito}(i) \cup R_c^{init-}(i)$: si une ressource est menacée pour i au début du comportement c , alors elle ne peut pas être protégée ou perdue pour i au début du comportement ;
 - $\forall r \in \mathcal{R}, r \in R_c^{term\bullet}(i) \rightarrow r \notin R_c^{termo}(i) \cup R_c^{term-}(i)$: si une ressource est menacée pour i à la fin du comportement c , alors elle ne peut pas être protégée ou perdue pour i à la fin du comportement ;
 - $\forall r \in \mathcal{R}, r \in R_c^{inito}(i) \rightarrow r \notin R_c^{init\bullet}(i) \cup R_c^{init-}(i)$: si une ressource est protégée pour i au début du comportement c , alors elle ne peut pas être menacée ou perdue pour i au début du comportement ;
 - $\forall r \in \mathcal{R}, r \in R_c^{termo}(i) \rightarrow r \notin R_c^{term\bullet}(i) \cup R_c^{term-}(i)$: si une ressource est protégée pour i à la fin du comportement c , alors elle ne peut pas être menacée ou perdue pour i à la fin du comportement ;
 - $\forall r \in \mathcal{R}, r \in R_c^{init\bullet}(i) \leftrightarrow r \in R_c^{term-}(i)$: si une ressource est menacée pour i au début du comportement c , alors elle est perdue pour i à la fin du comportement, et la réciproque est également vraie. Une menace sur une ressource représente toujours le fait que cette ressource sera perdue si elle n'est pas protégée, et si une ressource est perdue à la fin du comportement c cela signifie qu'elle était menacée pendant toute la durée du comportement.

Les effets d'un comportement $c \in \mathcal{C}$ sont appliqués grâce à des attributs booléens indiquant son statut. Ces trois attributs sont :

- $demarre(c)$: vaut vrai lorsque $agent(c)$ a démarré le comportement c , et faux sinon ;
- $termine(c)$: vaut vrai lorsque $agent(c)$ a terminé le comportement c , et faux sinon ($termine(c) = vrai \rightarrow demarre(c) = vrai$) ;
- $interrompu(c)$: vaut vrai lorsque le comportement c a été interrompu sans être terminé et qu'il n'a pas été repris, et faux sinon ($interrompu(c) = vrai \rightarrow (termine(c) = faux \wedge demarre(c) = vrai)$).

Ces attributs sont initialisés avec la valeur faux. Les effets sont appliqués sous les conditions suivantes :

- si $demarre(c) = faux$, et que l'opération $demarre(c) \leftarrow vrai$ est effectuée, alors les effets initiaux de c sont appliqués.
- si $termine(c) = faux$, et que l'opération $termine(c) \leftarrow vrai$ est effectuée, alors les effets terminaux de c sont appliqués.

L'opération $demarre(c) \leftarrow vrai$ est appliquée lorsqu'un comportement est sélectionné par un agent, et que le comportement n'a pas encore été démarré ($demarre(c) = faux$). L'opération $termine(c) \leftarrow vrai$ est appliquée lorsque le comportement se termine, ce qui peut se produire sous deux types de condition : (i) la durée totale du comportement s'est écoulée (par exemple « protester » se termine après 10 secondes), (ii) certaines conditions déclenchant la fin du comportement sont vérifiées (par exemple « se déplacer » se termine quand un agent a atteint sa destination).

De plus, l'interruption d'un comportement et le vol d'une ressource déclenchent des mises à jour sur les ensembles de ressources des agents :

1. **interruption d'une menace** : si $interrompu(c) = vrai$, alors $\forall i \in ptnts(c)$ les menaces de l'ensemble $R_c^{init\bullet}(i)$ sont annulées. En effet, dans le cas où la réalisation du comportement c n'a plus cours, ce dernier ne menace plus de ressources. En revanche, une ressource qui n'est plus menacée par c pour un agent i peut éventuellement être menacée par un autre comportement $c' \neq c \in \mathcal{C}$ en cours de réalisation. Si le comportement c interrompu est repris, alors $\forall i \in ptnts(c)$ les menaces de l'ensemble $R_c^{init\bullet}(i)$ sont à nouveau appliquées.
2. **apparition d'une menace liée à un vol** : soit deux agents $i, j \in \mathcal{A}$ avec $i \neq j$, et une ressource $r \in \mathcal{R}$ telle que $partageable_{type(r)} = faux$ (un seul agent peut posséder r). Si un comportement c démarré par i , non interrompu et non terminé a pour effet terminal de lui faire gagner r ($r \in R_c^{term+}(i)$) et que r est acquise par j ($r \in RA_j$), alors la ressource r est menacée pour j ($r \in RM_j$). De plus, lorsque $termine(c) = vrai$, r est perdue pour l'agent j ($RA_j \leftarrow RA_j - \{r\}$). Le comportement c peut être interprété comme le vol de la ressource r par l'agent i , initialement possédée par j .

Perception d'un comportement et de ses effets Si un comportement $c \in \mathcal{C}$ est perçu par un agent $i \in \mathcal{A}$, alors les effets de c sont également perçus par i . Tout agent i perçoit les comportements qu'il réalise ou qu'il peut réaliser. En revanche, sa perception des comportements réalisés par les autres agents est limitée par une distance. Tout comportement $c \in \mathcal{C}$ est associé à une valeur $distPerception_c$ indiquant la distance à laquelle le comportement c réalisé par un agent $j \neq i \in \mathcal{A}$ peut-être perçu par un agent i . Nous notons $distance(i, j)$ la distance euclidienne entre la position de l'agent i et la position de l'agent j dans l'environnement. Un comportement c réalisé par un agent j est perceptible par i si $distPerception_c \leq distance(i, j)$. Cette règle s'applique également si $i \in ptnts(c)$.

Exemple d'effets Deux agents i et j ont respectivement les rangs r_2 et r_1 dans une file d'attente. Nous notons $double_{i,j} \in \mathcal{C}$ le comportement « l'agent i double l'agent j dans la file ». Les effets initiaux de ce comportement sont : $R_{double_{i,j}}^{init-}(i) = r_2$, $R_{double_{i,j}}^{init\bullet}(j) = r_1$. Autrement dit, quand $demarre_{double_{i,j}}$ devient vrai, l'agent i perd sa place et l'agent j voit sa place menacée. Les effets terminaux de ce comportement sont : $R_{double_{i,j}}^{term+}(i) = r_1$, $R_{double_{i,j}}^{term-}(j) = r_1$, $R_{double_{i,j}}^{term+}(j) = r_2$. Autrement dit, lorsque $termine_{double_{i,j}}$ devient vrai, l'agent i a gagné la place r_1 et l'agent j a perdu r_1 et récupéré r_2 . Si le comportement de i avait été interrompu, alors d'après la règle 1. r_1 n'aurait plus été menacée pour l'agent j , et de plus les effets de fin n'auraient pas été appliqués.

5.3.1.6 Cause d'un état de ressource

Une ressource peut-être acquise ou menacée en raison du comportement d'un agent ou d'un état de l'environnement. Par exemple, si un agent i vole une ressource à un agent j , cette ressource sera menacée pour l'agent j en raison du comportement de vol de l'agent i . De même, si un incendie se déclare dans l'environnement, la santé d'un agent à proximité sera menacée en raison de cet état de l'environnement. Si une ressource $r \in \mathcal{R}$ est ajoutée dans un ensemble d'état de ressources E en raison du comportement d'un agent ou d'un état de l'environnement, alors la cause de cet ajout est mémorisée. Nous définissons $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ l'ensemble des états de l'environnement, représentés chacun par une proposition valant vrai ou faux. Soit \mathcal{C} l'ensemble des comportements, nous notons $cause(r, E) \in \{\mathcal{C} \cup \mathcal{S}\}$ la cause ayant provoqué l'ajout de la ressource r dans l'ensemble E . Par exemple, lorsqu'un agent i double un agent j pour lui prendre la ressource $rang_1$,

$cause(rang_1, RM_j) = double(i, j)$. Cela permet à l'agent j de réaliser des comportements adaptés à la cause de cette menace, comme par exemple protester contre i pour protéger sa place.

5.3.2 Sélection du comportement

Dans cette section, nous expliquons comment un comportement est sélectionné par un agent. Un agent ne peut adopter qu'un seul comportement à la fois, il doit donc déterminer celui qui lui est le plus approprié. Pour cela, il détermine d'abord quels sont les *comportements possibles* lui permettant d'atteindre ses buts (5.3.2.1). Ensuite, de façon à pouvoir comparer ces comportements, il attribue à chacun une *valeur*, calculée en fonction de ses préférences et des effets du comportement. En plus d'une valeur pour l'agent, les comportements ont également une *priorité* dépendant de leurs caractéristiques (section 5.3.2.3). Un agent sélectionne un comportement en fonction de sa valeur, et de sa priorité (section 5.3.2.4).

5.3.2.1 Comportements possibles

La théorie COR mentionne que les individus cherchent à protéger leurs ressources menacées, et à acquérir les ressources qu'ils ne possèdent pas. Dans le modèle COR-E, nous avons déterminé pour chaque agent $i \in \mathcal{A}$ un ensemble de ressources RD_i , représentant les ressources désirées par l'agent i , qui ne contient pas nécessairement toutes les ressources qu'il ne possède pas. Un agent du modèle COR-E a la possibilité de réaliser un comportement lui permettant d'acquérir une ressource désirée, ou de protéger une ressource menacée. Il peut réaliser ces comportements pour lui-même, mais également pour les autres agents, en les aidant à acquérir ou protéger des ressources. C'est-à-dire qu'un agent i peut aider un agent $j \neq i \in \mathcal{A}$ à obtenir une ressource r désirée par j ($r \in RD_j$), ou à protéger une ressource menacée pour j ($r \in RM_j$). Pour cela, i doit percevoir l'état de cette ressource r pour l'agent j , d'où nécessairement $r \in P_i(RD_j)$ ou $r \in P_i(RM_j)$, et il doit exister un comportement pouvant être réalisé par i ayant pour effet de faire acquérir la ressource r à j ou de la protéger. Chaque comportement a des préconditions qui doivent être vérifiées afin qu'un agent puisse le réaliser. Nous notons $Poss(c, t)$ le prédicat qui est *vrai* si et seulement si toutes les préconditions de c sont vérifiées au temps t .

Formellement, les comportements possibles pour agent $i \in \mathcal{A}$ au temps t , notés $C^{Poss}(i, t)$ sont définis de la façon suivante :

- $\forall c \in \mathcal{C}, r \in RD_i \wedge r \in (R_c^{init+}(i) \cup R_c^{term+}(i)) \wedge Poss(c, t) \rightarrow c \in C^{Poss}(i, t)$. Cela signifie que si i désire la ressource r , i a la possibilité de réaliser tout comportement lui permettant d'acquérir r dont les préconditions sont vérifiées ;
- $\forall c \in \mathcal{C}, r \in RM_i \wedge r \in (R_c^{inito}(i) \cup R_c^{termo}(i)) \wedge Poss(c, t) \rightarrow c \in C^{Poss}(i, t)$. Cela signifie que la ressource r est menacée pour i , i a la possibilité de réaliser tout comportement lui permettant de protéger r dont les préconditions sont vérifiées ;
- Soit $j \neq i \in \mathcal{A}$ un agent, $\forall c \in \mathcal{C}, r \in RD_j \wedge r \in (R_c^{init+}(j) \cup R_c^{term+}(j)) \wedge Poss(c, t) \rightarrow c \in C^{Poss}(i, t)$. Cela signifie que si j désire la ressource r , i a la possibilité de réaliser tout comportement permettant à j d'acquérir r dont les préconditions sont vérifiées ;
- Soit $j \neq i \in \mathcal{A}$ un agent, $\forall c \in \mathcal{C}, r \in RM_j \wedge r \in (R_c^{inito}(j) \cup R_c^{termo}(j)) \wedge Poss(c, t) \rightarrow c \in C^{Poss}(i, t)$. Cela signifie que la ressource r est menacée pour j , i a la possibilité de réaliser tout comportement permettant de protéger r pour j dont les préconditions sont vérifiées ;

Exemple (comportements individuels) : dans un scénario de file d'attente, nous dé-

finissons deux comportements, « doubler » et « protester » permettant respectivement d'acquérir ou de protéger une ressource représentant un rang dans la file d'attente. Tout rang $rang_x$ de la file est de type $Rang$, où x représente le numéro de rang (ainsi pour le meilleur rang, $x = 1$). Ces comportements sont :

- $doubler(i, j)$: lorsqu'un agent $i \in \mathcal{A}$ réalise ce comportement, il double un agent $j \in \mathcal{A}$. Ce comportement a pour effet de fin de faire obtenir à l'agent i le rang $rang_x$ actuellement possédé par l'agent j ($R_{doubler(i,j)}^{term+}(i) = \{rang_x\}$), et pour effet de début de faire perdre à i son rang actuel $rang_{x'}$ s'il en a un ($R_{doubler(i,j)}^{init-}(i) = \{rang_{x'}\}$). **Préconditions** : nous définissons une proposition $libre(j) \in \mathcal{S}$, qui vaut vrai s'il y a suffisamment de place devant l'agent j pour le doubler, et faux sinon. $Poss(doubler(i, j)) \equiv (rang_x \in RA_j \wedge libre(j) = vrai \wedge x \neq 1 \wedge agent(doubler(i, j)) = i)$. C'est-à-dire que i peut doubler l'agent j si l'agent j possède un rang $rang_x$ dans la file, s'il y a suffisamment d'espace devant j , et si j n'est pas en première position de la file. De plus, i doit être l'agent qui réalise ce comportement, nous supposons dans cet exemple qu'il n'est pas possible d'effectuer ce comportement pour autrui.
- $protester(i, j)$: lorsqu'un agent $i \in \mathcal{A}$ réalise ce comportement, il proteste contre un agent $j \in \mathcal{A}$. Ce comportement a pour effet de fin de protéger le rang $rang_x$ possédé par i ($R_{protester(i,j)}^{termo}(i) = \{rang_x\}$). **Préconditions** : $Poss(protester(i, j)) \equiv \exists cause(rang_x, RM_i) \in \mathcal{C}$ tq. $agent(c) = j$. C'est-à-dire que la cause de la menace de $rang_x$ est un comportement réalisé par j^2 , et l'agent réalisant ce comportement doit être j .

Dans cet exemple, le comportement $doubler(i, j)$ est possible pour i lorsqu'il permet à i d'acquérir une ressource r qu'il désire, et que $Poss(doubler(i, j)) = vrai$, et le comportement $protester(i, j)$ est possible pour i lorsqu'il permet à i de protéger une ressource r menacée et que $Poss(protester(i, j)) = vrai$.

Exemple (comportements d'aide) : nous considérons un scénario où un agent i a la possibilité d'aider un agent j coincé par un élément de l'environnement. Nous définissons un comportement permettant à i d'aider j à retrouver sa capacité à se déplacer :

- $aider(i, j)$: lorsque ce comportement est réalisé par un agent $i \in \mathcal{A}$, i aide l'agent $j \in \mathcal{A}$ qui est coincé pour qu'il retrouve sa capacité à se déplacer. Ce comportement a pour effet de fin de faire acquérir une ressource de mobilité à l'agent j ($R_{aider(i,j)}^{term+}(j) = \{mobilité_j\}$). Afin de représenter le fait qu'un agent j soit coincé, nous avons défini un état de l'environnement $coince(j)$, qui devient vrai lorsqu'un agent $j \in \mathcal{A}$ est coincé par un élément de l'environnement. **Préconditions** : $Poss(aider(i, j)) \equiv coince_j = vrai$, c'est à dire que l'agent j doit être coincé.

Dans cet exemple, le comportement $aider(i, j)$ est possible pour i lorsqu'il permet à j d'acquérir une ressource r qu'il désire avec $r \in P_i(RD_j)$, et que $Poss(aider(i, j)) = vrai$.

5.3.2.2 Calcul de la valeur d'un comportement

La valeur d'un comportement c anticipée par un agent i , notée $\mathcal{V}(c, i)$, est basée sur les ensembles d'effets de c et sur la valeur que i accorde aux ressources concernées par ces effets. Dans la théorie COR, l'acquisition de ressources permet d'atteindre un état de *bien-être*, qui est un état positif. En revanche, la menace et la perte de ressources conduisent

2. Nous rappelons que la cause d'un état de ressource peut être un comportement $c \in \mathcal{C}$ ou un état $s \in \mathcal{S}$ (voir section 5.3.1.6).

à un état de *stress*, qui est un état négatif. Pour cette raison, dans le modèle COR-E, des effets permettant de protéger ou d'acquérir une ressource sont considérés comme positifs du point de vue d'un agent, et des effets qui menacent ou font perdre des ressources sont considérés comme négatifs.

Nous avons vu que chaque comportement c peut avoir des effets d'acquisition ($R_c^{init+}(i)$, $R_c^{term+}(i)$), de protection ($R_c^{inito}(i)$, $R_c^{termo}(i)$), de menace ($R_c^{init\bullet}(i)$, $R_c^{term\bullet}(i)$) et de perte ($R_c^{init-}(i)$, $R_c^{term-}(i)$) de ressources pour tout agent $i \in ptnts(c)$, c'est-à-dire tout agent concerné par les effets de c .

Soit un comportement $c \in \mathcal{C}$, $\forall i \in ptnts(c)$, nous définissons l'ensemble des effets positifs pour i , noté $R_c^{POS}(i)$, et l'ensemble des effets négatifs pour i , noté $R_c^{NEG}(i)$, tels que :

$$\begin{aligned} - R_c^{POS}(i) &= R_c^{init+}(i) \cup R_c^{term+}(i) \cup R_c^{inito}(i) \cup R_c^{termo}(i); \\ - R_c^{NEG}(i) &= R_c^{init\bullet}(i) \cup R_c^{term\bullet}(i) \cup R_c^{init-}(i) \cup R_c^{term-}(i). \end{aligned}$$

Nous avons vu que tout agent $i \in \mathcal{A}$ attribue une valeur $v(r, i)$ à toute ressource $r \in \mathcal{R}$ selon le calcul que nous avons défini section 5.3.1.3. Pour déterminer la valeur d'un comportement c pouvant être réalisé par i du point de vue de i , nous souhaitons qu'un effet négatif de c sur une ressource valorisée par i (c'est-à-dire $v(r, i) > 0$) diminue la valeur de c , et qu'un effet positif sur une ressource valorisée par i augmente la valeur de c . Nous prenons en compte les effets concernant l'ensemble des agents inclus dans $ptnts(c)$, c'est-à-dire qu'ils peuvent concerner i ou d'autres agents. Nous souhaitons également représenter que plus une ressource a de valeur pour i , plus un effet négatif ou positif va respectivement diminuer ou augmenter la valeur de c . Afin de représenter ces aspects, nous avons déterminé que la valeur d'un comportement c du point de vue de i , notée $\mathcal{V}(c, i)$, serait la somme de la valeur pour i de chaque ressource concernée par un effet positif moins la somme de la valeur pour i de chaque ressource concernée par un effet négatif.

Formellement, la valeur d'un comportement c anticipée par un agent i est calculée comme :

$$\mathcal{V}(c, i) = \sum_{j \in ptnts(c)} \left(\sum_{r \in R_c^{POS}(j)} v(r, i) - \sum_{r \in R_c^{NEG}(j)} v(r, i) \right) \quad (5.1)$$

Si une ressource r est incluse à la fois dans $R_c^{POS}(j)$ et $R_c^{NEG}(j)$ elle comptera donc pour 0. Ce cas pourrait se produire si par exemple r est gagnée au début du comportement c par un agent, mais perdue en fin de comportement.

5.3.2.3 Priorités

Les comportements du modèle COR-E ont des priorités intervenant dans la sélection du comportement. Le premier type de priorité a été déterminé selon la théorie COR, et le second type de priorité a été défini pour représenter des conséquences à long terme.

Premier type de priorité Nous avons souhaité représenter le fait que la motivation d'un individu à *protéger* une ressource est supérieure à la motivation d'*acquérir* une ressource. Ce postulat provient de la théorie COR. Afin de le représenter dans le modèle COR-E, nous avons défini que tous les comportements permettant de protéger une ressource menacée sont prioritaires par rapport aux comportements permettant d'acquérir une ressource désirée. Nous formalisons cette priorité ci-après.

Second type de priorité Nous avons introduit une distinction non présente dans la théorie COR entre les comportements de protection de type *évitement*, et les comportements de protection de type *confrontation*. L'évitement consiste à s'éloigner de la cause d'une menace, tandis que la confrontation consiste à faire face à la cause de cette menace de façon à la supprimer ou la réduire (Cannon, 1920; Lazarus et Folkman, 1984). Le modèle COR-E ne permet pas de représenter le fait qu'un comportement d'évitement d'une menace n'empêche pas cette menace de réapparaître dans le futur, puisqu'un agent de notre modèle ne fait pas d'anticipation à long terme ou de planification. Si un individu dispose des ressources suffisantes pour se confronter à une menace, et que ce comportement de confrontation n'a pas de conséquences négatives importantes, il devrait préférer une stratégie de confrontation à une stratégie d'évitement. En effet, subir une menace une seule fois est préférable à subir la même menace plusieurs fois. Pour cette raison, nous avons donné la priorité aux comportements de type *confrontation* sur les comportements de type *évitement*. Un agent ne réalise pas de comportement de confrontation s'il n'a pas les ressources nécessaires, c'est-à-dire si les préconditions du comportement ne sont pas remplies, ou s'il envisage des conséquences négatives trop importantes, c'est à dire si la valeur du comportement est négative de son point de vue. Par exemple, une précondition d'un comportement de confrontation « attaquer » pourrait être de posséder de la « force », et une conséquence négative de ce comportement serait de faire perdre la « vie » à l'agent qui le réalise.

Cette priorité comporte une limitation, car elle ne permet pas à un agent d'*ignorer* les conséquences à long terme d'un comportement. Par exemple, un agent pourrait choisir une stratégie d'évitement parce qu'il n'anticipe pas les conséquences à long terme de cette stratégie, même s'il peut réaliser un comportement de confrontation (avec préconditions vérifiées et de valeur positive). Avec la solution que nous avons choisie, dans cette situation l'agent choisira toujours de réaliser le comportement de confrontation.

Afin de pouvoir prendre en compte ces priorités dans le processus de sélection, $\forall i \in \mathcal{A}$ nous attribuons $\forall c \in C^{Poss}(i, t)$ une classe de priorité $priorite(c) \in \{A, B, C\}$ en fonction des caractéristiques du comportement :

- **priorité A** : $\forall j \in ptnts(c), r \in P_i(RD_j) \wedge r \in (R_c^{init+}(j) \cup R_c^{term+}(j)) \rightarrow priorite(c) = A$. C'est-à-dire qu'un comportement ayant pour effet de faire acquérir une ressource r à un agent j et désirée par j est un comportement de priorité A.
- **priorité B** : nous déterminons d'abord un attribut booléen $protec(c)$ qui vaut vrai lorsque c est un comportement de protection, et faux sinon. $\forall j \in ptnts(c), r \in P_i(RM_j) \wedge r \in (R_c^{inito}(j) \cup R_c^{termo}(j)) \rightarrow protec(c) = vrai$. C'est-à-dire qu'un comportement ayant pour effet de protéger une ressource r d'un agent j menacée pour l'agent j est un comportement de protection. $\forall j \in ptnts(c), protec(c) \wedge \exists c' \text{ tq. } (cause(r, RM_j) = c' \wedge agent(c') \in ptnts(c)) \wedge \exists r \in (R_c^{init-}(agent(c')) \cup R_c^{term-}(agent(c')) \cup R_c^{init\bullet}(agent(c')) \cup R_c^{term\bullet}(agent(c')))) \rightarrow priorite(c) = B$. C'est-à-dire qu'un comportement ayant pour effet de protéger une ressource r d'un agent j menacée pour l'agent j à cause de l'agent $agent(c')$, et ayant pour effet de menacer ou faire perdre une ressource possédée par $agent(c')$ est un comportement de priorité B. Il vise en effet à protéger une ressource en infligeant des effets négatifs à l'agent responsable de la menace.
- **priorité C** : nous déterminons d'abord un attribut booléen $protec(c)$ qui vaut vrai lorsque c est un comportement de protection, et faux sinon. $\forall j \in ptnts(c), r \in P_i(RM_j) \wedge r \in (R_c^{inito}(j) \cup R_c^{termo}(j)) \rightarrow protec(c) = vrai$. C'est-à-dire qu'un comportement ayant pour effet de protéger une ressource r d'un agent j menacée

cée pour l'agent j est un comportement de protection. $\forall j \in ptnts(c), protec(c) \wedge \nexists c' \text{ tq. } (cause(r, RM_j) = c' \wedge agent(c') \in ptnts(c)) \wedge \exists r \in (R_c^{init-}(agent(c')) \cup R_c^{term-}(agent(c')) \cup R_c^{init\bullet}(agent(c')) \cup R_c^{term\bullet}(agent(c')))) \rightarrow priorite(c) = C$. C'est-à-dire qu'un comportement ayant pour effet de protéger une ressource r d'un agent j menacée pour l'agent j à cause de l'agent $agent(c')$, et n'ayant pas pour effet de menacer ou faire perdre une ressource possédée par $agent(c')$ est un comportement de priorité B. Il vise à protéger une ressource sans infliger d'effets négatifs à l'agent responsable de la menace.

Ces priorités interviennent dans la sélection du comportement (voir section 5.3.2.4 ci-après). Plus la priorité est haute, plus le comportement est favorisé.

5.3.2.4 Processus de sélection

Un agent sélectionne un comportement parmi l'ensemble des comportements possibles d'après la priorité et la valeur de ces comportements. Un comportement de priorité A de valeur positive (protection type confrontation) est toujours sélectionné face à un comportement de priorité B (protection type fuite) ou C (acquisition), et un comportement de priorité B de valeur positive est toujours sélectionné face à un comportement de priorité C. Ce processus de sélection rigide sur les priorités permet de contrôler les effets du modèle sur le comportement des agents, mais il comporte aussi des limitations. Si un agent assis à une terrasse de café a le choix entre rattraper un verre vide qu'il a lâché maladroitement pour le « sauver », ou attraper en vol un billet de 500 euros qui passe sous son nez, il va choisir de rattraper le verre, quelles que soient ses préférences entre les ressources « verre vide » et « billet de 500 euros ». Ce type de comportement serait sûrement considéré comme peu crédible du point de vue d'un observateur humain. La théorie COR précise que la perte de ressource est beaucoup plus significative que le gain de ressource, mais S. E. Hobfoll affirme qu'il n'est pas possible de déterminer exactement dans quelle proportion. Nous discutons des solutions envisageables concernant cet aspect dans la partie perspectives de cette thèse. Un agent sélectionne le comportement de valeur maximale positive parmi l'ensemble de comportements ayant la priorité de plus haut niveau. S'il existe plusieurs comportements de valeur maximale positive dans cet ensemble, alors un comportement est sélectionné aléatoirement parmi ceux-ci.

Formellement, l'algorithme de sélection de comportement pour un agent $i \in \mathcal{A}$ passe par les étapes suivantes :

1. *traitement des comportements de priorité A* : s'il existe des comportements possibles pour i de priorité A qui sont de valeur maximale > 0 pour i , alors ils sont ajoutés à un ensemble $\mathcal{C}' \subset \mathcal{C}$, et l'algorithme passe à l'étape 4. Sinon, il passe à l'étape 2 ;
2. *traitement des comportements de priorité B* : s'il existe des comportements possibles pour i de priorité B qui sont de valeur maximale > 0 pour i , alors ils sont ajoutés à l'ensemble \mathcal{C}' , et l'algorithme passe à l'étape 4. Sinon, il passe à l'étape 3 ;
3. *traitement des comportements de priorité C* : s'il existe des comportements possibles pour i de priorité C qui sont de valeur maximale > 0 pour i , alors ils sont ajoutés à l'ensemble \mathcal{C}' , et l'algorithme passe à l'étape 4.
4. *réalisation du comportement* : si \mathcal{C}' contient au moins un élément, i réalise un comportement c choisi aléatoirement parmi \mathcal{C}' .

La version formelle de l'algorithme principal est donnée dans l'algorithme 1. Les notations utilisées dans cet algorithme sont :

- *renvoyerCptPrioritaire*($\mathcal{C}', priorite$) : fonction qui renvoie l'ensemble des comportements $c \in \mathcal{C}' \subset \mathcal{C}$ tels que $priorite(c) = priorite \in \{A, B, C\}$;

- *renvoyerCptMax*(\mathcal{C}', i) : fonction qui renvoie l'ensemble des comportements $c \in \mathcal{C}' \subset \mathcal{C}$ dont la valeur $\mathcal{V}(c, i)$ est maximale et > 0 ;
- *renvoyerElement*(\mathcal{C}') : fonction qui renvoie un comportement au hasard parmi l'ensemble de comportements $\mathcal{C}' \subset \mathcal{C}$;
- *realiser*(i, c) : fonction permettant à un agent i de réaliser le comportement c au pas de temps courant.

Algorithme 1: Sélection du Comportement

Data : $i \in \mathcal{A}$, $C^{Poss}(i, t) \subset \mathcal{C}$
 $\mathcal{C}' \leftarrow \emptyset$;
 $\mathcal{C}' \leftarrow \text{renvoyerCptPrioritaire}(C^{Poss}(i, t), A)$;
 $\mathcal{C}' \leftarrow \text{renvoyerCptMax}(\mathcal{C}', i)$;
si $\text{card}(\mathcal{C}') = 0$ **alors**
 $\mathcal{C}' \leftarrow \text{renvoyerCptPrioritaire}(C^{Poss}(i, t), B)$;
 $\mathcal{C}' \leftarrow \text{renvoyerCptMax}(\mathcal{C}', i)$;
si $\text{card}(\mathcal{C}') = 0$ **alors**
 $\mathcal{C}' \leftarrow \text{renvoyerCptPrioritaire}(C^{Poss}(i, t), C)$;
 $\mathcal{C}' \leftarrow \text{renvoyerCptMax}(\mathcal{C}', i)$;
si $\text{card}(\mathcal{C}') > 0$ **alors**
 $c \leftarrow \text{renvoyerElement}(\mathcal{C}')$;
 realiser(i, c);

Interruption, Abandon, Répétition La sélection des comportements est gérée par certains processus qui concernent leur interruption, leur abandon, et leur répétition.

Interruption : un agent i peut interrompre un comportement qu'il réalisait au pas précédent s'il en sélectionne un autre au pas courant. Par exemple, s'il était en train de réaliser un comportement d'acquisition pour obtenir de la nourriture au temps $t - 1$, il peut sélectionner au temps t un comportement de protection alors que son comportement d'acquisition n'était pas terminé. Si un comportement c_1 sélectionné au temps t est différent d'un comportement c_2 réalisé au temps $t - 1$, le comportement c_2 est interrompu, c'est-à-dire que $\text{interrompu}(c_2) = \text{vrai}$, et c_2 est ajouté dans un ensemble de comportements interrompus par l'agent i , noté $C_i^{\text{interrompus}} \in \mathcal{C}$. Si un agent sélectionne un comportement c déjà contenu dans $C_{\text{interrompus}}$, il peut reprendre la réalisation de c , sauf s'il s'agit d'un comportement abandonné (nous expliquons l'abandon au paragraphe suivant). Cela permet de ne pas recommencer depuis le début un comportement dont la durée est déterminée (par exemple, « manger »), mais de le reprendre à partir du point où il a été interrompu. De plus, comme nous l'avons vu section 5.3.1.5, l'interruption d'un comportement suspend les menaces appliquées au début de ce comportement. Ces menaces sont de nouveaux appliquées si le comportement est repris.

Abandon : si un agent i réalise un comportement d'acquisition c_1 vis-à-vis d'une ressource r_1 possédée par un agent j , j peut possiblement réaliser un comportement de protection c_2 en menaçant une ressource r_2 possédée par l'agent i . Dans ce cas i a la possibilité d'arrêter son comportement d'acquisition en fonction de la menace causée par j . Plus précisément, si j réalise effectivement c_2 , alors si $\mathcal{V}(c_1, i) - \mathcal{V}(c_2, i) \leq 0$, i abandonne son comportement d'acquisition en cours. Cela signifie que les effets du comportement

d'acquisition de i ajoutés aux effets du comportement de protection de j résultent au total en une valeur négative ou nulle pour i . En somme le comportement de protection provoqué par i a trop d'effets négatifs. Tout comportement c abandonné par un agent i est ajouté à l'ensemble des comportements abandonnés par i , noté $C_i^{abandonnes} \in \mathcal{C}$, tel que $C_i^{abandonnes} = C_i^{abandonnes} \cup \{c\}$. De plus, l'agent j responsable de cet abandon à cause de son comportement de protection est mémorisé, tel que $causeAbandon(c) = j$ (cette variable est utilisée pour la gestion de la répétition expliquée dans le paragraphe ci-après). Si $abandonne(c)$, alors $interrompu(c)$, et les effets d'une interruption décrits ci-avant s'appliquent au comportement c .

Répétition : un agent a une mémoire lui permettant de ne pas répéter la réalisation de comportements « similaires » à des comportements ayant été abandonnés. Cette mémoire est notée $C_i^{memorises} \in \mathcal{C}$. Tout comportement abandonné par i appartient à cet ensemble, c'est-à-dire que si $\exists c \in \mathcal{C}$ tel que $agent(c) = i \wedge abandonne(c)$, alors $c \in C_i^{memorises}$. Si un comportement d'acquisition c_1 possible pour i est similaire à un comportement d'acquisition $c_2 \in C_i^{memorises}$, c_1 est retiré de l'ensemble des comportements pouvant être sélectionnés. Soit un comportement d'acquisition c_1 permettant d'obtenir une ressource r_1 , et un comportement d'acquisition c_2 permettant d'obtenir une ressource r_2 , c_1 est « similaire » à c_2 si : $agent(c_1) = agent(c_2) \wedge type(r_1) = type(r_2) \wedge r_1 \in RA_j \wedge causeAbandon(c_2) = j$. Cela représente le fait que si un agent i a essayé de voler une ressource r d'un certain type à un agent j , mais qu'il n'a pas réussi parce que j l'en a empêché, i n'essayera plus de voler une ressource de ce type à j . Dans les expérimentations que nous présentons dans les chapitres suivants, les comportements contenus dans $C_i^{memorises}$ restent dans cet ensemble pendant toute la durée du scénario. Nos scénarios étant de courte durée, cette mémoire est permanente.

5.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la formalisation du modèle COR-E, conçu pour la simulation de comportements affectifs crédibles. Ce modèle est fondé sur la théorie COR, établie par le psychologue Hobfoll (1989). Les comportements d'un agent sont guidés par le désir d'acquérir des ressources désirées, et de protéger des ressources menacées. Un agent a des préférences sur un sous-ensemble de ressources de la simulation qui déterminent la valeur des comportements possibles. La sélection d'un comportement est effectuée en fonction de la valeur de l'ensemble des comportements possibles, et de leur priorité. Ces priorités sont établies par rapport aux classes des comportements, la protection étant prioritaire par rapport à l'acquisition.

La formalisation du modèle COR-E comporte des éléments supplémentaires par rapport à la théorie COR de Hobfoll, et nous avons fait le choix de ne modéliser que le premier principe de cette théorie. Nous avons donc étendu et à la fois restreint la théorie originale. Cela est courant dans un modèle informatique dérivé d'une théorie psychologique. Les psychologues ont des objectifs thérapeutiques, et manipulent des concepts spécialement dédiés à ces objectifs. Dans notre thèse, notre objectif est d'obtenir des comportements émotionnels crédibles. De ce fait, les concepts psychologiques pertinents ne sont plus tout à fait les mêmes. Par exemple, ce que Hobfoll nomme *la spirale des pertes* de ressources induisant un stress profond chez un individu n'a pas été modélisée dans COR-E. Les modèles psychologiques n'étant pas non plus formalisés, il est nécessaire de les réinterpréter pour en proposer une formalisation. Marsella et Gratch (2009) remarquent que les modèles informatiques poussent souvent les théories psychologiques à un niveau de détail plus

avancé qu'elles ne l'étaient au départ, et que cela peut même permettre d'apporter des éclairages sur ces théories qui n'avaient pas été entrevus auparavant. Le modèle COR-E reste fortement imprégné des fondements de la théorie COR : ce sont les gains et les pertes de ressources qui guident le comportement d'un individu.

Dans les chapitres 6 et 7 suivants, nous vérifions si les choix de conception que nous avons effectués dans le modèle COR-E sont corrects. Nous cherchons à savoir si les comportements produits par le modèle sont jugés comme crédibles et émotionnels par des observateurs humains, et quelles sont les contributions des caractéristiques de l'architecture sur ces résultats.

Chapitre 6

Évaluation Préliminaire de COR-E

6.1 Objectifs

Dans ce chapitre, nous présentons l'évaluation préliminaire du modèle COR-E, qui a été réalisée pour tester la capacité du modèle à produire des comportements jugés crédibles et émotionnels par des observateurs humains. L'objectif de ce modèle est de simuler de tels comportements grâce à la dynamique d'acquisition et de protection de ressources, sans utiliser de variables représentant des catégories d'émotion. Afin de vérifier la validité d'une telle approche, il est nécessaire de s'assurer que les comportements produits sont effectivement des comportements émotionnels. Dans un système manipulant des variables représentant des catégories d'émotion, il semble logique de considérer les comportements produits comme « émotionnels », puisqu'ils sont influencés par des variables représentant des émotions. La question de savoir si ces comportements sont jugés émotionnels ou non par un observateur humain ne se pose pas. L'objectif de tels modèles est de vérifier si les catégories d'émotions simulées par un agent se trouvant dans une certaine situation correspondent effectivement aux catégories d'émotion qui seraient ressenties par un être humain dans la même situation. Pour cela, on propose généralement aux participants humains de sélectionner une émotion parmi une liste, ou d'assigner un score d'intensité à chaque émotion de la liste, puis on vérifie si ces réponses correspondent à l'état du modèle.

La particularité de l'approche des modèles d'émergence des émotions étant de ne pas simuler d'émotions, on ne peut pas affirmer que les comportements produits sont émotionnels parce qu'ils sont influencés par des émotions. Il est nécessaire de vérifier si les observateurs humains sont capables d'interpréter des catégories d'émotions en observant le comportement des agents, tout en les orientant le moins possible dans leur jugement. Aucun modèle d'émergence des émotions ne semble avoir utilisé de protocole destiné à cet effet. Nous proposons donc un protocole destiné à cette tâche, que nous avons appliqué au modèle COR-E. Ce protocole doit en même temps évaluer la crédibilité des comportements produits. Cet aspect semble rarement évalué dans les modèles affectifs, mais il est indispensable car nous allons voir qu'un comportement jugé émotionnel par un observateur humain peut être jugé non crédible. S'il est possible qu'un agent adopte un comportement peu crédible, comme cela peut arriver dans la réalité, il n'est en revanche pas acceptable qu'une majorité d'agents réalisent des comportements non crédibles.

Pour réaliser cette évaluation, nous avons choisi de montrer des vidéos de simulation produites par COR-E à des observateurs humains, et de leur poser des questions à propos des comportements des agents observés dans ces vidéos. Les scénarios que nous avons choisi d'implémenter pour réaliser ces vidéos correspondent à des situations où l'on peut observer des comportements considérés comme associés aux émotions, comme « fuir » ou

« protester ».

L'évaluation que nous présentons dans ce chapitre est organisée de la façon suivante : nous formulons les hypothèses que nous souhaitons vérifier à propos du modèle COR-E (section 6.2), nous expliquons le protocole utilisé pour vérifier ces hypothèses (section 6.3), puis nous détaillons les résultats obtenus (section 6.4). Nous terminons par la discussion de ces résultats (section 6.5).

6.2 Hypothèses générales

Dans cette évaluation préliminaire, nous avons essayé de savoir si les comportements produits par le modèle COR-E pouvaient être jugés crédibles et émotionnels, et quel impact pouvaient avoir les préférences des agents sur ces jugements. Nos hypothèses se fondent sur l'idée que l'architecture de COR-E est capable de produire des comportements émotionnels, et nous nous sommes aussi demandé si des comportements jugés non crédibles pouvaient être jugés émotionnels. Nous avons supposé que des comportements non crédibles seraient principalement causés par des préférences incohérentes, c'est-à-dire ne correspondant pas à la norme, et que des préférences cohérentes permettraient de produire des comportements jugés à la fois crédibles et émotionnels. En relation avec ces suppositions, nous avons établi deux hypothèses générales :

- **H1** : les comportements produits par le modèle COR-E sont jugés émotionnels par les observateurs humains lorsque les préférences des agents suivent une certaine norme et que des comportements d'acquisition et de protection sont observés ;
- **H2** : les comportements produits par le modèle COR-E sont jugés crédibles par les observateurs humains lorsque les préférences des agents correspondent à une certaine norme ;

6.3 Protocole

Notre protocole a consisté à soumettre des vidéos de simulations produites par COR-E à des observateurs humains, puis à poser des questions aux observateurs sur les aspects que nous souhaitions évaluer. Les vidéos ont été produites avec des configurations différentes : certaines correspondaient au modèle COR-E configuré de façon correcte, et d'autres correspondaient au modèle COR-E configuré de façon incorrecte ou amputé de certaines fonctionnalités. Notre objectif principal dans cette évaluation préliminaire était de savoir si des émotions pouvaient être reconnues par les observateurs, tout en influençant le moins possible ces observateurs dans le choix de leur réponse. Pour cela, nous avons choisi de ne pas proposer de listes d'émotions aux participants, et d'inclure des questions sans rapport apparent avec les émotions. Nous avons inclus des questions fermées mais aussi des questions ouvertes, pour que les observateurs puissent s'exprimer librement sans que leur choix soit contraint par des listes, et nous avons fait en sorte que la première page du questionnaire ne contienne aucun terme lié aux émotions. Le questionnaire est décrit ci-après dans la section 6.3.1.

Afin de produire des vidéos de simulation, nous avons déterminé deux scénarios dans lesquels : (i) il est possible pour les agents de sélectionner des comportements considérés comme émotionnels, comme « fuir » ou « protester », et (ii) plusieurs ressources sont représentées, afin que les agents puissent exprimer des préférences différentes sur ces ressources. Le premier scénario est un incendie se déroulant dans une cuisine, dans lequel un agent choisit l'ordre dans lequel il sauve plusieurs ressources. Le second scénario est une file d'attente, dans laquelle des agents peuvent doubler et protester, en fonction de leurs

préférences sur la réputation qu'ils mettent en jeu et les places dans la file qu'ils peuvent gagner. Nous avons configuré ces deux scénarios avec l'implémentation du modèle CORE, et produit des vidéos de simulation pour chacun d'entre eux (sept vidéos au total) en faisant varier des préférences des agents. Nous expliquons en détail comment ces vidéos ont été produites ci-après dans la section 6.3.2.

Nous avons mis en ligne le questionnaire et les vidéos sur un site web, de sorte qu'un participant répondant au questionnaire ne soit interrogé sur qu'une seule vidéo, tirée aléatoirement parmi les sept disponibles. Nous avons diffusé l'adresse du questionnaire sur une liste de diffusion (liste des échos du Relais d'Information sur les Sciences de la Cognition, RISC) et des forums de discussion (les forums traitaient d'activité de loisirs comme le dessin ou le sport). Chaque participant se rendant à cette adresse pouvait répondre au questionnaire à propos d'une vidéo.

6.3.1 Questionnaire

Le questionnaire était décomposé en 3 pages. Le début de chaque page contenait le texte d'introduction, la description du scénario correspondant à la vidéo de simulation, et la vidéo (des captures d'écran du questionnaire sont montrés dans l'annexe A). Le texte de bienvenue était commun pour les vidéos issues de deux scénarios, et la description était propre à chaque scénario.

Texte de bienvenue : « Vous allez participer à une évaluation de comportements de personnages virtuels. Pour cela, nous vous demandons de regarder la vidéo ci-dessous après avoir lu le contexte, puis de répondre aux questions dans l'ordre. Le questionnaire concerne uniquement le comportement des personnages et non le rendu visuel. »

Description pour le scénario de l'incendie : « Contexte : deux personnages, un adulte et un bébé, sont dans une cuisine. Le bébé se trouve près d'un oiseau en cage, et un hamburger est posé sur la table. Un feu va se déclencher dans la pièce. L'adulte peut alors exécuter les comportements suivants : sauver le bébé, sauver l'oiseau, ou sauver le hamburger. Il ne peut porter qu'un seul de ces éléments à la fois, et le bébé ne peut pas se déplacer seul. »

Description pour le scénario de la file d'attente : « Contexte : des personnages font la queue dans une file d'attente pour obtenir un ticket. Ils ont la possibilité de patienter ou de doubler. »

La **page 1** comportait des questions relatives à la situation du participant : sexe, âge, situation socio-professionnelle, secteur d'activité et niveau d'études.

La **page 2** comportait deux questions ouvertes :

- « Pourriez-vous décrire le(s) comportement(s) du personnage ? »
- « A votre avis, pourquoi adopte-t-il ce(s) comportement(s) ? »

Ces questions sont respectivement référencées par les labels DESC et EXPL dans la suite de ce chapitre. Il était obligatoire d'y répondre pour accéder à la troisième page du questionnaire.

La **page 3** contenait des questions ouvertes, ainsi que des questions fermées sur une échelle de Likert à 5 niveaux (de *pas du tout d'accord* à *tout à fait d'accord*) :

- « Selon vous, est-ce qu'il s'agit de comportement(s) réaliste(s) ? » (question fermée, label REAL) ;
- « Selon vous, est-ce que ce(s) comportement(s) est/sont lié(s) à des traits de personnalité chez le personnage ? » (question fermée) ;

- « Si vous êtes d'accord avec la question précédente, pourriez-vous citer ces traits de personnalité? » (question ouverte);
- « Selon vous, est-ce que ce(s) comportement(s) est/sont lié(s) à une/des décision(s) rationnelle(s) chez le personnage? » (question fermée);
- « Selon vous, est-ce que ce(s) comportement(s) est/sont lié(s) à des émotions chez le personnage? » (question fermée, label EMO)
- « Si vous êtes d'accord avec la question précédente, pourriez-vous citer ces émotions? » (question ouverte, label EMO_LIST).

Les réponses aux questions fermées étaient obligatoires pour valider le questionnaire. La fin de cette troisième page contenant un champ de saisie pour que les participants puissent faire part de commentaires éventuels.

Pour le scénario de file d'attente, les questions étaient formulées de sorte que le mot « personnage » soit au pluriel puisque ce scénario mettait en scène plusieurs agents. Par exemple la question DESC était formulée de la façon suivante : « Pourriez-vous décrire le(s) comportement(s) des personnages? ». La vidéo et le contexte du scénario étaient affichés au début de chaque page, et le participant pouvait regarder la vidéo autant de fois qu'il le souhaitait. Dans les captures d'écran montrées dans l'annexe A, nous avons coupé la vidéo et le contexte pour les pages 2 et 3 pour économiser de l'espace.

Les questions à propos des décisions rationnelles et de la personnalité ont été introduites pour éviter que les participants ne se concentrent pas uniquement sur le réalisme et les émotions. Ces questions ne sont pas considérées dans les résultats.

6.3.2 Production des vidéos de simulation

Nous avons produit trois vidéos de simulation pour le scénario d'incendie, et quatre vidéos pour le scénario de la file d'attente. Ces vidéos ont été enregistrées avec le simulateur MASON (Luke *et al.*, 2005), dans lequel COR-E a été implémenté. Nous expliquons ci-après comment le modèle COR-E a été configuré pour produire chacune de ces vidéos, et nous donnons une description pour chacune d'elles.

6.3.2.1 Scénario d'incendie

Dans le scénario d'incendie, un agent représentant un adulte a la possibilité de sauver plusieurs types de ressources menacées par un incendie dans une cuisine. Il peut protéger sa sécurité et sa propre vie, ou bien protéger un bébé, un oiseau en cage, ou un hamburger. L'agent ne peut sauver qu'une seule ressource à la fois, et l'ordre dans lequel il les protège dépend de ses préférences. Pour protéger sa sécurité ou sa vie l'agent peut fuir, et pour protéger les autres ressources il doit les emmener à l'extérieur de la pièce. Au début du scénario l'agent mange, et le feu se déclare quelques secondes plus tard. Nous avons produit 3 vidéos de simulation pour ce scénario.

Ressources utilisées Dans la configuration du scénario, nous avons défini les ressources suivantes :

- $hamburger_1 \in \mathcal{R}$: représente un hamburger. Au début de la simulation, ce hamburger est posé sur une table dans la cuisine. Nous définissons $type(hamburger_1) = Nourriture$. Dans le scénario cette ressource représente l'énergie qui peut être obtenue par l'action de manger, et non un aliment pouvant être acquis en réalisant un achat ;

- $oiseau_1 \in \mathcal{R}$: représente un oiseau en cage. Au début de la simulation, l'oiseau en cage est placé dans le coin supérieur droit de la cuisine. Nous définissons $type(oiseau_1) = Oiseau$;
- $bebe_1 \in \mathcal{R}$: représente un bébé. Au début de la simulation, le bébé est placé dans le coin supérieur droit de la cuisine. Nous définissons $type(bebe_1) = Bebe$;
- $vie_1 \in \mathcal{R}$: représente une ressource de vie. Cette ressource n'est pas représentée graphiquement, mais si l'agent possédant cette ressource la perd, il ne peut plus réaliser de comportements. Nous définissons $type(vie_1) = Vie$.
- $securite_1 \in \mathcal{R}$: représente une ressource de sécurité. Lorsqu'un agent possède une telle ressource, cela représente le fait qu'il se situe dans une situation sécurisante. Nous définissons $type(securite_1) = Securite$.

Initialisation des ensembles de ressources et des préférences Les ressources désirées et acquises de l'agent ont été initialisées de la même façon pour ces 3 vidéos. En revanche, ses préférences ont été configurées différemment. Soit i l'agent adulte, nous avons défini : $RA_i = \{hamburger_1, oiseau_1, bebe_1, securite_1, vie_1\}$, et $RD_i = \{hamburger_1\}$.

Pour chaque vidéo, les préférences ont été définies de la façon suivante :

- **vidéo 1 et 3** : $vie_1 \succ_i^R bebe_1 \succ_i^R oiseau_1 \succ_i^R securite_1 \succ_i^R hamburger_1$. Cela correspond à des préférences que nous estimons normatives ;
- **vidéo 2** : $vie_1 \succ_i^R hamburger_1 \succ_i^R oiseau_1 \succ_i^R bebe_1 \succ_i^R securite_1$. Cela correspond à des préférences que nous estimons anormales, car un hamburger n'est pas censé être plus important qu'un être vivant ;

D'après ces préférences la ressource vie_1 est toujours préférée à toutes les autres pour l'agent i (nous revenons sur ce choix dans la section 6.5 sur la discussion des résultats de cette évaluation).

Comportements L'incendie a été implémenté comme un agent dont le comportement est programmé à l'avance (l'incendie n'est pas considéré comme un agent autonome pouvant réaliser des comportements affectifs). Il n'est pas obligatoire de modéliser le feu comme un agent, il pourrait également être implémenté sous la forme d'un état $s \in \mathcal{S}$. Dans notre scénario l'agent $feu \in \mathcal{A}$ a été programmé pour menacer puis faire perdre des ressources à une date déterminée. Il peut réaliser le comportement $bruler(feau, r)$, dont l'effet initial est de menacer la ressource r , et l'effet terminal est de la faire perdre à l'agent qui la possède en la détruisant (c'est-à-dire que r est retirée de l'ensemble \mathcal{R} des ressources de la simulation). Ce comportement se termine après une certaine durée, pouvant être configurée. L'agent feu peut brûler plusieurs ressources à la fois. Lorsque le feu détruit une ressource visible, la ressource détruite est remplacée par une petite flamme. Dans les trois vidéos du scénario de l'incendie, lorsque l'agent feu est activé, une flamme apparaît dans le coin supérieur gauche de la cuisine à côté d'un four, et la réalisation des comportements $bruler(feau, hamburger_1)$, $bruler(feau, oiseau_1)$, $bruler(feau, bebe_1)$ et $bruler(feau, securite_1)$ démarre immédiatement. La date à laquelle le feu commence le comportement $bruler(feau, vie_1)$ est différente en fonction des vidéos de simulation (cette date est précisée dans le tableau 6.1). Cette date est avancée dans la vidéo 3, de sorte que l'agent i n'ait pas le temps de sauver des ressources avant que sa propre vie soit menacée.

L'agent adulte i pouvait réaliser les comportements suivants :

- $sortir(i, r)$: il s'agit d'un comportement de protection de type évitement pour une ressource $r \in \mathcal{R}$ avec $type(r) \in \{Nourriture, Oiseau, Bebe\}$. Ce comportement représente un agent $i \in \mathcal{A}$ qui va chercher la ressource r , la prend dans ses mains, et part la déposer à l'extérieur de la pièce ;

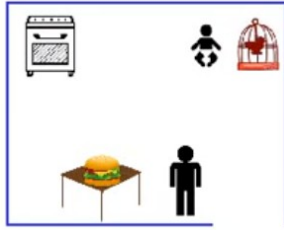


FIGURE 6.1 – Vidéos 1, 2, et 3 à 0 secondes (début de la simulation).

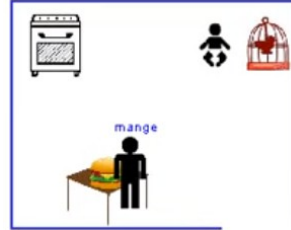


FIGURE 6.2 – Vidéos 1, 2, et 3 à 2 secondes. L'adulte est en train de manger.



FIGURE 6.3 – Vidéos 1, 2, et 3 à 3 secondes. Le feu s'est déclaré, l'adulte démarre un comportement de protection.



FIGURE 6.4 – Vidéo 1 à 3 secondes. L'adulte emmène le bébé à l'extérieur de la pièce.



FIGURE 6.5 – Vidéo 1 à 18 secondes (fin de la vidéo). L'adulte a sauvé le bébé et l'oiseau.

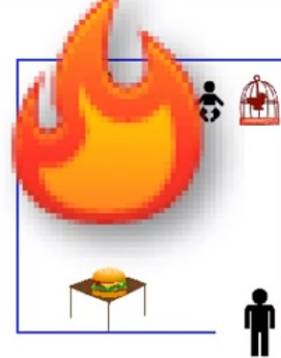


FIGURE 6.6 – Vidéo 3 à 6 secondes. L'adulte a fui parce que sa vie est menacée.

- $fuir(i, r)$: il s'agit d'un comportement de protection de type évitement pour une ressource $r \in \mathcal{R}$ avec $type(r) \in \{Vie, Securite\}$. Ce comportement représente un agent $i \in \mathcal{A}$ en train de fuir, c'est-à-dire qu'il sort de la pièce sans aucune ressource entre les mains ;
- $manger(i, r)$: il s'agit d'un comportement d'acquisition pour une ressource $r \in \mathcal{R}$ avec $type(r) = Nourriture$. Ce comportement représente un agent $i \in \mathcal{A}$ en train de manger la ressource r . Lorsqu'un agent réalise ce comportement, il se rapproche de la ressource r , puis une indication textuelle « mange » est affichée au-dessus de lui.

Nous donnons la description complète des trois vidéos de simulation du scénario de l'incendie dans le tableau 6.1. Des captures d'écran correspondant à ce scénario sont montrées sur les figures 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 et 6.6.

6.3.2.2 Scénario de file d'attente

Dans le scénario de la file d'attente, des agents patientent dans une file pour acheter un ticket. Ils ont la possibilité de doubler pour changer de place dans la file, et de protester pour se défendre quand ils se font doubler. Quand un agent proteste, il peut faire perdre de la réputation à l'agent contre lequel il proteste. Les agents anticipent qu'ils peuvent perdre

de la réputation lorsqu'ils doublent, et choisissent donc leur comportement en fonction de l'importance qu'ils accordent à leur réputation et au rang qu'ils peuvent gagner. Une capture d'écran de ce scénario est montrée sur la figure 6.7. Nous avons produit 4 vidéos de simulation pour ce scénario.

Ressources utilisées Nous avons défini deux types d'instances de ressources pour ce scénario :

- des ressources de type *Rang*, représentant chacune un rang dans la file d'attente. Le type *Rang* est exclusif, c'est-à-dire que $exclusif_{Rang} = vrai$ et $partageable_{Rang} = faux$ (ces attributs ont été expliqués en section 5.3.1.4). En effet, nous considérons qu'un agent ne peut acquérir qu'un seul rang à la fois (un rang est donc exclusif), et qu'un rang ne peut être acquis que par un seul agent, c'est-à-dire que les agents sont en file indienne (un rang est donc non partageable). Les rangs portaient un numéro correspondant à leur place dans la file (le premier rang porte le numéro 1, le second le numéro 2, le n ème le numéro n). Cela permet de les classer dans l'ordre de préférences des agents ;
- des ressources de type *Reputation*, représentant de la réputation. Ce type de ressource est personnel et non partageable, mais ces propriétés n'ont aucune incidence dans le scénario que nous avons implémenté. En effet nous n'avons pas défini de comportement permettant aux agents d'acquérir une ressource de type *Reputation*. On peut aussi considérer que la réputation est un bien non personnel car elle peut se vendre, comme la réputation d'une entreprise, et aussi qu'elle peut être partageable, par exemple entre tous les salariés de l'entreprise. Dans ce scénario de file d'attente, la réputation représente seulement une réputation personnelle non partageable.

Initialisation des ensembles de ressources et perception La simulation comportait sept agents représentant l'ensemble des agents \mathcal{A} . Chaque agent $i \in \mathcal{A}$ possédait quatre instances de type *Reputation* dans l'ensemble de ses ressources acquises RA_i , classés selon un ordre strict dans les préférences de i . Ce nombre a été déterminé de façon à pouvoir menacer la réputation d'un agent avec quatre degrés d'importance, comme nous l'expliquons ci-après dans la description des comportements.

Il existait également sept ressources de type *Rang* pouvant être acquises. En effet, comme un rang la file ne peut contenir qu'un seul agent, le nombre de rangs maximum de la file est égal au nombre d'agents, soit sept. A l'initialisation, tout agent i acquerrait un rang choisi aléatoirement parmi les sept rangs disponibles, et l'agent était placé dans la file d'attente en fonction de ce rang. Par exemple, l'agent possédant le rang numéro un était placé en tête de file. Toutes les ressources de type *Rang* ont été ajoutées à l'ensemble des ressources désirées RD_i pour tout $i \in \mathcal{A}$, à l'exception du rang déjà acquis par i . L'ensemble RD_i a été ensuite automatiquement mis à jour en fonction de la valeur de la propriété $exclusif_{Rang}$, dont les mécanismes associés ont été expliqués section 5.3.1.4. C'est-à-dire que toute ressource de type *Rang* appartenant à RD_i dont la valeur pour i est inférieure au rang qu'il possède est retirée de RD_i . Par exemple si i possède le rang 1, alors tous les autres rangs sont retirés de l'ensemble RD_i .

Dans ce scénario, nous avons choisi que l'état des ressources acquises d'un agent $i \in \mathcal{A}$ soit directement perceptible par tout agent $j \in \mathcal{A}$. Formellement $P_j(RA_i) = RA_i$. Cela signifie que tout agent i peut voir les instances de ressources de type *Rang* et *Reputation* qui sont acquises chaque agent j . La file d'attente est en effet suffisamment courte pour que chaque agent i puisse voir le rang possédé par les autres agents. En revanche, nous aurions pu représenter le fait que chaque agent i puisse attribuer un niveau de réputation

différent à un agent $j \neq i$ en fonction de ce qu'il a observé auparavant. Par exemple, si l'agent i a vu l'agent j voler un bonbon à un enfant quelques minutes avant que i et j ne se retrouvent tous les deux dans la file, j attribuerait une plus mauvaise réputation à i que les autres agents n'ayant pas vu le comportement de i . Nous avons déterminé $P_j(RA_i) = RA_i$ parce que notre scénario ne représente pas les événements ayant pu se produire en dehors de la file d'attente, et qu'il aurait été difficile de faire comprendre aux participants de l'évaluation que chaque agent i avait une perception différente de la réputation des autres.

Initialisation des préférences Les préférences de chaque agent étaient initialisées avec les rangs de la file d'attente, de telle sorte que si un rang x avait un numéro inférieur à un rang x' , alors le rang x était strictement préféré au rang x' (par exemple, le premier rang est meilleur que le second rang). Ensuite, la façon dont les ressources de réputation étaient insérées dans cet ordre de préférence pour chaque agent i variait selon les vidéos :

- **vidéo 4** : en début de simulation, pour tout agent $j \in \mathcal{A}$, toute instance de type *Reputation* était strictement préférée à toute ressource de type *Rang*. A partir d'une date d , les préférences d'un agent unique $i \in \mathcal{A}$ ont été modifiées, de sorte que toute ressource de type *Rang* était strictement préférée à toute instance de ressource de type *Reputation* pour cet agent. Cela signifie que l'agent i préfère gagner un rang quitte à perdre une ressource de réputation, mais que les autres agents préfèrent conserver leur réputation. Cela peut-être associé à une situation où i devient en retard, et où obtenir un meilleur rang devient plus important pour lui que conserver sa réputation.
- **vidéo 5** : pour tout agent $i \in \mathcal{A}$, toute ressource de type *Reputation* est strictement préférée à toute ressource de type *Rang* ;
- **vidéo 6** : pour tout agent $i \in \mathcal{A}$, une majorité de ressources de type *Rang* sont strictement préférées aux ressources de type *Reputation*. Cela correspond à des préférences que nous estimons anormales, puisque cela devrait conduire un grand nombre d'agents à adopter le comportement « doubler » ;
- **vidéo 7** : pour tout agent $i \in \mathcal{A}$, une majorité de ressources de type *Reputation* sont strictement préférées aux ressources de type *Rang*.

Ces paramétrages ont été faits dans le but de montrer la pertinence de l'ordre de préférences chez un agent. La vidéo 5 a été conçue de sorte que les agents n'exhibent ni comportement de protection, ni comportement d'acquisition (les rangs dans la file d'attente sont acquis passivement). Cela sert à mesurer l'impact des comportements d'acquisition et de protection sur la reconnaissance d'émotions par les participants dans les comportements des agents.

Comportements possibles Tout agent $i \in \mathcal{A}$ pouvait réaliser les comportements suivants :

- $double_{i,j \in \mathcal{A}^2}$: il s'agit d'un comportement d'acquisition pour une ressource $r \in \mathcal{R}$ avec $type(r) = Rang$. Ce comportement représente un agent i doublant un agent j . Nous définissons une proposition $espaceLibre(j) \in \mathcal{S}$, qui vaut vrai s'il y a suffisamment de place devant l'agent j pour le doubler, ou faux sinon. **Préconditions** : pour tout $rang_x$ de la file d'attente possédée par j et désiré par i , $Poss(double_{i,j}) \equiv (espaceLibre(j) \wedge x \neq 1)$. C'est à dire que i peut doubler l'agent j s'il y a suffisamment d'espace devant j , et si j n'est pas en première position de la file. **Effets** : en plus de l'effet terminal d'acquisition de r , l'effet initial de ce comportement est de faire perdre le rang actuellement possédé par l'agent i s'il en a un. Cela représente le fait que si i se déplace, il perd sa place actuelle. De plus, lorsqu'un agent i éva-

lue ce comportement, il anticipe la perte d'une ressource de type *Reputation*, qui est comptée comme un effet terminal du comportement. Cela représente le fait que doubler est un comportement mal considéré. La ressource de type *Reputation* dont la perte est anticipée par i est sélectionnée aléatoirement parmi les ressources de ce type qu'il possède. Si l'agent n'a aucune ressource de réputation, ce qui arrive s'il les a toutes perdues, alors aucune ressource n'est comptée parmi les pertes anticipées. Lorsqu'un agent i a terminé ce comportement, c'est-à-dire qu'il l'a réalisé avec succès, les rangs des agents situés derrière i sont remis à jour : ils perdent chacun leur rang actuel de numéro n , et gagnent le rang de numéro $n + 1$ (ils perdent une place) ;

- $proteste_{i,j \in \mathcal{A}^2}$: il s'agit d'un comportement de protection de type attaque pour une ressource $r \in \mathcal{R}$ avec $type(r) = Rang$. Ce comportement représente un agent i en train de protester contre un agent j , et il permet à i de protéger le rang qu'il possède lorsque j essaye de lui prendre. **Préconditions** : pour tout $rang_x$ de la file d'attente possédée par i et menacé par j , $Poss(proteste_{i,j \in \mathcal{A}^2}) \equiv (cause(rang_x, RM_i) \in \mathcal{C} \wedge agent(c) = j)$, c'est-à-dire que la cause de la menace doit être un comportement, et l'agent réalisant ce comportement doit être j . **Effets** : lorsqu'il proteste contre j , un agent i menace une ressource de réputation r' appartenant à j . Cette ressource r' est choisie au hasard parmi les ressources de réputation possédées par j . La cause de cette menace est automatiquement mise à jour comme cela a été expliqué section 5.3.1.6. Formellement $cause(r', RM_j) = protester(i, j, r)$. Si j n'a aucune ressource de réputation, il est impossible pour i de le menacer¹. **Affichage** : lorsque ce comportement est réalisé par un agent i , un texte s'affiche au dessus de la tête de l'agent indiquant la force avec laquelle il proteste. Cette force dépend de la ressource qu'il menace par son comportement de protestation. Nous avons défini pour chaque agent quatre ressources de réputation différentes, donc il y a quatre degrés de force possibles. Les indications correspondant à ces degrés du moins fort au plus fort sont : « proteste un peu », « proteste », « proteste vigoureusement », « proteste violemment ». L'indication affichée était sélectionné en fonction du placement de la ressource de réputation menacée dans l'ordre de préférences de l'agent j possédant cette ressource. Plus la ressource de réputation menacée avait de la valeur pour l'agent j , plus l'indication textuelle exprimait un degré fort. C'est-à-dire que si la ressource de réputation ayant la valeur la plus haute pour j était menacée, alors l'indication textuelle exprimant le degré le plus fort était affichée.

Lorsqu'un agent i arrivait au premier rang de la file, il achetait automatiquement un ticket pendant une certaine durée. Le texte « achète un ticket » s'affichait au dessus de sa tête. Une fois ce comportement terminé, il quittait la file et sortait de l'écran de simulation. Quand un agent quitte la file, le rang de tous les agents $j \in \mathcal{A}$ encore dans la file est mis à jour de sorte que j perd son rang actuel numéro n et gagne le rang numéro $n - 1$ (il gagne une place). De l'espace peut se libérer devant un agent i quand l'agent j situé devant lui se déplace. Quand un espace supérieur à une certaine distance d se libérait devant un agent i dans la file, celui-ci avançait de façon automatique en se plaçant : (i) à une distance fixe du guichet si aucun agent ne se trouvait devant lui (i) sinon à une certaine distance de l'agent devant lui, soit en se collant à cet agent (distance de 0), soit en se plaçant à la distance d derrière cet agent. La distance d laissait un espace suffisant entre deux agents pour qu'un autre agent puisse s'y insérer. Cette action automatique d'avancer dans la file

1. cela est lié au fait que nous avons défini que $\forall i, j \in \mathcal{A}, P_j(RA_i) = RA_i$. Un agent j peut donc percevoir quand un agent i n'a plus de réputation, et qu'il ne peut donc menacer aucune ressource de réputation de i .



FIGURE 6.7 – Capture d'écran de simulation du scénario de la file d'attente.

était réalisée par l'agent s'il n'avait sélectionné aucun comportement. Il aurait été possible de considérer cette action comme un comportement de protection, visant à conserver son rang dans la file. Nous l'avons considérée comme une action automatique parce que nous cherchions davantage à évaluer les comportements « doubler » et « protester ».

La durée et la description de chaque vidéo sont données dans le tableau 6.1.

6.4 Résultats

70 participants ont répondu à notre étude par Internet.

Les vidéos 1, 3, 4, 5 et 7 correspondaient à des préférences normatives, et les vidéos 2 et 6 à des préférences que nous avons estimées comme anormales. Nous avons fait l'hypothèse que les comportements observés pour les vidéos 2 et 6 ne seraient pas reconnus comme crédibles, et que de ce fait ils ne seraient pas non plus reconnus comme émotionnels. Nous avons également supposé que les comportements observés dans la vidéo 4 seraient reconnus comme crédibles, mais pas reconnus comme émotionnels. En effet, aucun comportement tel que doubler ou protester n'est observable dans cette vidéo, seule l'action automatique « avancer » est réalisée par les agents. Pour les autres vidéos 1, 3, 5 et 7, nous avons fait l'hypothèse que les comportements seraient jugés crédibles et émotionnels, car ces vidéos étaient associées à des préférences bien configurées, et permettant la réalisation de comportement d'acquisition et de protection. Les hypothèses opérationnelles correspondant à nos hypothèses générales sont les suivantes :

- **H1a** : les participants vont décrire et expliquer les comportements des agents avec des termes désignant des émotions (e. g. peur, colère) pour les vidéos 1, 3, 4 et 7 ;
- **H1b** : les participants ne vont pas décrire et expliquer les comportements des agents avec des termes désignant des émotions (e. g. peur, colère) pour les vidéos 2, 5 et 6 ;
- **H1c** : les participants vont juger que les comportements des agents dans les vidéos 1, 3, 4 et 7 sont associés aux émotions des agents ;
- **H1d** : les participants vont juger que les comportements des agents dans les vidéos 2, 5 et 6 ne sont pas associés aux émotions des agents ;
- **H2a** : les participants vont juger que les comportements des agents dans les vidéos 1, 3, 4, 5, 7 sont réalistes ;
- **H2b** : les participants vont juger que les comportements des agents dans les vidéos 2 et 6 ne sont pas réalistes.

Concernant **H1a** et **H1b**, les données nous permettant de vérifier ces hypothèses sont les résultats aux questions DESC, EXPL, et EMO_LIST. Le tableau 6.8 et l'histogramme 6.9 indiquent pour chaque vidéo le pourcentage de participants qui ont utilisé des termes

Scénario 1
<p>Vidéo 1 (18 sec.) Configuration : $vie_1 \succ_i^R bebe_1 \succ_i^R oiseau_1 \succ_i^R securite_1 \succ_i^R hamburger_1$; menace de la vie de l'agent programmée à une date supérieure à 25 secondes. Description : au début de la vidéo, l'adulte mange un hamburger. Quand le feu apparaît, l'adulte arrête de manger, va vers le bébé, le prend, l'emmène à l'extérieur de la pièce, le dépose, puis il revient près de l'oiseau, le prend et l'emmène à l'extérieur de la pièce.</p>
<p>Vidéo 2 (25 sec.) Configuration : $vie_1 \succ_i^R hamburger_1 \succ_i^R oiseau_1 \succ_i^R bebe_1 \succ_i^R securite_1$; menace de la vie de l'agent programmée à une date supérieure à 25 secondes. Description : au début de la vidéo, l'adulte mange un hamburger. Quand le feu apparaît, l'adulte arrête de manger et emmène le hamburger à l'extérieur de la pièce. Ensuite il revient près de l'oiseau, le prend et l'emmène à l'extérieur de la pièce, le dépose, puis il se dirige vers le bébé, mais avant que l'agent ne l'atteigne le bébé est remplacé par une flamme (il est détruit). À cet instant l'agent fuit.</p>
<p>Vidéo 3 (10 sec.) Configuration : $vie_1 \succ_i^R bebe_1 \succ_i^R oiseau_1 \succ_i^R securite_1 \succ_i^R hamburger_1$; menace de la vie de l'agent programmée à la date de 4 secondes. Description : l'adulte est en train de manger le hamburger. Quand le feu apparaît, l'agent se dirige vers le bébé, quand la taille du feu augmente brutalement (cela représente le fait que la vie de l'agent est menacée). À cet instant l'agent fuit.</p>
Scénario 2
<p>Vidéo 4 (18 sec.) Configuration : $\forall j \in A$, toute ressource de type <i>Reputation</i> est strictement préférée à une ressource de type <i>Rang</i>; à la date de 6 secondes, pour un agent unique $i \in A$, toute ressource de type <i>Rang</i> est strictement préférée à une ressource de type <i>Reputation</i>; Description : un agent est en train d'acheter un ticket à un guichet tandis que d'autres agents attendent dans une file d'attente. Un agent i à la fin de la file double un autre agent j. L'agent j proteste, mais i n'interrompt pas son comportement et prend le rang de j dans la file. Ensuite i attend, et finit par prendre un ticket lorsque c'est son tour.</p>
<p>Vidéo 5 (27 sec.) Configuration : $\forall j \in A$, toute ressource de type <i>Reputation</i> est strictement préférée à une ressource de type <i>Rang</i>. Description : un agent est en train d'acheter un ticket à un guichet tandis que d'autres agents attendent dans une file d'attente. Quand l'agent a terminé d'acheter son ticket, il quitte la file, et les agents avancent en gardant chacun une distance constante les uns entre les autres.</p>
<p>Vidéo 6 (26 sec.) Configuration : $\forall j \in A$, une majorité de ressources de type <i>Rang</i> est strictement préférée à toute ressource de type <i>Reputation</i>. Description : un agent est en train d'acheter un ticket à un guichet, et de nombreux agents essaient de doubler d'autres agents quand il y a suffisamment d'espace pour le faire. Les agents protestent contre ceux qui doublent, parfois ces derniers s'interrompent et parfois non.</p>
<p>Vidéo 7 (37 sec.) Configuration $\forall j \in A$, une majorité de ressources de type <i>Reputation</i> est strictement préférée à toute ressource de type <i>Rang</i>. Description : un agent est en train d'acheter un ticket à un guichet tandis que d'autres agents attendent dans une file d'attente. Un agent i essaie de doubler un agent j, mais j proteste et i double un autre agent k qui est juste derrière j. k proteste mais i prend tout de même le rang de k. Plus tard, k double un agent, achète un ticket et quitte la file.</p>

TABLE 6.1 – Description des vidéos.

Vidéo	Nombre de participants	DESC/EXPL avec émotion(s)
1	29	10 %
2	22	18 %
3	29	28 %
4	19	42 %
5	17	0 %
6	11	36 %
7	15	7 %

FIGURE 6.8 – Pourcentage de participants ayant utilisé des termes émotionnels dans la description et l'explication des comportements.

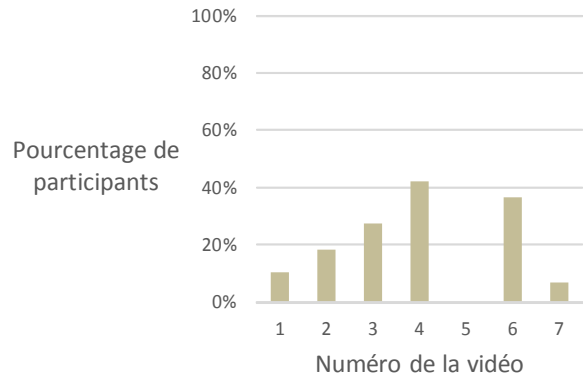


FIGURE 6.9 – Pourcentage de participants ayant utilisé des termes émotionnels dans la description et l'explication des comportements.

émotionnels en répondant aux questions DESC et EXPL. Seuls les termes correspondant à des catégories d'émotion ont été pris en compte. Les expressions comme « les agents en ont marre d'attendre », ou les citations comme « courage » ou « instinct de survie » ont été ignorées dans ces résultats. On observe que les vidéos 3, 4 et 6 obtiennent les plus hauts scores avec respectivement 28%, 42% et 36 % de participants ayant cité des émotions en décrivant ou expliquant les comportements des agents (par rapport au nombre de participants par vidéo). La vidéo 5 obtient le score le plus faible avec 0%, et les autres vidéos obtiennent des scores entre 7 % et 18%. Ces données sont confirmées par les résultats à la question EMO_LIST présentés sur les figures 6.10 et 6.11, qui indiquent en pourcentage le nombre de participants ayant cité une catégorie d'émotion particulière pour chaque vidéo (par rapport au nombre participants ayant évalué la vidéo). La catégorie "aucune" représente le cas où un participant n'a cité aucune catégorie. On observe que seulement 23% ,17% et 13% des participants n'ont cité aucune émotion pour les vidéos 3, 4 et 6, qui sont les scores les plus bas pour la catégorie "aucune", et que 76% de participants n'ont reconnu aucune émotion pour la vidéo 5, ce qui représente le score le plus haut pour cette catégorie. En conséquence les hypothèses **H1a** et **H1b** ne sont que partiellement soutenues par ces résultats, car la vidéo 6 a obtenu de bons scores sur les émotions reconnues, tandis que les vidéos 1 et 7 ont obtenu des scores assez faibles sur les questions DESC et EXPL, ce qui n'était pas attendu.

Concernant **H1c** et **H1d**, les données nous permettant de vérifier ces hypothèses sont les résultats à la question EMO. Les résultats sont illustrés sur la figure 6.12 et le tableau 6.2. En réponse à cette question, les participants ont évalué que les comportements des agents dans les vidéos 1, 3, 4, 6, 7 étaient liés aux émotions (la moyenne par vidéo s'étend de 3,03 à 4,18 sur une échelle de Likert à 5 niveaux de 1 à 5). Les scores les plus hauts ont été atteints par les vidéos 4 et 6 avec une moyenne respective de 3,74 et 4,18. Les comportements observés sur les vidéos 2 et 5 n'ont pas été jugés comme liés aux émotions (moyennes respectives de 2,45 et 1,94). Ces données soutiennent les hypothèses **H1c** et **H1d**, à l'exception des comportements observés sur la vidéo 6 qui ont été jugés comme liés aux émotions, contrairement à ce qui était attendu. Nous discutons ces résultats dans la section 6.5.

Concernant les hypothèses **H2a** et **H2b**, les données nous permettant de vérifier ces hypothèses sont les résultats à la question REAL. Les résultats sont présentés sur la figure 6.12 et le tableau 6.2. Les participants ont évalué que les comportements observés sur les

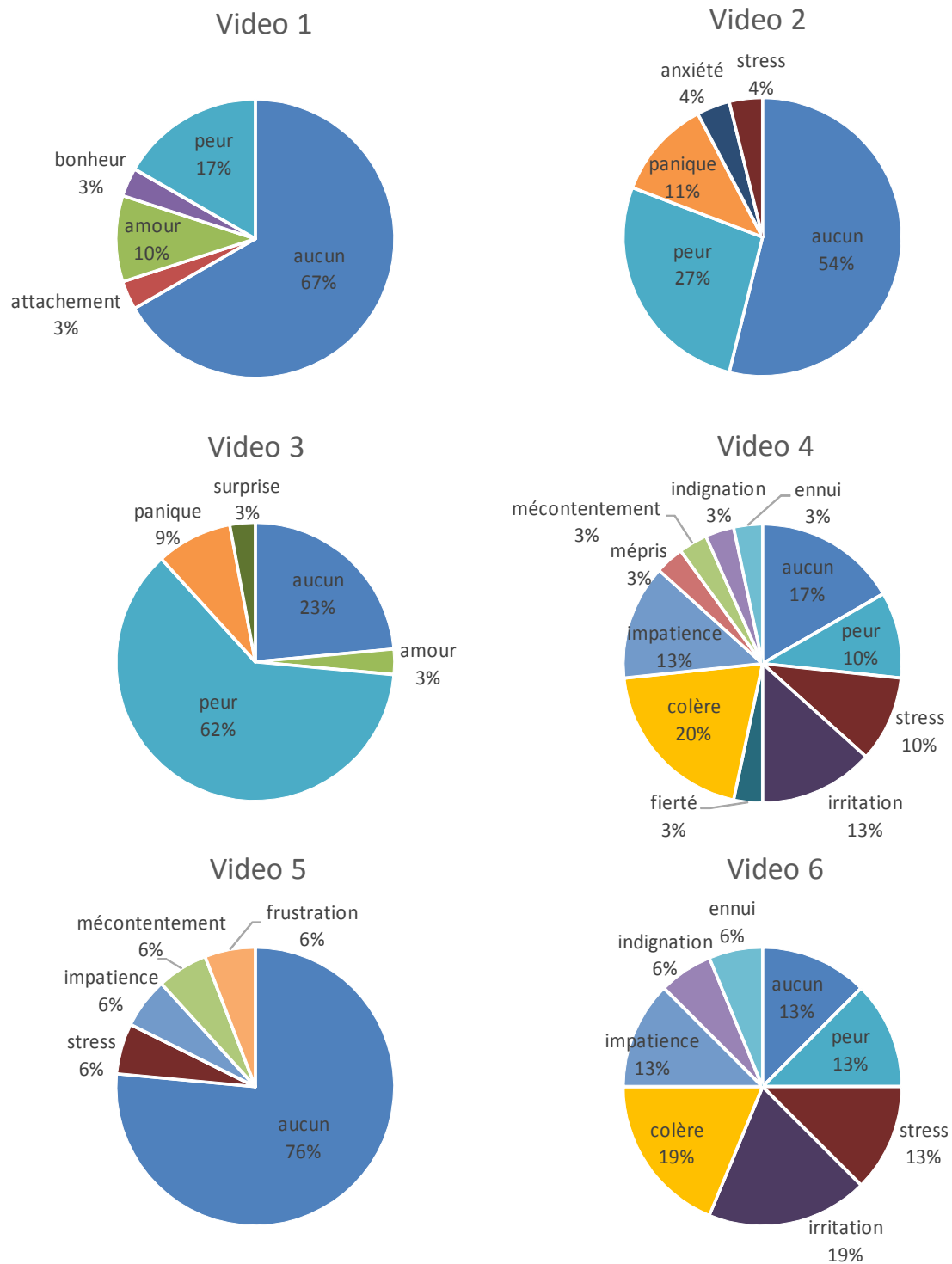


FIGURE 6.10 – Répartition des émotions citées pour les vidéos 1 à 6 par rapport au nombre de participants.

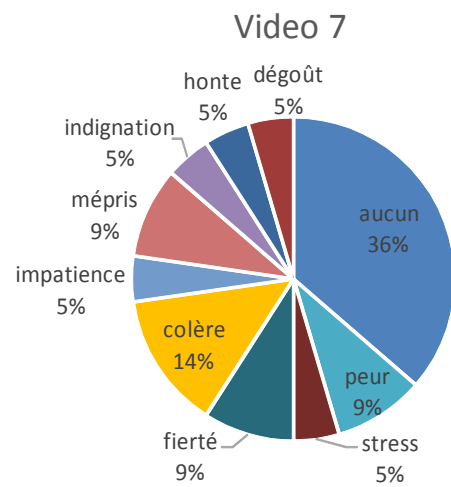


FIGURE 6.11 – Répartition des émotions citées pour la vidéo 7 par rapport au nombre de participants.

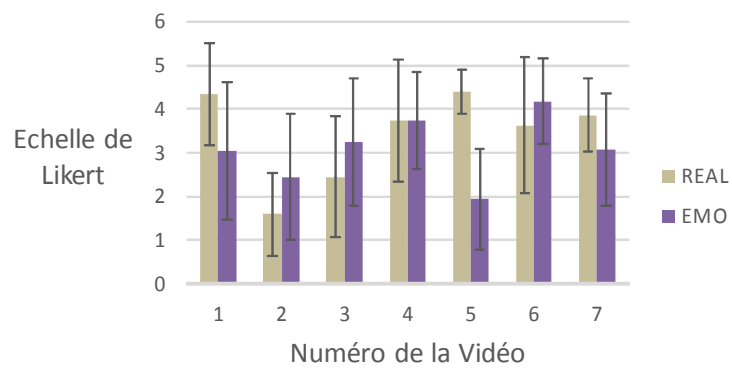


FIGURE 6.12 – Moyenne et écart-type des réponses aux questions EMO et REAL par vidéo (échelle de Likert de 1 à 5).

Vidéo	Nombre de participants	REAL (moyenne/écart-type)	EMO (moyenne/écart-type)
1	29	4,34 / 1,17	3,03 / 1,57
2	22	1,59 / 0,95	2,45 / 1,44
3	29	2,44 / 1,30	3,24 / 1,45
4	19	3,74 / 1,41	3,74 / 1,10
5	17	4,41 / 0,51	1,94 / 1,14
6	11	3,64 / 1,57	4,18 / 0,98
7	15	3,87 / 0,83	3,06 / 1,28

TABLE 6.2 – Moyenne et écart-type des scores obtenus aux questions REAL et EMO pour chaque vidéo.

vidéos 1, 4, 5, 6 et 7 étaient réalistes avec des moyennes par vidéo allant de 3,64 à 4,41 sur une échelle de Likert à 5 niveaux de 1 à 5, et que ceux des vidéos 2 et 3 n'étaient pas réalistes avec une moyenne de 1,59 et 2,44. Contrairement à ce qui était attendu, les comportements de la vidéo 6 ont été jugés comme réalistes avec une moyenne de 3,64 (score minimum parmi les vidéos jugées réalistes), et ceux de la vidéo 3 ont été jugés non réalistes avec une moyenne de 2,44 (score maximum parmi les vidéos jugées non réalistes). Ces données soutiennent **H2a** et **H2b**, à l'exception de celles concernant les vidéos 3 et 6.

6.5 Discussion

Les résultats que nous avons obtenus soutiennent une majorité des hypothèses que nous avons formulées. En particulier, les participants ont cité de nombreuses émotions en réponse à la question EMO_LIST, même s'ils ont été moins nombreux à employer des termes émotionnels pour la description et l'explication des comportements des agents dans les questions DESC et EXPL. Les résultats aux questions DESC, EXPL et EMO_LIST se recoupent, ce qui semble indiquer que l'incitation à citer des catégories d'émotion (EMO_LIST) a conforté les réponses des participants aux questions DESC et EXPL, et qu'ils n'ont pas répondu au hasard. Les participants ont aussi évalué les vidéos de façon relativement conforme à nos hypothèses en ce qui concerne la crédibilité et le caractère émotionnel des comportements, à l'exception des vidéos 1, 3, 6 et 7 sur certaines hypothèses. Il apparaît en particulier que des comportements jugés comme non crédibles peuvent être jugés comme émotionnels, ce qui est contraire à ce que nous avons supposé mais qu'il est possible d'expliquer (voir ci-après).

Concernant **H1a**, qui prévoyait que les participants allaient citer des catégories d'émotions dans la description et l'explication des comportements, les résultats pour les vidéos 1 et 7 sont inattendus, puisque seulement 10% et 7% respectivement des participants ont utilisés des termes émotionnels en répondant aux questions DESC et EXPL. Pour la vidéo 1, les participants ont qualifié les comportements des agents par les termes « *logique* », « *normal* », et ont rapporté que l'adulte « *n'a pas paniqué* », est resté « *calme* », et a respecté ses « *priorités* ». Ce jugement contraste avec les descriptions et les explications données pour la vidéo 3, où l'agent a été qualifié de « *lâche* », et son comportement de « *stupide* », « *égoïste* » et « *pas héroïque* ». Cette différence semble révéler que les émotions sont plus facilement associées à une situation où l'agent semble perdre le contrôle ou exhibe des comportements qui ne sont pas bien acceptés socialement. En ce qui concerne

le score faible obtenu pour la vidéo 7, les participants ont répondu que certains agents étaient « *pressés* », mais cela n'a pas été considéré comme un label d'émotion et donc pas pris en compte dans les résultats. Le nombre de participants pour cette vidéo (15) pourrait aussi être insuffisant. Ces deux facteurs peuvent avoir diminué le score obtenu pour les questions DESC et EXPL. Ces résultats doivent être nuancés par le fait que les vidéos 1 et 7 ont obtenu des scores légèrement supérieurs à une moyenne de 3 à la question EMO (respectivement 3,03 et 3,06), ce qui indique que les comportements observés dans ces vidéos ont été jugés comme moyennement liés aux émotions. Ces résultats moyens nécessitent de conduire une évaluation plus approfondie.

Concernant l'hypothèse **H1b**, le score de 0% pour la vidéo 5 était attendu, puisqu'aucun comportement de protection ou d'acquisition actif n'a été engagé par un agent, c'est-à-dire que les agents avançaient au fur et à mesure dans la file. En revanche, la vidéo 6 a obtenu des scores indiquant une reconnaissance d'émotions élevée, avec 36% d'émotions reconnues pour les questions DESC/EXPL et une moyenne de 4,18 en réponse à la question EMO, qui est le score maximum. Nous avons estimé que les préférences utilisées pour la production de la vidéo 6 étaient non normatives, et qu'elles ne pourraient pas donner lieu à l'interprétation d'émotions, mais nous nous sommes visiblement trompés. Cela rejoint la constatation que nous avons effectuée pour l'hypothèse **H1a**, selon laquelle les participants auraient davantage tendance à interpréter des émotions lorsqu'ils sont confrontés à des comportements qu'ils jugent comme contraires à la norme. Il est aussi possible que la configuration des préférences ayant été utilisée pour la vidéo 6 soit en fait plausible, car les participants n'ont pas qualifié les comportements observés comme étant étranges. Les réponses à la question DESC contiennent des commentaires comme « Ils dépassent les autres personnes pour obtenir plus rapidement leur ticket » ou « Ces personnes font la queue, plus ou moins raisonnablement, afin d'acheter un ticket de train à une borne automatique ». Seulement 2 participants ont rapporté qu'un trop grand nombre d'agents se doublaient. Cela ne laisse pas supposer que les comportements des agents ont été jugés comme anormaux, bien qu'étant jugés comme irrespectueux. Les participants peuvent aussi avoir imaginé un contexte dans lequel il était normal que beaucoup d'agents se doublent, en pensant par exemple qu'ils attendaient au guichet depuis des heures.

Concernant les hypothèses **H1c** et **H1d**, les résultats soutiennent majoritairement les prévisions que nous avons faites, à l'exception des comportements de la vidéo 6 qui ont été jugés comme associés aux émotions des agents. L'explication de ce résultat concernant la vidéo 6 est la même que celle que nous venons de donner à propos de l'hypothèse **H1b**.

Concernant l'hypothèse **H2a**, les comportements observés dans la vidéo 2 n'ont pas été jugés comme réalistes par les participants, ce qui n'était pas attendu. Dans cette vidéo, la vie de l'agent était menacée très tôt après le début de la simulation, ce qui provoquait sa fuite avant qu'il n'aille chercher le bébé. Les préférences de l'agent ont semblé incorrectes à certains participants. Ils ont estimé que l'adulte aurait dû aller sauver le bébé malgré le risque encouru. Par ailleurs, ils semblent avoir porté un jugement moral sur le comportement de l'adulte. Parmi les réponses des participants ayant attribué un score de 1 en réalisme, on trouve des commentaires comme : « l'agent adopte ce comportement parce qu'il est virtuel. Sa récompense pour sauver le bébé est trop faible par rapport au risque de se faire brûler. », « Si j'avais à qualifier le comportement, j'hésite entre stupide, glouton et égoïste. », « Il n'a pas réfléchi que le plus important était le bébé », « l'agent est simplement en dehors d'un esprit sain pour laisser au risque le bébé et l'oiseau dans le feu ». Ces commentaires pourraient s'expliquer par le fait que les participants n'ont pas compris que la vie de l'adulte était menacée parce qu'ils n'ont pas réussi à identifier visuellement cette menace avec la façon dont nous l'avons représentée. Plusieurs commentaires laissent

toutefois supposer que la menace était compréhensible au moins par certains participants, comme par exemple « je pense qu'il veut sauver le bébé car c'est ce qu'il y a de plus précieux dans cette pièce mais comme le feu augmente il pense qu'il ne pourra pas sauver le bébé donc il sort pour sauver sa peau » ou encore « On peut supposer qu'il a pris peur devant l'ampleur du feu et a préféré fuir pour sauver sa vie quitte à sacrifier celle du bébé et de l'oiseau ». Le faible score obtenu la vidéo 6 à la question REAL peut aussi être lié au fait que les participants ont supposé un lien d'attachement fort entre l'adulte et le bébé, en imaginant par exemple que l'adulte était un parent de l'enfant et qu'il se serait sacrifié au péril de sa propre vie. Deux participants ont parlé de ces liens parentaux en écrivant : « Une seule possibilité : Ce n'est pas son enfant :-) » « Il ne sauve pas le bébé ni l'oiseau. C'est une personne égoïste et il est évident que ce n'est pas son bébé. ». Ces participants qui ont pensé que le bébé n'était pas celui de l'adulte ont attribué respectivement un score de 5 et 3 à la question REAL. Nous n'avons pas précisé le lien de parenté entre l'adulte et le bébé dans la présentation du contexte de ce scénario, mais ces résultats indiquent qu'il aurait été utile de le faire.

Concernant l'hypothèse **H2b** les comportements observés dans la vidéo 2 ont été jugés comme réalistes par les participants, ce qui n'était pas attendu. Comme nous l'avons fait remarquer pour l'hypothèse **H1b**, il est possible que la configuration des préférences que nous avons utilisées pour produire la vidéo 6 ne soient pas jugées comme anormales, et que les participants aient imaginé un contexte dans lequel ces comportements auraient été acceptables.

De façon générale, il semble que plus les participants ont eu des difficultés à expliquer le comportement des agents, plus ils ont effectué une interprétation émotionnelle. Dans les vidéos 2, 3 et 6, qui ont obtenu les scores les plus faibles à la question REAL, la moyenne du score obtenu à la question EMO est supérieure à la moyenne du score obtenu à la question REAL. Dans les autres vidéos qui obtiennent un score supérieur à la question REAL, la moyenne du score à la question REAL est supérieure ou égal à la moyenne du score à la question EMO. Cette constatation est particulièrement visible sur la figure 6.12.

Enfin, le fait que les observateurs humains ont reconnu de nombreuses émotions peut avoir été facilité par l'utilisation de termes de vocabulaire comme l'indication textuelle « protester ». En effet, ce terme peut être psychologiquement associé à l'émotion de colère chez les participants, facilitant ainsi la reconnaissance de cette émotion. Selon la classification d'Austin (Austin, 1975), « protester » fait partie des actes de langage comportementaux, qui représentent des réactions vis-à-vis du comportement des autres. L'emploi qui en a été fait dans le modèle COR-E semble donc approprié. Nous discuterons plus en détail cet aspect dans le chapitre suivant sur l'évaluation approfondie du modèle.

6.6 Conclusion

L'évaluation préliminaire du modèle COR-E a permis de mettre en évidence la capacité du modèle à produire des comportements crédibles et émotionnels. Elle a aussi mis en lumière une conclusion importante : ce n'est parce qu'un participant juge qu'un comportement est émotionnel qu'il jugera forcément que ce comportement est réaliste. S'il ne trouve pas d'explications convaincantes en observant le comportement d'un agent, il peut mettre ce comportement sur le compte des émotions. Or notre objectif n'est pas de générer des comportements non crédibles pour qu'ils soient reconnus comme émotionnels par défaut, mais bien de produire des comportements à la fois émotionnels et crédibles. Pour cette raison, dans l'évaluation que nous présentons au chapitre suivant, nous avons particulièrement veillé à évaluer cet aspect.

Cette évaluation préliminaire ne permet pas de tirer des conclusions sur l'impact de chacune des caractéristiques du modèle COR-E sur les résultats obtenus. Pour cela il faut tester chaque caractéristique du modèle au moyen d'une série de vidéos en vérifiant quels sont les résultats obtenus lorsque la caractéristique est activée ou désactivée. Sans cela, nous ne pouvons pas nous assurer que c'est bien le modèle que nous avons déterminé qui est responsable des résultats obtenus. De plus, nous n'avons pas vérifié que les émotions citées par les participants sont cohérentes entre elles, c'est-à-dire que les participants reconnaissent communément certaines catégories et qu'ils ne les ont pas choisies au hasard. Les résultats que nous avons obtenus sur les camemberts présentés dans les figures 6.10 et 6.11 suggèrent que ces catégories sont cohérentes, mais cela doit être vérifié. L'évaluation approfondie que nous proposons au chapitre suivant permet de répondre à ces questions.

Chapitre 7

Évaluation approfondie de COR-E

7.1 Objectifs

Nous présentons dans ce chapitre une évaluation approfondie du modèle COR-E qui a deux objectifs principaux : tester les hypothèses formulées lors de l'évaluation préliminaire sur un plus grand nombre de participants, et évaluer l'impact de chaque caractéristique du modèle sur l'aspect crédible et émotionnel des comportements produits. En particulier nous cherchons à déterminer : l'impact des préférences, des comportements d'acquisition et de protection, et de l'utilisation de ressources de type variés. Ces trois éléments forment la base de l'architecture du modèle COR-E. De plus, nous avons testé une nouvelle composante du modèle, le *niveau de menace dynamique*, qui représente un état propre à un agent servant à déterminer la force avec laquelle ce dernier riposte à une attaque. Cette variable évolue au cours du temps en fonction des événements. Plus un agent perd de ressources en raison du comportement d'autres agents, plus sa variable de menace augmente, et plus il riposte de façon agressive. L'introduction de cette variable permet de représenter un état affectif à long terme, et de mesurer son impact sur la crédibilité des comportements produits.

Le principe du protocole utilisé pour cette évaluation est le même que celui qui a été utilisé pour l'évaluation préliminaire. Nous avons montré des vidéos de simulation produites par COR-E à des observateurs humains, et nous leur avons posé des questions à propos des comportements des agents observés dans ces vidéos. L'évaluation présentée dans ce chapitre a nécessité un plus grand nombre de vidéos que l'évaluation préliminaire (onze au total), et nous souhaitons que chaque participant évalue toutes les vidéos, de sorte à avoir un assez grand nombre d'évaluations par vidéo. Pour cette raison, nous avons porté notre choix sur un seul scénario. Nous avons utilisé celui de la file d'attente, car il permet de représenter l'acquisition et la protection de façon claire au moyen des comportements « doubler » et « protester », et il a été bien compris par les participants lors de l'évaluation préliminaire. Sa représentation graphique est en effet plus simple que celle du scénario de l'incendie, et le contexte ne comporte pas d'ambiguïté comme celle concernant les liens parentaux existant entre les agents qui a été rapportée par les participants pour le scénario de l'incendie.

L'évaluation que nous présentons dans ce chapitre est organisée de la façon suivante : nous présentons d'abord la modélisation du niveau de menace dynamique (section 7.2). Ensuite, nous formulons les hypothèses générales que nous souhaitons vérifier à propos du modèle COR-E (section 7.3), nous expliquons le protocole utilisé pour vérifier ces hypothèses (section 7.4), puis nous détaillons les résultats obtenus (section 7.5). Nous terminons par la discussion de ces résultats (section 7.6).

7.2 Niveau de menace

Une propriété du modèle COR-E est de permettre la simulation de comportements émotionnels sans utiliser de variables représentant des catégories d'émotion. Dans d'autres modèles, ces catégories sont utilisées pour représenter des états affectifs à long terme évoluant au cours du temps, dont l'intensité augmente et diminue. Dans cette évaluation, nous souhaitons montrer qu'il est possible d'introduire un état affectif dans le modèle COR-E, et nous voulons mesurer l'impact de cet état sur les résultats obtenus. Nous faisons correspondre un état affectif à une tendance comportementale guidée par l'état des ressources d'un agent. L'état affectif que nous présentons, *le niveau de menace dynamique*, a été défini dans le cadre du modèle COR-E : sa valeur est déterminée par le nombre de ressources que perd un agent en raison du comportement d'autres agents, et cette valeur est responsable de la force avec laquelle un agent répond à une menace. Nous avons donc dérivé cet état de l'architecture même de notre modèle. Cette démarche permet d'éviter les difficultés rencontrées lorsqu'on détermine des catégories d'émotion de façon externe au modèle, et qu'on souhaite ensuite les y adapter. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, il est difficile de choisir un ensemble de catégories d'émotion, puis de déterminer a posteriori comment leur intensité évolue et quelle est leur influence sur le comportement.

La modélisation d'un état affectif dans COR-E est cohérente avec la théorie COR de Hobfoll (1998), postulant que l'état *bien-être* d'un individu dépend des ressources qu'il possède, qu'il a perdu, et qu'il peut potentiellement gagner ou perdre. Selon cette théorie, les personnes qui manquent de ressources sont susceptibles d'adopter des positions défensives pour les conserver. L'introduction d'un état affectif représente donc une première étape vers le raffinement psychologique du modèle COR-E.

7.2.1 Impact du niveau de menace

Le niveau de menace dynamique représente la force avec laquelle un agent se protège d'une agression. Plus précisément, il détermine la ressource que l'agent va menacer en réalisant un comportement de protection de type attaque. Par exemple, un agent dont le niveau de menace est fort peu devenir violent, en menaçant directement la santé physique de l'agent qui essaye de lui prendre une ressource.

Pour chaque agent $i \in \mathcal{A}$, nous définissons un niveau de menace dynamique $NM_i \in [1, \dots, n]$. Le nombre n de niveaux de menace doit au moins être égal au nombre de ressources qu'il est possible de menacer, car NM_i va déterminer la ressource menacée. Par défaut, ce nombre peut-être fixé au nombre de ressources incluses dans \mathcal{R} , soit le nombre total des ressources de la simulation. Lorsqu'un agent i a la possibilité de réaliser un comportement de protection de type attaque à l'encontre d'un agent j , i menace une ressource appartenant à l'ensemble des ressources acquises de j pouvant être perçues par i , $P_i(RA_j)$. L'ensemble des ressources $\mathcal{R}' \subset P_i(RA_j)$ pouvant être menacées est déterminé d'après la définition du comportement de protection. Dans notre scénario, il s'agira des ressources de type « Réputation » et « Santé ». Pour utiliser le niveau de menace dynamique, l'agent i doit avoir des préférences pour chaque ressource $r \in \mathcal{R}'$. Sinon, il menace une ressource $r \in \mathcal{R}'$ choisie aléatoirement. Si chaque ressource $r \in \mathcal{R}'$ est incluse dans les préférences de i , alors l'ensemble des ressources de \mathcal{R}' sont classées en fonction de leur valeur du point de vue de i dans une liste indexée, de telle sorte que la ressource de plus faible valeur se trouve en début de liste, à l'indice 0. La ressource de j qui va être menacée par le comportement de protection de i est celle dont l'indice correspond au niveau de menace $NM_i - 1$. C'est-à-dire que plus le niveau de menace dynamique de i est fort, plus i menace une ressource importante dans son comportement de protection. Si NM_i est supérieur à la

taille de la liste, alors c'est la ressource d'indice $n - 1$ qui est sélectionnée (celle de valeur la plus forte).

7.2.2 Définition du niveau de menace

Le niveau de menace NM_i d'un agent i peut augmenter lorsqu'il perd une ressource en raison du comportement d'un autre agent. L'évolution de cette augmentation est un élément que nous souhaitons tester dans cette évaluation. Nous avons déterminé deux méthodes possibles :

1. le niveau de menace de i augmente à chaque perte de ressource causée par un agent $j \neq i \in \mathcal{A}$;
2. le niveau de menace a une chance sur deux d'augmenter à chaque perte de ressource causée par un agent $j \neq i \in \mathcal{A}$.

Si le niveau de menace subit une augmentation, sa valeur est mise à jour de telle sorte que $NM_i \leftarrow NM_i + 1$. Si $NM_i > n$, n étant la borne supérieure du niveau de menace, alors $NM_i \leftarrow n$. Dans cette évaluation, nous testons les deux types d'augmentation que nous avons défini ci-avant ainsi que l'absence totale d'augmentation.

Si l'évaluation montre un résultat positif concernant l'impact du niveau de menace, ce dernier devra être redéfini afin qu'il dépende d'un ensemble de ressources perdues par un agent. En effet, une ressource r perdue par un agent à la suite d'un vol peut être regagnée par la suite, ne justifiant plus l'augmentation du niveau de menace lié à cette ressource. Il faudrait donc ajouter un ensemble de ressources perdues, et déterminer le niveau de menace en fonction du nombre de ressources appartenant encore à cet ensemble dont la perte a été causée par d'autres agents. Cela permettrait de faire en sorte que le niveau de menace puisse baisser. Nous évoquons cet aspect dans les perspectives de cette thèse, en proposant la modélisation de l'état de *stress* d'un individu décrit dans la théorie COR.

7.3 Hypothèses générales

Dans cette évaluation nous cherchons à vérifier à nouveau les hypothèses formulées dans l'évaluation préliminaire, à valider les différentes caractéristiques du modèle COR-E, et à tester la modélisation d'une variable représentant un niveau de menace. Pour cela nous avons formulé les hypothèses générales suivantes :

- **H1** : COR-E permet de simuler des comportements jugés crédibles et émotionnels par des observateurs humains ;
- **H2** : les comportements d'acquisition et de protection sont nécessaires pour obtenir des comportements jugés émotionnels par des observateurs humains, et la désactivation des comportements de protection fait en sorte que les observateurs jugent les comportements moins crédibles ;
- **H3** : les préférences sur les ressources sont nécessaires pour obtenir des comportements jugés crédibles par des observateurs humains ;
- **H4** : la simulation de ressources représentant de la réputation permet d'obtenir de comportements jugés plus crédibles ;
- **H5** : le niveau de menace dynamique permet d'obtenir des comportements jugés plus crédibles ;

L'hypothèse **H1** permet de vérifier à nouveau si le modèle COR-E est capable de simuler ce pour quoi il a été conçu, c'est-à-dire des comportements émotionnels crédibles. Cette hypothèse a déjà été évaluée lors de l'évaluation préliminaire, nous cherchons à la vérifier à nouveau avec un plus grand nombre de participants. Les hypothèses **H2**, **H3**,

H4 permettent de vérifier l'impact de chaque caractéristique de COR-E sur les résultats obtenus. En particulier **H2** vise à déterminer si les comportements d'acquisition et de protection provoquent la reconnaissance d'émotions chez un observateur humain. Dans la théorie COR Hobfoll (1989), ces comportements sont à la base de la dynamique affective d'un individu qui lui permet de réguler son état de stress. De plus, nous supposons que si on ne donne pas à un agent la possibilité de se protéger face à une menace, alors les comportements de cet agent seront jugés moins crédibles. L'hypothèse **H3** a été évaluée lors de l'évaluation préliminaire, mais nous l'avons modifiée. En effet, l'évaluation préliminaire a permis de mettre en évidence le fait que la simulation de préférences incohérentes chez les agents n'empêchait pas les observateurs humains de reconnaître des émotions. Dans l'évaluation présente nous considérons donc uniquement l'impact des préférences sur la crédibilité. L'hypothèse **H4** permet de vérifier l'utilité de l'introduction de ressources psychologiques. Dans le scénario de file d'attente que nous avons utilisé, les agents qui doublent peuvent perdre une partie de leur réputation. Nous cherchons à vérifier ce qui se passe si les agents n'ont rien à perdre lorsqu'ils doublent, c'est-à-dire lorsqu'ils n'ont pas d'image à défendre auprès des autres. Nous avons fait l'hypothèse que cela devrait se traduire par des comportements considérés comme asociaux, hors normes, qui ne seraient pas jugés crédibles. En revanche nous pensons que ces comportements, même hors normes, peuvent être considérés comme émotionnels au vu des résultats de l'évaluation préliminaire. Enfin, l'hypothèse **H5** permet de tester la modélisation d'un état affectif à long terme, le niveau de menace, sur la crédibilité perçue des comportements des agents. L'objectif est de déterminer si la modélisation d'états affectifs évoluant dans le temps permet d'obtenir des comportements jugés plus crédibles par des observateurs humains.

7.4 Protocole

Comme pour l'évaluation préliminaire, notre protocole a consisté à soumettre des vidéos de simulations produites par COR-E à des observateurs humains, puis à poser des questions aux observateurs sur les aspects que nous souhaitons évaluer. Les vidéos ont été produites avec des configurations différentes. Certaines correspondaient au modèle COR-E configuré d'une façon que nous estimons correcte, et d'autres correspondaient au modèle COR-E configuré d'une façon que nous estimons incorrecte, ou amputé d'une caractéristique de son architecture. L'évaluation préliminaire a permis de mettre en avant le fait que les observateurs pouvaient reconnaître émotions à partir du comportement des agents. Pour cela, nous avons conçu le questionnaire de façon à minimiser les incitations à reconnaître des catégories d'émotions, en utilisant notamment des questions ouvertes. Dans cette évaluation, nous avons utilisé exclusivement des questions fermées, et nous avons introduit des listes d'émotions parmi lesquelles un participant pouvait choisir sa réponse. Nous avons fait cela pour deux raisons : d'abord les questions fermées facilitent l'analyse des résultats, et ensuite nous souhaitons vérifier si les catégories d'émotions reconnues par les participants sont cohérentes, c'est-à-dire s'ils tombent d'accord sur les mêmes catégories. Cet objectif requiert l'utilisation d'une liste d'émotions, afin de réduire le vocabulaire émotionnel que les participants pourraient utiliser. Le questionnaire est décrit ci-après dans la section 7.4.1.

Afin de produire des vidéos de simulation, nous avons utilisé à nouveau le scénario de la file d'attente. Nous avons introduit une ressource supplémentaire, la santé, de sorte qu'un agent puisse menacer physiquement un autre agent. Les agents peuvent donc doubler (acquisition d'un rang), et protéger leur place en protestant (menace de la réputation) ou en effectuant une menace physique (menace de la santé). Nous avons produit 11 vidéos de

simulation au total réparties en 4 séries de deux à trois vidéos. Chaque série avait pour objectif d'évaluer un aspect particulier de l'architecture de COR-E. Nous expliquons en détail comment ces vidéos ont été produites ci-après dans la section 7.4.2.

Nous avons mis en ligne le questionnaire accompagné des vidéos sur un site web, en faisant en sorte qu'un participant répondant au questionnaire doive évaluer toutes les vidéos produites, soit onze au total. Nous avons diffusé l'adresse du questionnaire sur une liste de diffusion (liste des échos du Relais d'Information sur les Sciences de la Cognition, RISC). Chaque participant se rendant à cette adresse pouvait répondre au questionnaire.

7.4.1 Questionnaire

Le questionnaire comprenait 6 pages. Les deux premières pages concernaient le recueil d'informations sur le participant et la présentation du contexte. Ensuite, chaque page correspondait à une série de vidéos (des captures d'écran du questionnaire sont montrés dans l'annexe B).

La **page 1** comportait des questions relatives à la situation du participant : âge, genre, niveau d'études, domaine de travail, pays. Il était aussi demandé au participant s'il était à l'aise avec l'ordinateur. Il était obligatoire de répondre à toutes ces questions pour passer à la page suivante.

La **page 2** comportait la présentation du contexte formulé de la façon suivante :

« **Instructions** : Votre tâche consiste à observer des personnages évoluant dans un environnement virtuel. Vous devrez évaluer la crédibilité et l'aspect émotionnel de leurs comportements. L'étude se déroule de la manière suivante : vous allez voir 4 pages avec 2 ou 3 vidéos de 40 sec. représentant des personnages en train de faire la queue à un guichet ; dans chaque vidéo, les personnages vont se comporter différemment ; pour chaque vidéo, vous devrez noter la crédibilité de leurs comportements ; puis déterminer si les comportements sont liés à des émotions chez les personnages ; et si c'est le cas, vous devrez choisir lesquelles parmi celles proposées. Vous ne devez pas vous baser sur la qualité graphique de l'animation. Vous pouvez revoir chaque vidéo d'une même page autant de fois que vous le souhaitez. Par contre vous ne pourrez pas revenir en arrière sur une page précédente une fois la page validée. La durée du test est d'environ 15 minutes. Afin que nous puissions obtenir les résultats, nous vous remercions de terminer l'évaluation. »

Les **pages 3, 4, 5, 6** contenaient deux à trois vidéos chacune. Chaque page correspondait à l'évaluation d'une caractéristique de COR-E (la production des vidéos de chaque page est expliquée ci-après section). En haut de page était placé un texte contenant des instructions :

« Dans les 3 vidéos sur cette page, les comportements que les personnages peuvent réaliser sont différents. Veuillez évaluer ces vidéos en fonction des comportements observés. Vous pouvez regarder les vidéos plusieurs fois. »

En dessous de chaque vidéo de la page, une série de questions étaient posées au participant. Ces questions étaient les suivantes :

- Q1. Les comportements des personnages sont-ils crédibles ? Réponses possibles : pas du tout d'accord / pas d'accord / plutôt pas d'accord / moyennement d'accord / plutôt d'accord / d'accord / tout à fait d'accord / sans opinion ;
- Q2. Ces comportements sont-ils liés à des émotions chez les personnages ? Réponses possibles : oui / non / sans opinion ;

- Q3. *Si oui, lesquelles (par ordre de préférence) ?* Réponses possibles : *colère / peur / tristesse / joie / dégoût / surprise / fierté / honte / mépris / amour / haine / ennui / frustration / autres / aucune* . Le participant pouvait sélectionner jusqu'à 3 catégories ;

L'ordre dans lequel les réponses étaient proposées (liste déroulante) respecte l'ordre indiqué ci-dessus. Chaque participant devait obligatoirement répondre à toutes les questions d'une page pour passer à la page suivante. Pour la question Q3, le participant devait sélectionner au moins une catégorie (« aucune » compte comme une catégorie). Les catégories d'émotion que nous avons incluses dans cette liste contiennent les émotions basiques proposées par P. Ekman (Ekman, 1999) (colère / peur / tristesse / joie / dégoût / surprise), des émotions sociales incluses dans la théorie OCC (Ortony *et al.*, 1988) (fierté / honte / amour / haine), et des émotions qui ont été souvent reportées par les participants lors de l'évaluation préliminaire sur la scénario de file d'attente (mépris / ennui / frustration). Concernant la question Q1, nous avons utilisé une échelle de Likert à 7 niveaux au lieu des 5 employés pour l'évaluation préliminaire. Cela permet d'obtenir des résultats plus fins.

Pour la page concernant l'évaluation du niveau de menace dynamique, les questions étaient formulées différemment. Cette page contenait des vidéos sur lesquelles on pouvait observer un personnage vert (une capture d'écran est montrée sur la figure 7.2), et il était demandé aux participants de répondre aux questions en tenant compte uniquement des comportements du personnage vert. Le texte de début de page ainsi que la question 1 étaient formulés de la façon suivante :

*« Dans les 3 vidéos sur cette page, le **personnage vert** va réagir différemment lorsqu'il se fait doubler. Veuillez évaluer ces vidéos en fonction des comportements observés du personnage vert uniquement. Vous pouvez regarder les vidéos plusieurs fois. »*

- Q1. *Les comportements du personnage vert sont-ils crédibles ?* Réponses possibles : *pas du tout d'accord / pas d'accord / plutôt pas d'accord / moyennement d'accord / plutôt d'accord / d'accord / tout à fait d'accord / sans opinion ;*

Pour chaque participant l'ordre des pages 3, 4, 5, 6, était sélectionné aléatoirement, comme l'ordre des vidéos qui apparaissaient sur chacune des pages. Ce procédé, appelé contrebalancement des passations, est utilisé pour éviter des biais dans les réponses des participants qui seraient liés à l'ordre dans lequel ils voient les vidéos.

En bas de chacune des pages 3, 4, 5, 6, il y avait un champ de commentaires libres. Les participants avaient le droit de revoir plusieurs fois les vidéos présentes sur ces pages. En revanche ils ne pouvaient pas revenir en arrière une fois la page validée.

7.4.2 Production des vidéos

Nous avons produit onze vidéos de quarante secondes chacune. Ces vidéos ont été enregistrés avec le simulateur MASON (Luke *et al.*, 2005), dans lequel COR-E a été implémenté. Nous expliquons ci-après comment le modèle COR-E a été configuré pour produire chacune de ces vidéos, et nous donnons une description pour chacune d'elles.

Présentation du scénario

Nous avons implémenté un scénario de file d'attente, dans lequel des agents patientent dans la file pour acheter un ticket. Ils ont la possibilité de doubler pour gagner un rang dans la file, et de réaliser des comportements de protection quand ils se font doubler. Dans

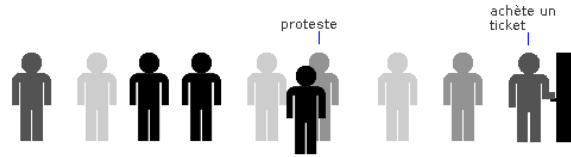


FIGURE 7.1 – Capture d’écran d’une simulation produite par COR-E.

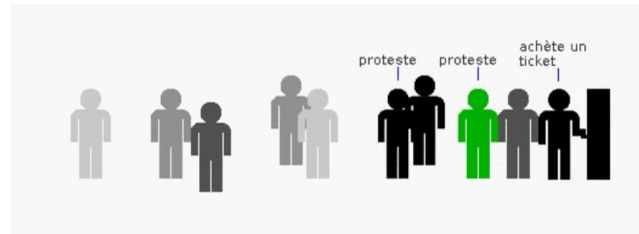


FIGURE 7.2 – Capture d’écran d’une simulation produite par COR-E avec le personnage vert.

l’évaluation préliminaire nous avons utilisé le comportement de protection « protester ». Dans cette évaluation approfondie, nous avons rajouté un second comportement de protection qui consiste à menacer un agent de le frapper. Quand un agent proteste, il peut faire perdre de la réputation à l’agent contre lequel il proteste. Quand il menace de frapper un autre agent, il peut lui faire perdre de la santé. Nous avons introduit ce comportement de menace physique de manière à pouvoir simuler une gradation dans la ressource menacée. Cela est utilisé pour évaluer le niveau de menace dynamique d’un agent. Quand un agent se protège, il peut donc faire perdre de la réputation ou de la santé à l’agent contre lequel est lancée cette action de protection. Les agents anticipent qu’ils peuvent perdre de la réputation ou de la santé lorsqu’ils doublent, et choisissent donc leur comportement en fonction de l’importance qu’ils accordent à leur réputation, leur santé, et au rang qu’ils peuvent gagner. Les agents étaient représentés sous forme d’icônes dans une file d’attente à une colonne au bout de laquelle se situait un guichet (voir figures 7.1 et 7.2).

Ressources utilisées

Le scénario comportait trois types d’instances de ressources :

- des ressources de type *Rang*, représentant chacune un rang dans la file d’attente. Comme pour l’évaluation préliminaire nous définissons $exclusif_{Rang} = vrai$ et aussi $partageable_{Rang} = faux$;
- des ressources de type *Reputation*, représentant de la réputation. Les propriétés de ce type de ressource n’ont pas d’incidence sur le scénario, comme nous l’avons expliqué dans l’évaluation préliminaire ;
- des ressources de type *Sante*, représentant la santé des agents. Ce type de ressource est personnel et non partageable, mais comme pour le type *Reputation* ces propriétés n’ont aucune incidence dans le scénario que nous avons défini. En effet nous n’avons pas défini de comportement permettant aux agents d’acquérir une ressource de type *Sante*.

Initialisation des ensembles de ressources et perception

La simulation comprenait trente agents représentant l'ensemble des agents \mathcal{A} . Ce nombre d'agents est supérieur à celui qui a été utilisé pour l'évaluation préliminaire, de façon à ce que de nouveaux agents puissent arriver dans la file en cours de simulation. Cela permet d'obtenir des simulations de durée plus longue, et de garder une file de longueur à peu près constante sur une plus grande période de temps. Hormis les conditions que nous souhaitons évaluer, il est en effet préférable de garder des conditions constantes pour éviter les biais.

Chaque agent $i \in \mathcal{A}$ possédait à son initialisation des ressources de type *Reputation* et des ressources de type *Sante* incluses dans RA_i . Ces instances de ressources sont personnelles et étaient donc toutes différentes entre elles, chaque agent possédant sa propre réputation et sa propre santé. De plus, si i se situait dans la file dès le début de la simulation, il possédait également une ressource de type *Rang* dont le niveau correspondait au rang qu'il occupait. Le nombre de ressources de type *Sante* et *Reputation* possédé par chaque agent a été déterminé de façon à pouvoir menacer la réputation d'un agent avec deux degrés d'importance (« proteste » et « proteste vigoureusement », demandant deux ressources de type *Reputation*), et à pouvoir menacer sa santé avec un degré d'importance (« menace de frapper la personne » demandant une ressource de type *Sante*). Une instance de ressource supplémentaire a été ajoutée pour chaque type *Reputation* et *Sante* afin qu'un agent puisse anticiper une menace tout en pouvant à la fois revenir sur ses pas. En effet, lorsqu'un agent i calcule la valeur du comportement « doubler », il doit pouvoir anticiper la perte d'une ressource $r \in \mathcal{R}$, car s'il n'anticipe pas cette perte il sélectionnera toujours le comportement doubler. Lorsque i choisit de doubler en anticipant la perte de r , cela signifie que n'importe quel comportement de protection menaçant la ressource r n'aura aucun effet sur i , puisque i a décidé de doubler même s'il anticipe de perdre r . Or, le comportement de protection le moins agressif doit potentiellement pouvoir faire revenir un agent en arrière, et il faut donc que ce comportement puisse menacer une ressource $r' \neq r$. Voilà pourquoi il est nécessaire d'ajouter une ressource supplémentaire, en plus des ressources qui vont être menacées par les différents comportements de protection. Par exemple, si un agent i examine les effets du comportement « doubler », qui sont la perte d'une ressource r pour i et le gain d'un rang $rang_x$ pour i , et que $v(rang_x, i) > v(r, i)$, i va sélectionner ce comportement. Pendant que i double, si un agent j engage le comportement de protection le moins agressif contre i en menaçant une ressource r' , et que $v(rang_x, i) < v(r', i)$, i va cesser son comportement « doubler », car il perdrait une ressource de valeur plus importante que le rang qu'il essaye de gagner. Il revient donc sur ses pas.

Au total chaque agent $i \in \mathcal{A}$ avait donc trois ressources de type *Reputation*, notées $reputation1_i$, $reputation2_i$ et $reputation3_i$, et deux ressources de type *Sante* notées $sante1_i$ et $sante2_i$.

L'initialisation des ressources désirées pour chaque agent était identique à celle de l'évaluation préliminaire. C'est-à-dire que $\forall i \in \mathcal{A}$, tous les rangs de la file d'attente étaient inclus dans RD_i , sauf les rangs de valeur inférieure à celui que i possédait déjà (cela est mis à jour automatiquement grâce à la propriété $exclusif_{Rang} = vrai$). Si i n'est pas encore dans la file, autrement dit si i arrive en cours de simulation, il ne possède pas de rang à l'initialisation.

La perception des ressources est identique à celle qui a été définie dans l'évaluation préliminaire, c'est à dire que l'ensemble des ressources acquises d'un agent i est perceptible par tout agent j ($\forall i, j \in \mathcal{A}, P_j(RA_i) = RA_i$).

Initialisation des préférences

Toutes les ressources de ce scénario étaient classées strictement entre elles dans l'ordre de préférences de chaque agent $i \in \mathcal{A}$, de sorte qu'il n'existe pas deux ressources de valeurs égales. Les ressources étaient classées telles que $\forall i \in \mathcal{A}, \text{sante}2_i \succ_i^{\mathcal{R}'} \text{sante}1_i$ et $\text{reputation}3_i \succ_i^{\mathcal{R}'} \text{reputation}2_i \succ_i^{\mathcal{R}'} \text{reputation}1_i$. Dans les préférences d'un agent i , les ressources de santé et de réputation propres à i étaient toujours préférées aux ressources de santé et de réputation propres à tout autre agent j . Pour les rangs de la file d'attente, un rang d'indice n était toujours strictement préféré par un agent i à un rang d'indice $n+1$ (par exemple, le premier rang est toujours strictement préféré au second rang). En plus de ces éléments, les préférences variaient selon les vidéos produites. Leur configuration est expliquée ci-après dans la section 7.4.3.

Comportements possibles

La définition des comportements dans cette évaluation est légèrement différente de celle qui a été proposée dans l'évaluation préliminaire. Il existe en effet seulement deux degrés de protestation (au lieu de quatre), et nous avons en plus ajouté la possibilité d'effectuer une menace physique. En conséquence, lorsqu'un agent double, il anticipe la perte d'une de ses ressources de type *Reputation* ou de type *Sante*, choisie aléatoirement parmi l'ensemble des ressources de ce type qu'il possède. Lorsqu'un agent i proteste contre un agent j , il peut menacer les ressources *reputation*3 $_j$ et *reputation*2 $_j$ appartenant à j (la ressource *reputation*1 $_j$ est utilisée uniquement pour la sélection du comportement doubler, comme nous l'avons expliqué ci-avant). Si i proteste en menaçant *reputation*3 $_j$, l'indication textuelle « proteste vigoureusement » est affichée au dessus de la tête de i . S'il s'agit d'une ressource de *reputation*2 $_j$, c'est l'indication « proteste » qui est affichée. Nous définissons de plus un comportement supplémentaire pour ce scénario pouvant être réalisé par tout agent $i \in \mathcal{A}$:

- *menaceFrappe* $_{i,j \in \mathcal{A}^2}$: il s'agit d'un comportement de protection de type attaque pour une ressource $r \in \mathcal{R}$ avec $\text{type}(r) = \text{Rang}$. Ce comportement représente un agent i en train de menacer physiquement un agent j , et il permet à i de protéger le rang qu'il possède lorsque j essaye de lui prendre. **Préconditions** : pour tout rang_x de la file d'attente possédé par i et menacé par j , $\text{Poss}(\text{proteste}_{i,j \in \mathcal{A}^2}) \equiv (\text{cause}(\text{rang}_x, \text{RM}_i) \in \mathcal{C} \wedge \text{agent}(c) = j \wedge \text{sante}2_j \in P_i(\text{RA}_j))$, c'est-à-dire que la cause de la menace doit être un comportement, l'agent réalisant ce comportement doit être j , et de plus j doit encore posséder la ressource *sante*2 $_j$ perçue par i . Si j ne possède pas la ressource *sante*2 $_j$, il est impossible pour i de le menacer¹. **Effets** : lorsqu'il proteste contre j , un agent i menace la ressource *sante*2 $_j$ appartenant à j . Formellement $\text{cause}(r', \text{RM}_j) = \text{menaceFrappe}_{i,j \in \mathcal{A}^2}$. **Affichage** : lorsque ce comportement est réalisé par un agent i , le texte « menace de frapper la personne » est affiché au dessus de la tête de i .

Quand un agent arrivait en tête de file, il effectuait automatiquement le comportement d'acheter un ticket, indiqué par un texte au dessus de sa tête. Une fois le ticket acheté, l'agent quittait la file, laissant le premier rang à l'agent suivant. Un agent arrivait pour entrer dans la file d'attente après une certaine durée (entre 4 et 10 secondes). Lorsque les agents se déplaçaient, ils laissaient des espaces plus ou moins grands entre eux dans la file.

1. cela est lié au fait que nous avons défini que $\forall i, j \in \mathcal{A}, P_j(\text{RA}_i) = \text{RA}_i$. Un agent j peut donc percevoir quand un agent i n'a plus de santé, et qu'il ne peut donc menacer aucune ressource de santé de i .

Pour qu'un agent puisse doubler, il devait y avoir un espace suffisant pour qu'il s'insère (précondition).

Les comportements automatiques des agents, c'est-à-dire non soumis au processus de sélection (« avancer dans la file sans doubler »), sont réalisés de la même façon que dans l'évaluation préliminaire. Dans l'évaluation approfondie, la simulation commence avec dix agents, ayant chacun un rang dans la file d'attente. Quand la simulation démarre, un nouvel agent entre par intervalle de 4 à 6 secondes. Cet agent va chercher à acquérir un rang de la même façon que les autres agents. Il peut immédiatement doubler, ou bien se placer en fin de file, ce qui correspond à un comportement automatique.

7.4.3 Conditions utilisées pour produire les vidéos

Nous avons établi au total quatre séries de vidéos, visant chacune à évaluer une caractéristique particulière de l'architecture de COR-E. Dans chacune de ces séries, nous avons inclus une vidéo produite avec le modèle COR-E complet et configuré d'une façon que nous estimons correcte (condition normale). En plus de cette vidéo, la série contenait une à deux autres vidéos supplémentaires, produites avec le modèle COR-E incomplet, ou configuré d'une façon que nous estimons incorrecte (autres conditions). L'évaluation des résultats obtenus pour chaque vidéo d'une série permet d'indiquer si la condition normale permet d'obtenir des résultats meilleurs ou moins bons que les vidéos produites avec les autres conditions. Par exemple, nous avons vérifié sur une série si l'activation des comportements d'acquisition et de protection (condition normale) permet aux participants de reconnaître davantage d'émotions que dans la situation où ces comportements sont désactivés (autre condition). Dans la suite de ces explications nous appelons *configuration COR-E* la condition normale correspond au modèle COR-E complet et paramétré d'une façon que nous estimons correcte.

La configuration COR-E présente les propriétés suivantes :

1. les agents peuvent réaliser des comportements de protection et d'acquisition ;
2. les préférences sont configurées de la façon suivante : pour 3 agents sur 4 une ressource de type *Sante* est toujours préférée à une ressource de type *Reputation*, et une ressource de type *Reputation* est toujours préférée à une ressource de type *Rang* (autrement dit l'agent ne doublera jamais). Pour 1 agent sur 4, une ressource de type *Sante* est toujours préférée à une ressource de type *Reputation*, mais certaines ressources de type *Rang* peuvent aléatoirement être préférées à des ressources de type *Reputation* (l'agent peut donc éventuellement doubler) ;
3. le niveau de menace d'un agent est fixé au seuil le plus bas, et à 50% de chances d'augmenter lorsque cet agent perd une ressource de type *Rang* en se faisant doubler ;

Plusieurs vidéos ont été produites avec ce type de configuration. Comme les agents sont séquencés dans un ordre aléatoire (*i* peut agir avant *j* à un certain pas de temps, puis *j* peut agir avant *i* à un autre pas de temps), et qu'il y a certains paramètres aléatoires (par exemple le niveau de réputation menacée), les vidéos produites sont différentes. Ces facteurs introduisent de la variabilité dans les simulations obtenues.

En plus de la configuration COR-E, d'autres vidéos ont été produites avec des conditions différentes. La nature de ces conditions était spécifique à chaque série, par exemple une série portait sur l'évaluation des préférences, et une autre sur l'évaluation du niveau de menace dynamique. Au total 4 groupes (ou séries) de vidéos ont été produites avec les conditions suivantes :

- **groupe 1** : 3 vidéos ont été produites pour ce groupe en relation avec l'hypothèse *H2*, portant sur l'impact des comportements d'acquisition et de protection dans la

reconnaissance de l'aspect émotionnel des comportements. Dans la vidéo 1a, les comportements d'acquisition et de protection étaient désactivés (condition $NA \wedge NP$). Dans la vidéo 1b, les comportements d'acquisition étaient activés mais pas les comportements de protection (condition $A \wedge NP$), et dans la vidéo 1c les comportements d'acquisition et de protection étaient activés (condition $A \wedge P$, correspondant à la configuration *COR-E*).

- **groupe 2** : 3 vidéos ont été produites pour ce groupe en relation avec l'hypothèse *H3*, portant sur l'impact de la configuration des préférences sur la crédibilité des comportements. Dans la vidéo 2a les préférences des agents correspondaient à la configuration *COR-E* (condition *Pref1*). Dans la vidéo 2b, les préférences des agents ont été configurées de sorte qu'une ressource de type *Rang* était toujours préférée à une ressource de type *Reputation* (condition *Pref2*). Dans la vidéo 2c, les préférences des agents étaient configurées par tirage aléatoire (condition *Pref3*). Le tirage aléatoire respectait néanmoins l'ordre établi sur les niveaux de ressources, par exemple une ressource de type *Reputation* de niveau 2 était toujours préférée à une ressource de type *Reputation* de niveau 1.
- **groupe 3** : 3 vidéos ont été produites pour ce groupe en relation avec l'hypothèse *H5*, portant sur l'impact du niveau de menace dynamique sur la crédibilité des comportements. Un agent a été colorié en vert, et ses préférences ont été configurées de sorte qu'il ne double pas, c'est-à-dire que toute ressource de type *Sante* ou *Reputation* était préférée à une ressource de type *Rang*. Les préférences des autres agents ont été configurées de façon à ce qu'ils doublent souvent, de sorte à ce que l'agent vert puisse se faire doubler un certain nombre de fois. Dans la vidéo 3a, le niveau de menace de l'agent vert n'augmentait pas (condition *M1*). Dans la vidéo 3b le niveau de menace de l'agent vert avait 50% de chances d'augmenter lorsqu'il perdait un rang parce qu'un autre agent l'avait doublé (condition *M2*, correspondant à la configuration *COR-E*), et dans la vidéo 1c 100% de chances d'augmenter lorsqu'il perdait un rang parce qu'un autre agent l'avait doublé (condition *M3*).
- **groupe 4** : 2 vidéos ont été produites pour ce groupe en relation avec l'hypothèse *H4*, portant sur l'impact des ressources de type psychologique sur la crédibilité des comportements. Dans la vidéo 4a, la ressource de réputation était présente (condition *Rep*, correspondant à la configuration *COR-E*), et dans la vidéo 4b elle était absente, c'est à dire éliminée de l'environnement, des préférences et des ensembles de ressources des agents (condition *NRep*). Les préférences ont été configurées de sorte qu'une ressource de type *Rang* puisse être préférée à une ressource de type *Sante*.

Les vidéos 1c, 2a et 4a ont été produites avec la configuration *COR-E*, et servent toutes les trois à évaluer l'hypothèse générale *H1*.

7.5 Résultats

113 participants ont contribué à cette étude, âgés de 13 à 72 ans (33,69 ans en moyenne). Le pays d'une grande majorité d'entre eux était la France (environ 94%).

Nous présentons dans cette section les hypothèses opérationnelles et les résultats qui leurs sont associés. Le mode (valeur la plus fréquente d'une distribution) est noté *Mo*, la moyenne μ et l'écart-type σ . Nous avons utilisé deux tests statistiques, le test de *Student* (résultat noté *t*), et le test du *chi-2* (résultat noté χ^2). Tous les résultats que nous présentons dans cette section sont discutés dans la section suivante.

7.5.1 Hypothèses sur le modèle COR-E

Les hypothèses opérationnelles de cette section sont liées à l'hypothèse générale **H1**. Elles concernent les vidéos 1c, 2a, et 4a qui correspondent à la *configuration COR-E* (expliquée section 7.4.2). Les scores minimum et maximum que nous rapportons concernent donc uniquement ces trois vidéos.

H1a : *les participants vont juger que les comportements simulés par le modèle COR-E sont crédibles.*

Sur une échelle allant de 1 (*pas du tout d'accord*) à 7 (*tout à fait d'accord*), les participants sont dans l'ensemble *plutôt d'accord* à *d'accord* sur le fait que les comportements observés sont crédibles. La moyenne la plus faible pour la question Q1 a été obtenue par la vidéo 1c, et la plus haute a été obtenue pour la vidéo 2a (voir tableau 7.1 et figure 7.3). Les scores obtenus sont significatifs quand ils sont comparés à une moyenne de 4 avec un test *t* de Student (1c : $t = 7.59$; $p < .001$; 2a : $t = 18.64$; $p < .001$; 4a : $t = 10.39$; $p < .001$). Ces résultats soutiennent **H1a**.

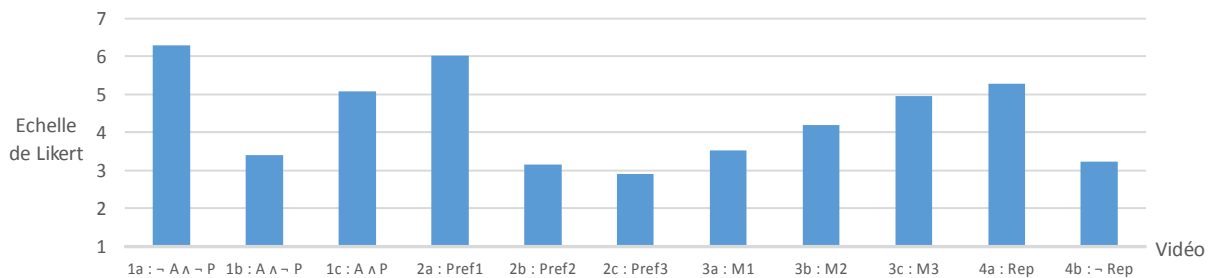


FIGURE 7.3 – Moyenne du score de crédibilité obtenu pour chaque vidéo.

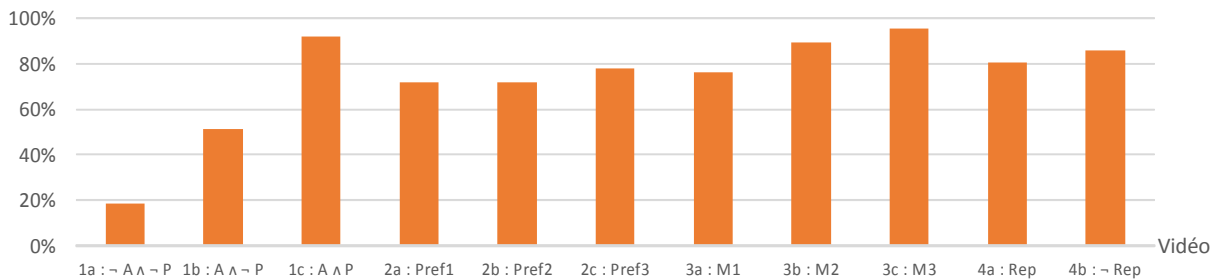


FIGURE 7.4 – Pourcentage de participants ayant répondu "oui" à la question Q2 portant sur les émotions pour chaque vidéo.

	μ	σ	Mo
Vidéo 1c	5,08	1,51	5
Vidéo 2a	6,01	1,15	7
Vidéo 4a	5,28	1,31	5

TABLE 7.1 – Résultats sur la crédibilité pour les vidéos 1c, 2a et 4a

H1b : *les participants vont juger que les comportements simulés par le modèle COR-E sont liés à des émotions.*

Une grande majorité de participants a estimé que les comportements des agents étaient liés à des émotions. Le plus petit pourcentage de participants ayant répondu "oui" à la

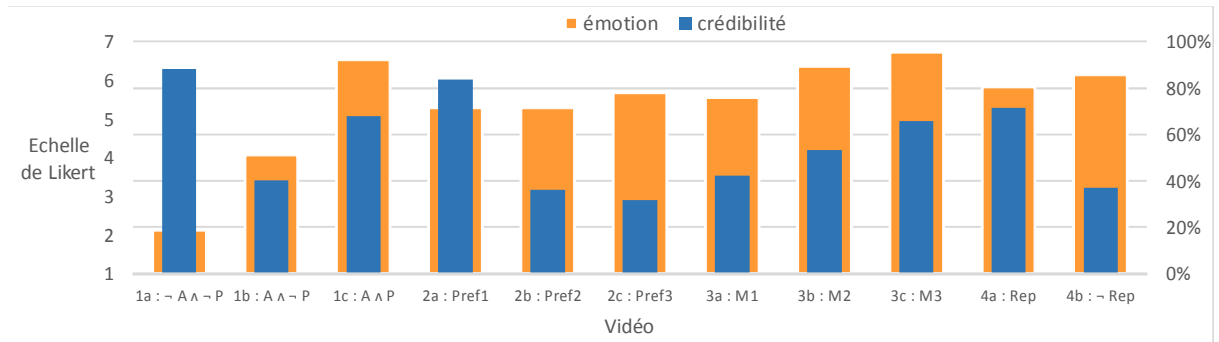


FIGURE 7.5 – Graphique combiné du score de crédibilité et du score obtenu à la question Q2 portant sur les émotions.

question Q2 est de 71,68% pour la vidéo 2a, et le plus grand est de 92,04% pour la vidéo 1c (voir figure 7.4 et tableau 7.2). Pour la vidéo 4a ce pourcentage est de 80,53%. Ces fréquences sont significatives par rapport aux fréquences théoriques pour chaque vidéo (vidéo 1c : $\chi^2 = 79,87$, $\alpha < .001$; 2a : $\chi^2 = 21,25$, $\alpha < .001$; 4a : $\chi^2 = 42,12$, $\alpha < .001$). Ces résultats soutiennent **H1b**.

Vidéo	1a	1b	1c	2a	2b	2c
Score	18,58 %	51,33 %	92,04 %	71,68 %	71,68 %	77,88 %
Vidéo	3a	3b	3c	4a	4b	
Score	76,11 %	89,38 %	95,58 %	80,53 %	85,84 %	

TABLE 7.2 – Pourcentage de participants ayant répondu "oui" à la question Q2 portant sur les émotions pour chaque vidéo.

H1c : les participants vont davantage reconnaître certaines catégories d'émotion, indiquant que ces catégories ne sont pas choisies au hasard.

Les catégories d'émotion reconnues par les participants sont significatives pour chaque vidéo. Ce résultat a été obtenu par un test du χ^2 (vidéo 1c : $\chi^2 = 327,96$; $\alpha < .001$; vidéo 2a : $\chi^2 = 177,22$; $\alpha < .001$, vidéo 4a : $\chi^2 = 180,78$; $\alpha < .001$). Dans chacune des vidéos c'est l'émotion de "colère" qui est la plus reconnue par les participants (1c : 74,04% de participants l'ont reconnue ; 2a : 48,15% ; 4a : 52,75%), et la "frustration" est en seconde place (1c : 51,92% ; 2a : 43,21% ; 4a : 45,05%). La fréquence théorique qu'une émotion soit sélectionnée par un utilisateur lorsqu'il a répondu "oui" à Q2 est de $(1/15) * 3$, car il y avait 15 choix possibles dans une liste et il pouvait sélectionner jusqu'à 3 catégories (dont plusieurs fois la même). La "surprise", le "mépris", la "honte" et la "frustration" dépassent cette fréquence théorique dans au moins une des vidéos. Les émotions "amour" et "tristesse" n'ont été sélectionnées par aucun utilisateur. On observe également que pour chaque émotion, le pourcentage de participants l'ayant reconnue est relativement stable sur les trois vidéos (se reporter au tableau 7.3). Enfin, certains participants ont reconnu d'autres émotions que celles proposées dans la liste (catégorie "autres", de 4,81% à 9,88% par vidéo). Ces résultats soutiennent **H1c**.

7.5.2 Comportements d'acquisition et de protection

Les hypothèses opérationnelles de cette section sont liées à l'hypothèse générale **H2** et concernent le groupe de vidéos 1. La vidéo 1a correspondait à la désactivation des

émotion	Vidéo 1c	Vidéo 2a	Vidéo 4a
colère	74,04%	48,15%	52,75%
peur	19,23%	12,35%	19,78%
tristesse	0%	0%	0%
joie	0,96%	1,23%	1,10%
dégoût	8,65%	4,94%	8,79%
surprise	32,69%	23,46%	30,77%
fierté	8,65%	7,41%	9,89%
honte	7,69%	22,22%	14,29%
mépris	24,04%	17,28%	28,57%
amour	0%	0%	0%
haine	2,88%	2,47%	1,10%
ennui	7,69%	18,52%	9,89%
frustration	51,92%	43,21%	45,05%
autres	4,81%	9,88%	6,59%

TABLE 7.3 – Pourcentage de participants ayant reconnu une catégorie d’émotion pour les vidéos 1c, 2a et 4a.

comportements d’acquisition et de protection (condition $NA \wedge NP$), la 1b à la désactivation des comportements de protection uniquement (condition $A \wedge NP$), et la 1c à l’activation des deux types de comportement (condition $A \wedge P$).

H2a : *les observateurs vont juger que les comportements des agents sont liés aux émotions lorsque les comportements de protection et d’acquisition sont activés, mais pas lorsqu’ils sont désactivés.*

Une grande majorité de participants a estimé que dans la vidéo 1c les comportements des agents étaient liés à des émotions (oui en réponse à Q2 : 92,04% ; non : 7,96%, voir figure 7.4), et que dans la vidéo 1a les comportements n’étaient pas liés à des émotions (oui : 18,58% ; non : 81,42%). Ces résultats sont significatifs par rapport à des fréquences théoriques (vidéo 1c : $\chi^2 = 327,96$; $\alpha < .001$; vidéo 1a : $\chi^2 = 43,37$; $\alpha < .001$). Ces résultats soutiennent **H2a**.

H2b : *les observateurs vont juger que les comportements des agents sont plus crédibles lorsqu’ils adoptent à la fois des comportements d’acquisition et de protection que lorsqu’ils adoptent des comportements d’acquisition seuls.*

Les participants sont dans l’ensemble *plutôt d’accord* à *d’accord* sur le fait que les comportements observés sont crédibles pour la vidéo 1c. En revanche pour la vidéo 1b les participants ne sont *plutôt pas d’accord* avec cette affirmation (voir tableau 7.4). Les résultats sur la crédibilité pour ces deux vidéos sont significatifs entre eux ($t = 7.59$, $p < .001$). Ces résultats soutiennent **H2b**.

	μ	σ	Mo
Vidéo 1a	6,28	1,11	7
Vidéo 1b	3,41	1,78	2
Vidéo 1c	5,08	1,51	5

TABLE 7.4 – Résultats sur la crédibilité pour les vidéos 1a, 1b et 1c

En résultat supplémentaire, on note que la vidéo 1a obtient le meilleur score de crédibilité, une majorité de participants étant *tout à fait d’accord* avec l’affirmation de la question Q1.

7.5.3 Préférences

L'hypothèse opérationnelle de cette section est liée à l'hypothèse générale **H3**, concernant le groupe de vidéos 2. La vidéo 2a correspondait aux préférences configurées en vue de produire des comportements crédibles (condition *Pref1*), la 2b à des préférences mal configurées (condition *Pref2*) et la 2c à des préférences aléatoires (condition *Pref3*).

H3a : *les comportements produits à partir d'une bonne configuration des préférences vont être jugés plus crédibles que des comportements produits à partir de préférences aléatoires ou mal configurées.*

La vidéo 2a a été jugée plus crédible que les vidéos 2b et 2c (voir tableau 7.5). Les résultats sont significatifs entre la vidéo 2a et 2b ($t = 14.03$, $p < .001$), ainsi qu'entre la vidéo 2a et 2c ($t = 16.04$, $p < .001$). Ces résultats soutiennent **H3a**.

	μ	σ	<i>Mo</i>
Vidéo 2a	6,01	1,15	7
Vidéo 2b	3,17	1,82	1
Vidéo 2c	2,90	1,70	1

TABLE 7.5 – Résultats sur la crédibilité pour les vidéos 2a, 2b et 2c.

7.5.4 Ressources de « Réputation »

L'hypothèse opérationnelle de cette section est liée à l'hypothèse générale **H4**, concernant le groupe de vidéos 4. La vidéo 4a correspondait à la présence de la ressource de réputation (condition *Rep*) et la vidéo 4b correspondait à l'absence de la ressource réputation (condition *NRep*).

H4a : *les comportements produits avec la simulation de ressources de réputation vont être jugés plus crédibles par les observateurs humains que des comportements produits sans ces ressources.*

La vidéo 4a a été jugée plus crédible que la vidéo 4b (voir tableau 7.6). Les résultats sont significatifs entre ces deux vidéos ($t = 11.15$, $p < .001$). Ces résultats soutiennent **H4a**.

	μ	σ	<i>Mo</i>
Vidéo 4a	5,28	1,31	5
Vidéo 4b	3,22	1,60	2

TABLE 7.6 – Résultats sur la crédibilité pour les vidéos 4a et 4b.

7.5.5 Niveau de menace graduel

L'hypothèse opérationnelle de cette section est liée à l'hypothèse générale **H5**, concernant le groupe de vidéos 3. La vidéo 3a correspondait à l'absence d'augmentation du niveau de menace (condition *M1*), la 3b à une augmentation du niveau de menace modérée (condition *M2*), et la 3c à une augmentation rapide du niveau de menace (condition *M3*).

H5a : *les comportements produits avec une augmentation du niveau de menace seront jugés plus crédibles que les comportements produits avec un niveau de menace fixe.*

Les vidéos 3c et 3b ont été jugées plus crédibles que la vidéo 3a (voir tableau 7.7). Ces résultats sont significatifs entre la vidéo 3a et 3b ($t = 4.14$, $p < .001$), ainsi qu'entre la vidéo 3a et 3c ($t = 6.55$, $p < .001$). Ces résultats soutiennent **H5a**.

	μ	σ	Mo
Vidéo 3a	3,54	1,84	2
Vidéo 3b	4,19	1,78	5
Vidéo 3c	4,95	1,51	5

TABLE 7.7 – Résultats sur la crédibilité pour les vidéos 3a, 3b et 3c.

Comme résultat supplémentaire, on note que la vidéo 3c a été jugée plus crédible que la vidéo 3b. Ce résultat est significatif entre ces deux vidéos ($t = 3.84$, $p < .001$).

7.6 Discussion

Les hypothèses formulées sur le modèle COR-E sont toutes soutenues par les résultats que nous avons obtenus. Nous pouvons en déduire que COR-E permet de simuler des comportements émotionnels crédibles (hypothèse générale **H1**) grâce à ses caractéristiques (**H2**, **H3**, **H4**). Les comportements d'acquisition et de protection, les préférences, et les ressources psychologiques de type « Réputation » sont des éléments nécessaires à la simulation de tels comportements. Le niveau de menace dynamique, que nous avons testé comme extension possible du modèle, a également produit des comportements jugés plus crédibles (**H5**). Cela montre l'utilité d'introduire cet état affectif dans le modèle. Ces résultats d'ensemble sont à mettre en rapport avec plusieurs éléments que nous abordons ci-après.

Concernant **H1a** portant sur la crédibilité, les comportements produits par le modèle COR-E ont été jugés crédibles (moyenne de 5,08 à 6,01 sur une échelle de 1 à 7). Cependant, le meilleur score en crédibilité a été obtenu par la vidéo 1a ne correspondant pas au modèle, où il n'y a ni comportement d'acquisition, ni comportement de protection (moyenne de 6,28). Il y a en revanche un très faible pourcentage d'émotion reconnues (18,58% de participants). Dans cette vidéo, les agents patientent sans doubler ni protester, ce qui favorise ce score faible. Même si les comportements produits dans cette vidéo ne sont pas pertinents dans le cadre de cette thèse parce qu'ils ne sont pas jugés émotionnels, ils peuvent tout à fait convenir dans les situations où on ne cherche pas à simuler de tels comportements. Un mauvais résultat se caractérise avant tout par un mauvais score de crédibilité. Il aurait été intéressant de savoir si les participants auraient eu un meilleur sentiment d'immersion en observant la vidéo 1a, jugée tout à fait crédible, où en observant une vidéo jugée un peu moins crédible mais dans laquelle ils reconnaissent plus d'émotions, par exemple la 1c. L'immersion est en effet un paramètre important dans les jeux vidéo, qui est un des domaines d'application du projet Terra Dynamica, et les émotions devraient la favoriser davantage. L'évaluation de cet aspect pourrait permettre de savoir s'il vaut mieux préserver la crédibilité au détriment des comportements émotionnels, ou s'il vaut mieux introduire des comportements émotionnels au risque de perdre un peu en crédibilité.

De façon générale, il est possible que le score de crédibilité ait été diminué en raison d'un biais lié à l'interprétation du terme « crédible ». Dans cette étude nous avons cherché à savoir si les participants pensaient que les comportements des agents étaient crédibles, sans notion relative à la fréquence de ces comportements. C'est-à-dire qu'un comporte-

ment se produisant peu fréquemment peut être tout aussi crédible qu'un comportement se produisant fréquemment, ce qui compte étant la pertinence du comportement par rapport à une situation donnée. Néanmoins, un participant a rapporté au sujet d'une partie de l'évaluation que les comportements observés dans chacune des vidéos pouvaient se produire dans la réalité, mais que ce qui se produisait moins fréquemment était moins crédible. Comme les comportements émotionnels ont tendance à se produire peu fréquemment, ils pourraient donc être jugés comme moins crédibles. Un autre biais possible ayant pu abaisser le score de crédibilité peut être lié aux déplacements des agents. Par exemple, le fait qu'un agent aille en queue de file lorsqu'il s'est fait disputer après avoir essayé de doubler n'a pas semblé crédible à certains participants. Enfin, des participants ont rapporté que les icônes avec lesquelles les agents étaient représentés rendaient difficile l'interprétation des émotions. Ces éléments indiquent que la crédibilité des comportements des agents pourrait donc être encore améliorée.

Concernant **H1b** et **H1c** portant sur la reconnaissance d'émotions, une grande majorité de participants a reconnu les comportements produits par COR-E comme liés aux émotions (de 71,68% à 92,04%). Parmi les réponses de ces participants, les émotions de colère et de frustration ont été les plus citées en réponse à la question Q3. On peut observer que certaines vidéos ne correspondant pas au modèle COR-E (caractéristique manquante ou configuration incorrecte) obtiennent de très bons scores sur la reconnaissance d'émotions. Cela était attendu, puisque nous avons déjà observé lors de l'évaluation préliminaire que des comportements jugés peu crédibles peuvent être jugés comme émotionnels. Mais le modèle COR-E a pour objectif de simuler des comportements à la fois émotionnels et crédibles. Si on prête attention à la combinaison de ces deux critères, ce sont bien les vidéos produites par COR-E qui obtiennent les meilleurs résultats, avec à chaque fois des scores supérieurs à la moyenne concernant la crédibilité et les émotions reconnues. Ces résultats sont visibles sur la figure 7.5 qui représente un graphique combiné des deux critères. On voit que pour les vidéos ne correspondant pas à la configuration COR-E (1a, 1b, 2b, 2c, 4b), le score de crédibilité ou le score concernant les émotions sont inférieurs respectivement à 4 sur l'échelle de Likert et 50 %. Ces vidéos ne parviennent pas à combiner à la fois l'aspect crédible et émotionnel. Comme nous l'avons dit dans le paragraphe ci-avant, le résultat de la vidéo 1a ne doit toutefois pas être considéré comme un mauvais résultat.

Comme nous l'avons expliqué dans l'évaluation préliminaire, les bons résultats concernant la reconnaissance d'émotions par les participants peuvent être liés à l'emploi de l'indication textuelle « protester ». Ce terme peut être psychologiquement associé à l'émotion de colère chez les participants, facilitant ainsi la reconnaissance de cette émotion. Nous avons à nouveau utilisé ce terme pour l'évaluation approfondie car c'est celui qui convient à la situation que nous simulons. Selon la classification d'Austin (1975), « protester » fait partie des actes de langage comportementaux, qui représentent des réactions vis à vis du comportement des autres. Nous simulons en effet une réaction d'un agent à une menace. Cependant, il serait intéressant de vérifier si les mêmes résultats seraient obtenus sans indication textuelle. Dans une évaluation future, nous pourrions utiliser une indication visuelle, telle qu'un agent fronçant les sourcils et levant le poing. Il serait aussi intéressant de coupler COR-E à un modèle de sélection d'énoncés permettant aux agents de s'exprimer avec des phrases. Pour cela, nous pourrions nous appuyer sur un modèle existant de sélection d'énoncés en relation avec l'impolitesse (Campano et Sabouret, 2009b). Nous supposons toutefois que ce genre d'indication susciterait également la reconnaissance d'émotions. D'après le cadre théorique dans lequel COR-E a été développé, les émotions sont des interprétations d'une situation, y compris des comportements observés. Il est

donc logique que la reconnaissance d'émotions chez les participants soit influencée par les comportements des agents, qu'ils soient physiques, expressifs ou verbaux.

Concernant les hypothèses **H2a** et **H2b** portant sur les comportements d'acquisition et de protection, leur vérification nous a permis de mettre en évidence un phénomène que nous n'avions pas anticipé. Nous avons vu que les comportements d'acquisition et de protection ont un impact fort sur la reconnaissance d'émotions, mais on peut aussi observer que les comportements de protection semblent avoir un plus grand impact sur la reconnaissance d'émotions que les comportements d'acquisition. Cette observation mériterait d'être confirmée à l'aide de nouvelles évaluations, cependant quelques éléments pourraient déjà l'expliquer. La théorie COR de Hobfoll (1989) postule que la perte de ressources est plus importante pour un individu que le gain de ressources, car la perte a plus d'impact sur la vie psychique d'un individu. Cela signifie que tout comportement de protection est a priori plus important que tout comportement d'acquisition, car il exprime directement la présence d'une menace. À ce titre, il serait normal que les comportements de protection suscitent plus de reconnaissance d'émotions. De plus, le vocabulaire concernant les émotions négatives est plus riche que le vocabulaire concernant les émotions positives (Schrauf et Sanchez, 2004). Il serait donc plus facile pour les participants de qualifier les comportements de protection, associés directement à des menaces, avec des termes émotionnels.

Concernant l'hypothèse **H3a** sur les préférences, les résultats que nous avons obtenus diffèrent de ceux de l'évaluation préliminaire. En effet, l'évaluation préliminaire n'avait pas permis de confirmer que des préférences configurées d'une façon estimée incorrecte donnerait lieu à des comportements jugés non crédibles. Les préférences non normatives que nous avons utilisées avaient donné lieu à des comportements jugés crédibles. Nous avons discuté cet aspect en disant qu'il était possible que les participants jugent normal un ordre de préférence que nous avons estimé anormal. Mais au contraire de l'évaluation préliminaire, l'évaluation approfondie a permis de mettre en évidence que des préférences aléatoires ou mal configurées donnaient lieu à des comportements non crédibles. Nous pensons que les résultats non attendus obtenus dans l'évaluation préliminaire ont été influencés par le faible nombre de participants, et le plus petit nombre d'agents utilisés. Dans l'évaluation approfondie 113 participants ont évalué chaque vidéo (contre 11 à 29 pour l'évaluation préliminaire), nous avons augmenté le nombre d'agents dans la file pour que les préférences exhibées soient plus visibles, et nous avons gardé la longueur de la file constante en introduisant de nouveaux agents au long de la simulation. Nous pouvons davantage nous reposer sur les résultats de l'évaluation approfondie, dont le protocole a été amélioré grâce aux conclusions de l'évaluation préliminaire, et confirmer qu'il est nécessaire d'établir des préférences cohérentes sur les ressources afin d'obtenir des comportements crédibles.

Enfin les résultats sur les hypothèses **H4a** et **H5a**, liées respectivement aux l'utilisation de ressources de réputation et d'un niveau de menace dynamique, ne comportent pas d'ambiguïté. Il serait intéressant de les approfondir en utilisant davantage de ressources de type psychologique, et en testant un niveau d'acquisition dynamique fondé sur le même principe que le niveau de menace dynamique. Nous discutons ces aspects dans la partie perspectives de cette thèse.

7.7 Conclusion

L'évaluation approfondie que nous avons présentée dans ce chapitre a permis de confirmer la capacité du modèle COR-E à produire des comportements émotionnels crédibles, et de mettre en évidence l'impact de chaque caractéristique du modèle. Les comportements

d'acquisition et de protection, les préférences, et l'utilisation de ressources de type variés sont nécessaires pour obtenir des comportements jugés crédibles et émotionnels par des observateurs humains. De plus, grâce au test du *niveau de menace* cette évaluation a permis de donner une perspective concrète pour le développement du modèle COR-E, qui est l'introduction d'un état affectif. Cette perspective est cohérente avec la théorie COR de Hobfoll, qui prédit que le *bien-être* ou le *stress* d'un individu dépend des ressources qu'il possède et des menaces qui pèsent sur ces ressources. Nous détaillons plus largement cet aspect dans la partie perspectives, en expliquant comment modéliser l'état de *stress* d'un individu.

Les résultats obtenus lors de ces deux évaluations sont en faveur de la théorie psychologique constructiviste de Barrett (2006), que nous avons présentée au chapitre 2. D'après cette théorie, les catégories d'émotions sont des interprétations d'une situation, et l'état affectif d'un individu est déterminé par des composantes primaires qui sont la valence et l'excitation. Nous pouvons réinterpréter ces propos à la lumière de la théorie COR et des évaluations effectuées dans cette thèse : les préférences sur les ressources de l'environnement, ainsi que la volonté de les acquérir et de les protéger sont à la base des comportements affectifs, et les catégories d'émotions sont des interprétations de la situation. Nous avons observé qu'en fonction des scénarios utilisés, les émotions reconnues ne sont pas les mêmes. En observant un agent en train de fuir un incendie, les participants identifient l'émotion de « peur », et en observant un agent protester dans une file d'attente, ils identifient l'émotion de « colère ». Pourtant, les mécanismes à la base de ces comportements sont les mêmes : la protection d'une ressource menacée. Comme le pense Barrett (2006), l'identification de catégories émotionnelles semble comparable à l'identification des couleurs, c'est-à-dire qu'elle dépend de nos connaissances et de la façon dont nous avons appris à catégoriser les signaux de notre environnement. Il serait possible de vérifier cette hypothèse en implémentant de nombreux scénarios à l'aide de COR-E, et d'identifier quels éléments dans le scénario sont responsables de la reconnaissance d'une catégorie d'émotion particulière. La vérification d'une théorie psychologique n'est pas le cœur de cette thèse, mais les conclusions de ce genre d'étude apporteraient un éclairage sur les processus d'attribution émotionnelle, et leur indépendance ou leur dépendance avec les processus de gestion de comportements.

Chapitre 8

Comparaison des modèles EMA et COR-E

8.1 Introduction

Dans les chapitres 6 et 7, nous avons montré que le modèle COR-E produit des comportements d'agents jugés crédibles et émotionnels par des observateurs humains. Ces évaluations portaient sur les comportements produits par le modèle. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la dynamique du modèle et à ses propriétés. C'est-à-dire : quels sont les mécanismes mis en œuvre par COR-E, et quels sont leurs avantages et leurs limites. Pour cela, nous avons comparé COR-E avec le modèle EMA (Marsella et Gratch, 2009) sur la base d'un même scénario. Le modèle EMA, dont nous avons donné une description détaillée au chapitre 2 section 2.5, utilise des variables d'évaluation propres aux modèles manipulant des émotions, et est reconnu pour avoir apporté des contributions majeures dans le domaine de l'Informatique Affective. Ces deux critères nous ont fait pencher en faveur de ce modèle pour notre travail de comparaison.

EMA modélise des stratégies d'adaptation, c'est-à-dire les actions et les stratégies cognitives qu'un agent peut sélectionner. EMA se focalise sur la façon dont un agent peut agir sur son environnement pour le modifier. Les stratégies des agents dépendent de leurs préférences sur certains états représentées par des utilités, et de leur interprétation de la situation, comme la probabilité d'un état. Par exemple, un agent cherche à éviter un état d'utilité négative ayant une forte probabilité de se produire. EMA comprend également des variables représentant des catégories d'émotions. Ces catégories sont destinées à sélectionner des expressions faciales, et n'interviennent pas dans la sélection des stratégies. EMA présente des particularités communes au modèle COR-E, dans lequel la sélection du comportement est fondée sur les préférences d'un agent, et ne dépend pas de catégories d'émotions. La différence majeure entre ces deux modèles porte sur la façon dont les grands types de comportements (pour COR-E) ou de stratégies (pour EMA) sont sélectionnés. Dans COR-E cette sélection repose sur les préférences d'un agent sur des ressources, et l'état perçu de ces ressources par l'agent. Dans EMA, elle est fondée sur la combinaison de plusieurs variables d'évaluation interprétées par un agent, dont ses préférences sur les états.

Les catégories d'émotions calculées par le modèle EMA servent seulement à sélectionner des expressions faciales. Ce modèle n'est donc pas censé manipuler de catégories pour la sélection de stratégies. Toutefois, son fonctionnement est proche d'un modèle manipulant des émotions. C'est en effet une combinaison de variables d'évaluation à certaines valeurs qui va déclencher la stratégie choisie. Selon Lin *et al.* (2012), ce procédé peut être considéré

comme équivalent à activer une émotion discrète au moyen de variables d'évaluation, et à associer cette émotion à une stratégie. De plus, les auteurs d'EMA utilisent très souvent des catégories d'émotions, telles que la surprise ou la peur, pour qualifier les interprétations d'un agent et expliquer ses réponses (Marsella et Gratch, 2009). Le nom du modèle lui-même est tiré d'un article de Smith et Lazarus (1990) intitulé "Emotion and Adaptation", postulant que les émotions d'un individu l'aident à s'adapter à son environnement. Selon notre point de vue, EMA ne manipule pas de catégories d'émotions, mais son fonctionnement est comparable à un modèle de cette classe. C'est dans cette perspective que nous comparons ce modèle avec COR-E.

Les auteurs du modèle EMA ont illustré le fonctionnement de leur modèle sur un scénario, intitulé « L'oiseau » (*The Bird*), dans lequel un oiseau fait irruption dans une pièce occupée par deux acteurs (Marsella et Gratch, 2009). Nous avons testé le même scénario avec COR-E, afin de pouvoir décrire la dynamique de notre modèle, et de la comparer avec celle du modèle EMA. Cela permet de comparer à la fois les comportements obtenus par les modèles et les propriétés de leur architecture.

Nous présentons d'abord dans ce chapitre une brève description du scénario de l'oiseau section 8.2. Ensuite, nous décrivons la dynamique du modèle EMA sur le scénario de l'oiseau telle qu'elle a été présentée par ses auteurs section 8.3, puis nous décrivons la dynamique du modèle COR-E sur le même scénario implémenté section 8.4. Nous expliquons ensuite les différences observées entre les deux modèles en discutant leurs avantages et leurs limitations section 8.5.

8.2 Un scénario de comparaison : « L'oiseau »

Afin de comparer les processus mis en oeuvre par les modèles EMA et COR-E pour simuler des comportements affectifs, nous avons choisi de configurer un scénario précédemment utilisé par les auteurs du modèle EMA. Ce scénario est inspiré d'une vidéo réelle enregistrée par les auteurs du modèle. Dans cette vidéo, deux acteurs sont en train de répéter un jeu de rôle dans une pièce, quand soudain un oiseau entre dans la pièce en passant par la fenêtre. Un des acteurs recule, et brandit le parapluie qu'il tenait entre ses mains pour se protéger contre l'oiseau. Pendant son vol, l'oiseau se retrouve piégé dans les cheveux de l'autre acteur. L'acteur qui brandissait le parapluie baisse alors ce parapluie, et cherche à aider l'oiseau.

En modélisant cette scène, les auteurs du modèle EMA ont cherché à montrer comment se déroulent au fil du temps les processus émotionnels mis en oeuvre par leur modèle, en considérant uniquement le point de vue de l'agent qui tient le parapluie. Pour cela, ils ont d'abord expliqué comment ils ont choisi de représenter les connaissances de cet agent, et son répertoire d'actions possibles. Puis ils ont déroulé pas à pas les processus déclenchés par le modèle chez cet agent et leur origine, depuis l'arrivée de l'oiseau dans la pièce jusqu'au moment où l'agent choisit d'aider l'oiseau. Pour comparer les processus mis en oeuvre dans EMA et COR-E, nous avons configuré le scénario de l'oiseau avec l'implémentation du modèle COR-E. Comme les auteurs du modèle EMA, notre objectif n'est pas de reproduire de façon exacte les interprétations de l'acteur dans la vidéo réelle, mais de montrer le déroulement des processus affectifs simulés par notre modèle dans ce scénario.

8.3 Modélisation du scénario de l'oiseau avec EMA

Une description détaillée du modèle EMA a été présentée dans le chapitre 2 section 2.5. Dans cette section, nous présentons uniquement les choix de modélisation spécifiques au scénario de l'oiseau. Ces choix sont entièrement détaillés dans l'article d'origine sur le scénario de l'oiseau (Marsella et Gratch, 2009). Les auteurs ont considéré uniquement le point de vue de l'acteur qui tient le parapluie, l'oiseau et le second acteur n'ont pas été modélisés. Dans la description qui suit, les états et les comportements sont notés en lettres majuscules, et les variables d'évaluation et les stratégies sont notées en italiques.

8.3.1 Représentation des connaissances

8.3.1.1 Propositions et préférences

Dans le modèle EMA, les connaissances d'un agent sont représentées grâce à des conjonctions de propositions. Un agent a des préférences sur certaines de ces propositions, indiquées par une valeur numérique pouvant être positive ou négative. Dans le scénario de l'oiseau (Marsella et Gratch, 2009), les valeurs exactes des préférences de l'agent sur les états ne sont pas données, on sait seulement si la valeur d'un état est négative (état indésirable pour l'agent) ou positive (état souhaité par l'agent). Les propositions et les préférences décrites pour ce scénario sont les suivantes :

- SOUND : indique si un son est présent dans l'environnement. Cet état est initialement faux.
- BIRD-APPROACH : indique si l'oiseau est en train de se rapprocher l'agent. Cet état est initialement faux, et à une faible valeur négative pour l'agent lorsqu'il vaut vrai.
- U-HAVE : indique si l'agent tient un parapluie (U). Cet état est vrai à l'initialisation.
- U-RAISED : indique si le parapluie est tenu en position levée par l'agent (cet état vaut alors vrai) ou en position baissée (cet état vaut alors faux). Cet état est faux à l'initialisation.
- INJURED : indique si l'agent est blessé (l'état vaut alors vrai) ou non blessé (l'état vaut faux). Cet état est associé à une valeur négative élevée, ce qui signifie que l'agent préfère ne pas être blessé. Cet état est faux à l'initialisation.
- STRIKING-DISTANCE : indique si l'agent est à la bonne distance de l'oiseau pour pouvoir le frapper avec un parapluie. Cet état vaut faux à l'initialisation.
- BIRD-INJURED : indique si l'oiseau est blessé. Cet état a une valeur négative pour l'agent. Il est faux à l'initialisation.
- ROLEPLAY : indique si l'agent est en train de réaliser une activité de jeu de rôle. C'est le seul but de l'agent, et cet état vaut vrai à l'initialisation.

8.3.1.2 Actions

Les actions décrites pour le scénario sont les suivantes :

- ATTEND-TO-SOUND : cette action représente le fait que l'agent soit attentif à un son de l'environnement. Elle n'a aucun effet. Les auteurs ont scripté cette action afin que le prédicat BIRD-APPROACH prenne la valeur vrai environ 200 millisecondes après que l'action ATTEND-TO-SOUND ait été initiée. ATTEND-TO-SOUND est déclenchée quand l'agent utilise une stratégie de *recherche d'information* sur la proposition SOUND, c'est à dire quand SOUND prend la valeur vrai.
- ATTACK : cette action est réalisée par l'oiseau et elle a pour effet de blesser l'agent. C'est-à-dire que si cette action est déclenchée, INJURED vaudra vrai avec une forte

- probabilité 700 millisecondes plus tard. La précondition de cette action est que l'oiseau soit en train d'approcher l'agent (BIRD-APPROACH doit être vrai).
- RUN-AWAY : cette action représente le comportement de fuite de l'agent face à l'oiseau. Elle n'a aucune précondition. 300 millisecondes après le début de sa réalisation, cette action a pour effet que l'agent se trouve suffisamment loin de l'oiseau afin de pouvoir déployer le parapluie. Cette action correspond à une stratégie d'*évitement*, et elle peut être sélectionnée pour empêcher l'action ATTACK.
 - RAISE : cette action permet de lever le parapluie. Elle a comme précondition que l'agent doit posséder un parapluie (U-HAVE doit être vrai), et son effet est que le parapluie se trouve en position levée avec une forte probabilité, 300 millisecondes après le début de l'action.
 - STRIKE : cette action permet de frapper l'oiseau avec le parapluie. Elle a comme préconditions que le parapluie doit être levé (U-RAISED doit être vrai), et que l'oiseau doit être à la bonne distance pour pouvoir être frappé (STRIKING-DISTANCE doit être vrai). Elle a comme effet d'interrompre l'action d'approche de l'oiseau (si elle est réalisée BIRD-APPROACH vaudra faux) et de baisser le parapluie (U-RAISED vaudra faux).
 - BIRD-CAUGHT : cette action représente la situation où l'oiseau est pris dans les cheveux de l'autre agent. Cette action a pour effet d'interrompre l'action d'approche de l'oiseau (BIRD-APPROACH vaudra faux) et de blesser l'oiseau (BIRD-INJURED vaudra vrai).
 - HELP -BIRD : cette action permet de soigner un oiseau de ses blessures, par exemple après avoir été pris dans les cheveux de l'autre agent.

8.3.2 Évolution du modèle dans le scénario de l'oiseau

Nous décrivons ci-après l'évolution du modèle EMA dans le scénario de l'oiseau, présentée dans l'article original de Marsella et Gratch (2009). Nous détaillons quelles stratégies sont sélectionnées par l'agent pendant le déroulement de ce scénario, et quelles sont les variables d'évaluation qui conduisent à sélectionner ces stratégies. Les règles de sélection des stratégies en fonction de la valeur des variables d'évaluation ne sont pas fournies dans l'article original, il est donc impossible d'en donner une description précise. Nous utilisons dans la description ci-dessous les catégories d'émotions citées par les auteurs du modèle, mais ces catégories n'interviennent pas dans la sélection de stratégies. Toutes les interprétations données dans le déroulement du scénario, c'est-à-dire la perception des actions et les valeurs des variables d'évaluation, correspondent au point de vue de l'agent.

Initialisation du scénario : au début de la simulation, au temps t_0 , l'agent n'est pas blessé (INJURED vaut faux), il tient un parapluie entre les mains en position basse (U-HAVE vaut vrai et U-RAISE vaut faux), et il a un unique but qui est ROLEPLAY.

Déroulement du scénario :

- **temps t_1** : un son apparaît dans l'environnement (SOUND devient vrai). Comme l'agent n'a pas connaissance de l'action ayant causé ce son, il considère le son comme un événement inattendu, ce qui produit de la surprise.
- **temps $t_2 - t_3$** : cet événement inattendu pousse l'agent à utiliser une stratégie de *recherche d'information* à propos de la proposition SOUND. L'action correspondante est ATTEND-TO-SOUND, qui est réalisée au temps t_2 par l'agent. Ce dernier perçoit alors l'oiseau qui est en train de s'approcher de lui, c'est à dire que BIRD-APPROACH devient vrai au temps t_3 . Il s'agit encore d'un événement inattendu,

- c'est à dire que sa cause n'est pas connue, et cela produit de la surprise chez l'agent.
- **temps** $t_4 - t_5$: cette surprise déclenche de nouveau une stratégie de *recherche d'information*. L'agent perçoit alors que l'oiseau menace potentiellement sa santé (la probabilité que l'état INJURED devienne vrai à cause de l'action ATTACK vaut 0,8). Cet état a une forte valeur négative pour l'agent, et il va donc chercher à empêcher l'oiseau de réaliser cette action d'attaque. Il identifie l'action STRIKE (frapper) qui lui permettrait d'empêcher que l'oiseau approche et puisse attaquer. Cependant il se trouve trop près de l'oiseau pour réaliser l'action STRIKE sur ce dernier. En conséquence, la variable d'évaluation *contrôle* de cette action est faible. Ce schéma produit de la peur.
 - **temps** t_5 : l'agent ne peut pas contrôler cet événement indésirable, ce qui le conduit à sélectionner une *stratégie d'évitement*. L'action correspondante est RUN-AWAY (fuir).
 - **temps** $t_6 - t_7$: 300 millisecondes après le début de la réalisation de l'action RUN-AWAY, la proposition STRIKING-DISTANCE devient vraie. C'est-à-dire qu'après avoir fui pendant une courte durée, l'agent se trouve maintenant à une distance adéquate de l'oiseau pour le frapper. Il peut maintenant réaliser une action permettant d'empêcher l'oiseau d'approcher avec une probabilité « raisonnable » (0,56), ce qui implique que l'agent a un meilleur niveau de *contrôle* sur l'action ATTACK. Cela cause de la colère plutôt que de la peur chez l'agent. Au temps t_7 , l'agent établit une stratégie de *planification* visant à supprimer la menace représentée par l'approche de l'oiseau. L'action STRIKE est ajoutée dans le cadre d'interprétation causale de l'agent, accompagnée des préconditions et des effets de cette action. L'interprétation causale de l'agent à ce moment est représentée sur la figure 8.1. L'action RAISE est également ajoutée, car elle permet de lever le parapluie et d'obtenir l'état U-RAISED, qui est une précondition du comportement STRIKE.
 - **temps** $t_8 - t_9$: au temps t_8 , l'agent a commencé la réalisation de l'action RAISE qui est la première étape faisant partie de son plan d'attaque de l'oiseau. Au temps t_9 , l'agent observe que l'oiseau se retrouve piégé (l'action BIRD-CAUGHT est réalisée). L'action BIRD-CAUGHT est ajoutée à l'interprétation causale, avec deux effets : l'oiseau n'est plus en approche (BIRD-APPROACH est faux avec une probabilité de 1) et l'animal pourrait être blessé. Comme l'oiseau n'est plus en approche, la probabilité qu'il attaque devient nulle ($P_E(ATTACK) = 0$, avec P_E représentant la probabilité qu'une action se réalise), et donc la probabilité que l'agent soit blessé par l'oiseau devient nulle. L'agent perçoit maintenant que l'état BIRD-INJURED, ayant une utilité négative, vaut vrai. Il a également la connaissance de l'action HELP-BIRD, qui permet de contrôler l'état BIRD-INJURED en le faisant passer de vrai à faux (autrement dit, il peut soigner l'oiseau). Ce schéma de variables d'évaluation conduit l'agent à s'engager dans une stratégie de *résolution de problème*, qui consiste ici à réaliser l'action HELP-BIRD. Cela produit l'émotion de colère chez l'agent (les auteurs précisent que cette émotion est contre-intuitive et la discutent plus tard dans l'article).

Les auteurs du modèle ne précisent pas si ce scénario a été effectivement simulé ou s'il a été uniquement modélisé.

8.4 Modélisation du scénario de l'oiseau avec COR-E

Dans l'implémentation du scénario de l'oiseau avec le modèle COR-E, nous avons utilisé 3 agents, représentant les deux acteurs et l'oiseau. Comme l'ont fait les auteurs du modèle

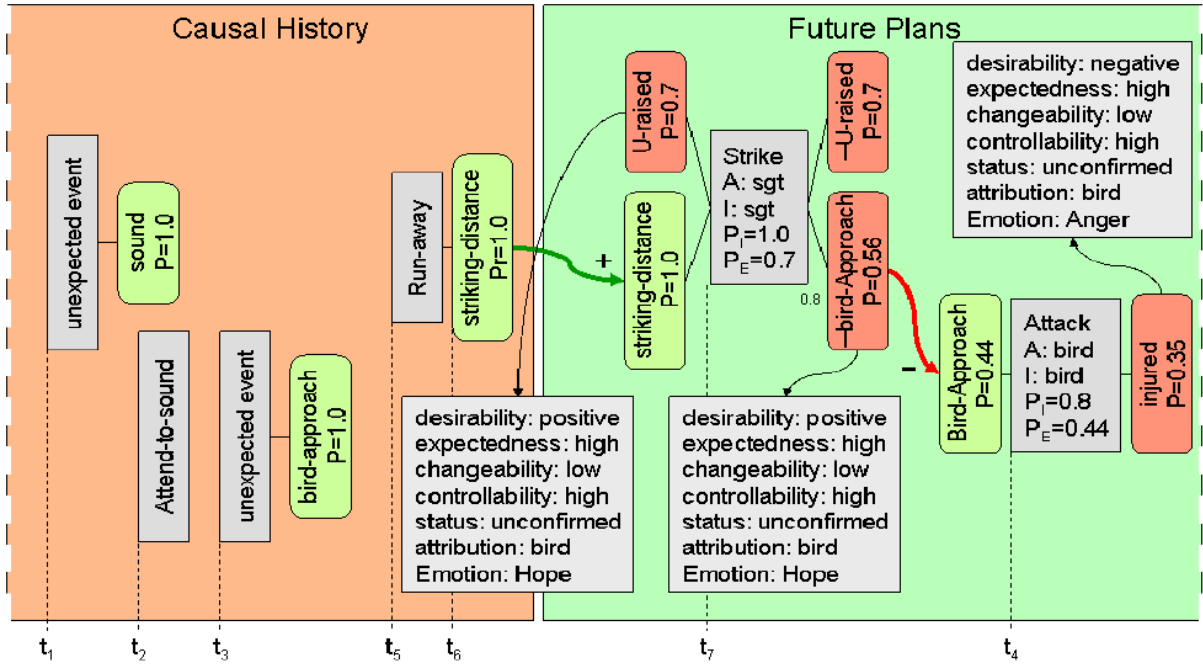


FIGURE 8.1 – Modèle EMA. Interprétation causale au moment où l'agent commence à planifier une attaque sur l'oiseau tiré du travail de S. Marsella et J. Gratch (Marsella et Gratch, 2009). P_E : probabilité qu'une action soit réalisée ; P_I : probabilité que l'agent ait l'intention de réaliser l'action ; P : probabilité qu'un état devienne vrai.

EMA (Marsella et Gratch, 2009), nous considérons uniquement le point de vue de l'agent qui tient le parapluie, dénommé *sgt*.

8.4.1 Représentation des agents et de l'environnement

8.4.1.1 Agents, Ressources et Préférences

Le scénario comporte 3 agents :

- $sgt \in \mathcal{A}$: cet agent représente l'acteur tenant le parapluie ;
- $ois \in \mathcal{A}$: cet agent représente l'oiseau ;
- $Liza \in \mathcal{A}$: cet agent représente le second acteur (la dénomination du second acteur n'a pas été donnée par les auteurs du modèle EMA, nous lui avons attribué un nom au hasard).

Nous définissons les instances de ressources suivantes :

- $sante_{sgt}$, $sante_{ois}$, et $sante_{Liza} \in \mathcal{R}$: ces ressources représentent respectivement la santé des agents *sgt*, *ois* et *Liza*. Elles sont de type *Sante*, formellement $type(sante_{sgt}) = type(sante_{ois}) = type(sante_{Liza}) = Sante$. De plus $personnel_{Sante} = vrai$, c'est-à-dire que le type *Sante* est personnel¹.
- $mobilité_{sgt}$, $mobilité_{ois}$ et $mobilité_{Liza} \in \mathcal{R}$: ces ressources représentent respectivement la capacité à se déplacer des agents *sgt*, *ois* et *Liza*. Nous définissons

1. Lorsqu'un type est personnel, cela signifie qu'une ressource de ce type ne peut pas être acquise par un autre agent que celui qui la possède initialement. De plus, si une ressource personnelle acquise par un agent *i* est supprimée de l'ensemble des ressources acquises de *i*, cette ressource est automatiquement ajoutée dans l'ensemble des ressources désirées de *i* (cela été expliqué section 5.3.1.4)

$r \in \mathcal{R}$	$v(r, sgt)$
$sante_{sgt}$	8
$sante_{Liza}$	7
$sante_{ois}$	6
$mobilité_{sgt}$	5
$mobilité_{Liza}$	4
$mobilité_{ois}$	3
$salaire_1$	2
$parapluie_1$	1
$carte_1$	0

TABLE 8.1 – Valeur de chaque ressource $r \in \mathcal{R}$ pour l'agent sgt

$type(mobilité_{sgt}) = type(mobilité_{ois}) = type(mobilité_{Liza}) = Mobilite$, et $personnel_{Mobilite} = vrai$.

- $salaire_1 \in \mathcal{R}$: cette ressource représente un salaire qu'un agent peut obtenir en réalisant un jeu de rôle. Nous définissons $type(salaire_1) = Salaire$.
- $parapluie_1 \in \mathcal{R}$: cette ressource représente un parapluie. Nous définissons $type(parapluie_1) = Parapluie$.
- $carte_1 \in \mathcal{R}$: cette ressource représente une connaissance de la carte de l'environnement. Nous définissons $type(carte_1) = Carte$. Cette ressource est en relation avec le comportement d'exploration expliqué ci-après.

Perception des ressources : les ressources de type *Sante* et *Mobilite* acquises ou désirées par un agent $i \in \mathcal{A}$ sont perçues par tout agent $j \in \mathcal{A}$. Cela représente le fait qu'un agent peut savoir si les autres agents sont blessés physiquement ou s'ils ne peuvent plus se déplacer. Formellement, $\forall i, j \in \mathcal{A}$, si $\exists r \in RA_i \wedge type(r) \in \{Sante, Mobilite\}$, alors $r \in P_j(RA_i)$, et $\forall i, j \in \mathcal{A}$, si $\exists r \in RD_i \wedge type(r) \in \{Sante, Mobilite\}$, alors $r \in P_j(RD_i)$.

Préférences sur les ressources : les préférences de l'agent sgt sont définies de la façon suivante : $sante_{sgt} \succ_{sgt}^R sante_{Liza} \succ_{sgt}^R sante_{ois} \succ_{sgt}^R mobilité_{sgt} \succ_{sgt}^R mobilité_{Liza} \succ_{sgt}^R mobilité_{ois} \succ_{sgt}^R salaire_1 \succ_{sgt}^R parapluie_1$.

La valeur des ressources pour un agent $i \in \mathcal{A}$ est calculée automatiquement par le modèle d'après la liste de préférences de i (ce calcul est détaillé section 5.3.1.3). Les valeurs attribuées aux ressources du point de vue de l'agent sgt sont montrées dans le tableau 8.1.

8.4.2 Représentation des comportements

Les comportements que nous avons configuré avec l'implémentation du modèle COR-E pour ce scénario sont :

- $jouer(i)$: correspond au comportement d'un agent $i \in \mathcal{A}$ en train de réaliser un jeu de rôle, et lui permet d'obtenir une ressource $r \in \mathcal{R}$ de type *Salaire*. Il s'agit d'un comportement d'acquisition. Formellement, si $r \in RD_i \wedge type(r) = Salaire$, alors $jouer(i, r) \in C_r^+$, l'ensemble des comportements d'acquisition réalisables pour obtenir r . Le gain de la ressource r est appliqué à la fin de la réalisation du comportement (ce dernier a une durée de 50 pas de temps).
- $explorer(i)$: correspond au comportement d'un agent $i \in \mathcal{A}$ en train d'explorer

son environnement, et lui permet d'obtenir une ressource $r \in \mathcal{R}$ de type *Carte*, représentant la connaissance de son environnement. Il s'agit d'un comportement d'acquisition. Formellement, si $r \in RD_i \wedge type(r) = Carte$, alors $explorer(i) \in C_r^+$. Le gain de la ressource r est appliqué à la fin de la réalisation du comportement (ce dernier a une durée de 50 pas de temps). Ce comportement a pour effet de menacer la ressource santé de l'agent *sgt*, $sante_{sgt}$. Cet effet est appliqué au début du comportement. **Préconditions** : i doit pouvoir se déplacer, c'est-à-dire posséder une ressource $r' \in \mathcal{R}$ de type *Mobilite*. Formellement, si $\exists r' \in RA_i$ avec $type(r') = Mobilite$, alors $Poss(explorer(i), t) = vrai$, sinon $Poss(explorer(i), t) = faux$ ².

- $frapper(i, j)$: correspond au comportement d'un agent $i \in \mathcal{A}$ en train de frapper un agent $j \neq i \in \mathcal{A}$ avec un parapluie, et qui permet à i de protéger une ressource $r \in \mathcal{R}$. Cette ressource r peut être de type *Sante*. Il s'agit d'un comportement de protection de type confrontation, donc de priorité A. Formellement, si $r \in RM_i \wedge type(r) = Sante$, alors $frapper(i, j) \in C_r^o$, l'ensemble des comportements de protection réalisables pour protéger r . L'effet de début de ce comportement est de menacer la ressource de santé appartenant à l'agent j , $sante_j$, et son effet de fin est de la lui faire perdre. **Préconditions** : nous définissons un ensemble $resPortees_i \subset \mathcal{R}$ représentant les ressources portées par un agent i . Afin de pouvoir frapper un autre agent, i doit tenir un parapluie. C'est-à-dire que si $\exists r \in resPortees_i$ avec $type(r) = Parapluie$, alors $Poss(frapper(i, j), t) = vrai$, sinon $Poss(frapper(i, j), t) = faux$. **Déroulement du comportement** : au premier pas d'exécution de ce comportement, i lève le parapluie si ce dernier est en position basse. Si i ne se trouve pas à bonne distance de j pour pouvoir attaquer, i avance ou recule en fonction de sa position (une distance adéquate est définie pour ce comportement). Ce déplacement est une action faisant partie du comportement $frapper(i, j)$.
- $fuir(i)$: correspond au comportement d'un agent i prenant la fuite, et qui lui permet de protéger une ressource $r \in \mathcal{R}$. Cette ressource r peut être de type *Sante*. Il s'agit d'un comportement de protection de type évitement, donc de priorité B. Formellement si $r \in RM_i \wedge type(r) = Sante$, alors $fuir(i) \in C_r^o$. La ressource r est protégée pour i lorsque ce comportement s'est terminé avec succès (effet terminal).
- $aider(i, j)$: correspond au comportement d'un agent $i \in \mathcal{A}$ aidant un agent $j \neq i \in \mathcal{A}$ lorsque ce dernier est coincé, et qui permet à j d'obtenir une ressource $r \in \mathcal{R}$ de type *Mobilite*. Il s'agit d'un comportement d'acquisition. Formellement si $r \in RD_j \wedge type(r) = Mobilite$, alors $aider(i, j) \in C_r^+$. Le gain de la ressource r pour l'agent j est un effet terminal de ce comportement. Afin de représenter le fait qu'un agent j soit coincé, nous avons défini un état de l'environnement $coince(j)$, qui devient vrai lorsqu'un agent $j \in \mathcal{A}$ est coincé par un élément de l'environnement. Dans notre simulation, $coince_{ois}$ devient vrai lorsque l'agent *ois* s'approche des cheveux de l'agent *Liza*. Cela signifie que l'agent *ois* est coincé dans les cheveux de Liza. Quand $coince(ois)$ devient vrai, la ressource $mobilité_{ois}$ est retirée de RA_{ois} , c'est-à-dire que *ois* ne peut plus bouger. En conséquence, comme le type *Mobilite* est personnel, la ressource $mobilité_{ois}$ est ajoutée à RD_{ois} . **Préconditions** : l'agent j doit être coincé, c'est-à-dire $coince_j = vrai$.

Pour réaliser un comportement nécessitant un déplacement, tout agent $i \in \mathcal{A}$ doit posséder une ressource de type « *Mobilité* ». Dans ce scénario, seule la ressource de mo-

2. Nous rappelons que le prédicat $Poss(c, t)$ vaut vrai si les préconditions du comportement c sont vérifiées au temps t , et faux sinon. Ce prédicat doit être vrai pour que l'agent puisse réaliser son comportement (voir section 5.3.2.1).

bilité de l'oiseau a une importance dans le déroulement des événements. Nous avons donc précisé la nécessité de posséder une ressource de type « Mobilité » en particulier pour le comportement $explorer(i)$, qui ne sera réalisé que par l'oiseau.

8.4.3 Évolution du modèle dans le scénario de l'oiseau

Initialisation du scénario Les ensembles de ressources de l'agent sgt sont initialisées de la façon suivante :

$$RD_{sgt} = \{salaire_1\}, RA_{sgt} = \{mobilité_{sgt}, sante_{sgt}\}, RM_{sgt}(0) = \{\emptyset\}$$

Cela signifie que l'agent souhaite obtenir un salaire, qu'il est en bonne santé et capable de se déplacer, et qu'aucune de ses ressources n'est menacée. De plus nous définissons $resPortees_{sgt} = \{parapluie_1\}$, ce qui signifie que l'agent sgt porte un parapluie.

Déroulement du scénario

Dans la description ci-dessous, un pas p de simulation correspond à un pas de temps dans notre modèle. A chaque pas de temps tous les agents de l'ensemble \mathcal{A} s'exécutent chacun leur tour. L'ordre dans lequel les agents sont ordonnés dans un même pas d'exécution est aléatoire. Si un comportement est sélectionné par un agent, sa réalisation commence immédiatement sans attendre la fin du pas d'exécution. Cela signifie qu'un agent i ordonné après un agent j dans un même pas d'exécution agira en fonction du comportement éventuellement sélectionné par i et de ses effets. L'implémentation du séquençage des agents est expliquée en détail dans le chapitre 10, section 10.2.2.3.

- **pas p_1** : l'agent sgt désire obtenir la ressource $salaire_1$, et il ne perçoit aucune ressource menacée. Ce dernier examine les comportements d'acquisition possibles pour obtenir la ressource $salaire_1$. Il n'y a qu'un comportement possible, qui est $jouer(sgt)$. Ce comportement a pour seul effet de faire obtenir $salaire_1$ à l'agent sgt , sa valeur pour sgt est donc : $\mathcal{V}(jouer(sgt), sgt) = v(salaire_1, sgt) = 2$. Comme ce comportement est de valeur positive non nulle et qu'il ne comporte aucune précondition, sgt le sélectionne et commence sa réalisation. Au même pas de temps, l'oiseau commence la réalisation du comportement $explore(ois)$ pour obtenir une connaissance de la carte de son environnement, c'est-à-dire obtenir la ressource $carte_1$. Ce comportement d'exploration a été configuré de sorte à ce que l'agent ois se déplace en direction de l'agent sgt . L'agent sgt ne perçoit pas encore le comportement d'exploration de l'oiseau, car ce dernier se situe trop loin³.
- **pas p_1 - p_{11}** : l'agent sgt poursuit la réalisation de $jouer(sgt)$, et l'agent ois poursuit la réalisation de $explore(ois)$.
- **pas p_{12}** : l'agent ois est maintenant suffisamment proche de l'agent sgt pour que son comportement d'exploration soit perçu par sgt . L'agent sgt perçoit donc que sa ressource de santé est menacée, c'est-à-dire $P_{sgt}(RM_{sgt}) = \{sante_{sgt}\}$. Les comportements de protection permettant d'éliminer une menace sont prioritaires (priorité A) par rapport aux comportements de protection de type évitement (priorité B) et aux comportements d'acquisition (priorité C). L'agent sgt examine donc les comportements possibles de priorité A afin de protéger cette ressource. Il trouve le compor-

3. Comme nous l'avons évoqué section 5.3.1.5, un comportement ne peut être perçu au-delà de la distance de perception qui lui est associée.

tement possible $frapper(sgt, ois)$. Ce comportement a pour effet de protéger la santé de sgt mais de menacer celle de l'oiseau. Sa valeur est donc : $\mathcal{V}(frapper(sgt, ois), sgt) = v(sante_{sgt}, sgt) - v(sante_{ois}, sgt) = 8 - 6 = 2$. Ce comportement a une valeur positive non nulle, et ses préconditions sont remplies : l'agent sgt porte un parapluie. L'agent sgt démarre donc la réalisation du comportement $frapper(sgt, ois)$.

- **pas** p_{13} : l'agent ois se trouve maintenant très proche des cheveux de l'agent $Liza$. En conséquence, l'état $coince(ois)$ devient vrai, ce qui signifie que l'oiseau se retrouve coincé dans les cheveux de Liza. Cela entraîne la perte de la ressource $mobilité_{ois}$ pour l'oiseau, et cette ressource est ajoutée à DR_{ois} (en raison de la valeur de l'attribut $personnel_{Mobilité}$ qui vaut vrai). Les préconditions pour la réalisation du comportement $explorer(i)$ ne sont plus satisfaites, ce comportement est donc interrompu, ce qui annule son effet de menace sur $sante_{sgt}$ (les effets de l'interruption d'un comportement sont détaillés section 5.3.1.5).
- **pas** p_{14} : l'oiseau ayant interrompu son comportement d'exploration, la ressource $sante_{sgt}$ n'est plus menacée. En conséquence, $frapper(sgt, ois)$ est interrompu. L'agent sgt désire toujours obtenir la ressource $salairé_1$, ce qui rend possible la sélection du comportement $jouer(sgt)$, pouvant être repris par sgt après son interruption. La valeur de ce comportement reste la même que précédemment : $\mathcal{V}(jouer(sgt), sgt) = v(salaire_1, sgt) = 2$. Dans le même temps, sgt perçoit que la ressource $mobilité_{ois}$ est désirée par l'agent ois . Comme cette ressource a une valeur positive du point de vue de l'agent sgt ($v(mobilité_{ois}, sgt) = 3$), il peut réaliser un comportement d'acquisition pour aider l'oiseau à obtenir cette ressource. Il examine donc les comportements d'acquisition possibles vis à vis de cette ressource, et trouve le comportement $aider(sgt, ois)$. Ce comportement a pour effet de faire obtenir la ressource $mobilité_{ois}$ à l'agent oiseau, sa valeur est donc : $\mathcal{V}(aider(sgt, ois), sgt) = v(mobilité_{ois}, sgt) = 3$. L'agent sgt a le choix entre deux comportements d'acquisition, c'est-à-dire deux comportements de priorité C. En conséquence il sélectionne celui qui a la valeur maximum, qui est $aider(sgt, ois)$, et commence la réalisation de ce comportement.

8.5 Comparaisons des deux modèles

La comparaison entre les modèles EMA et COR-E peut être établie selon deux perspectives : les comportements produits par les deux modèles sur le scénario de l'oiseau, et les caractéristiques des modèles à partir desquelles ces comportements ont été obtenus. Dans cette section nous comparons à la fois les comportements observés et les caractéristiques des modèles.

8.5.1 Comportements obtenus

Les comportements produits par EMA et COR-E sur le scénario de l'oiseau sont comparables du point de vue d'un observateur, mais on peut remarquer deux différences dans la sélection des comportements, dues à la représentation du comportement d'attaque.

Tout d'abord dans la modélisation adoptée pour COR-E, nous avons fusionné les comportements « lever le parapluie » (RAISE) et « frapper » (STRIKE) en un seul comportement d'attaque ($frapper(i, j)$), afin de faciliter l'implémentation. Toutefois nous ne considérons pas cette simplification comme un point de comparaison entre les deux mo-

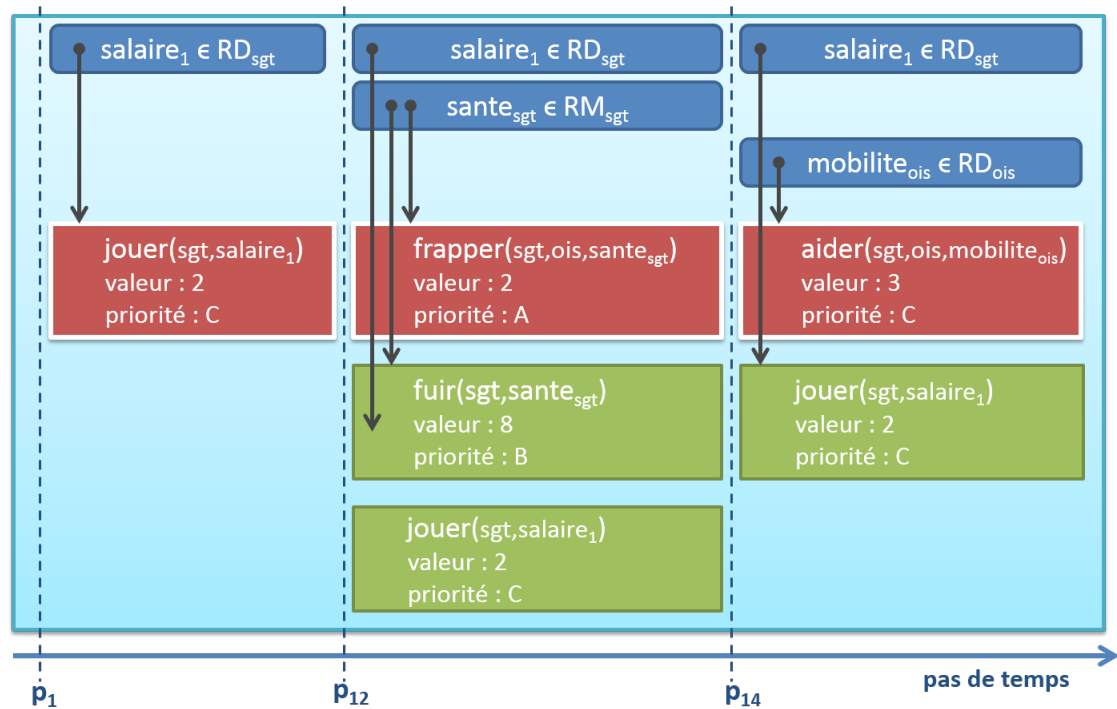


FIGURE 8.2 – Comportements possibles de l’agent *sgt* pendant les pas de temps 11 à 14. Une ressource menacée ou désirée (rectangle arrondi bleu) est à l’origine de chaque comportement possible (rectangle non arrondi vert à bords foncés ou rouge à bords blancs). Le comportement sélectionné par *sgt* est indiqué par le rectangle rouge.

dèles, car il s’agit d’un choix de représentation permettant de ne pas décomposer les comportements en plus petites unités d’actions. Les comportements observés restent les mêmes.

Ensuite, il existe une différence sur la sélection du comportement de fuite. Dans EMA, l’agent *sgt* fuit avant de réaliser son comportement d’attaque sur l’oiseau, tandis que dans COR-E l’agent attaque directement l’oiseau sans réaliser de comportement fuite. Cela est dû à une représentation différente des préconditions du comportement d’attaque dans les deux modèles. Dans EMA, la précondition du comportement d’attaque est que l’agent doit se trouver à une distance suffisante de l’oiseau pour pouvoir le frapper (la variable STRIKING-DISTANCE doit être vraie). Comme ces préconditions ne sont pas remplies immédiatement, l’agent estime ne pas avoir le contrôle de la situation (variable de *contrôle* faible) et choisit une stratégie d’*évitement*, concrétisée par l’action de fuite (RUN-AWAY). Lorsque l’agent s’est déplacé à cause de son comportement de fuite, il se trouve à distance suffisante de l’oiseau (STRIKING-DISTANCE est vrai) et attaque. Dans COR-E, le comportement d’attaque a comme unique précondition que l’agent doit posséder un parapluie entre ses mains. Lorsqu’un agent a décidé d’attaquer, il se place à la bonne distance de l’oiseau. Comme l’agent *sgt* possède ce parapluie dès le début de la simulation, il peut immédiatement réaliser le comportement d’attaque lorsque l’oiseau le menace. Nous avons choisi une modélisation différente des préconditions afin de représenter le fait qu’un agent peut sélectionner un comportement d’attaque même s’il se trouve très près de ce qu’il souhaite attaquer. Il lui suffit alors de reculer. Cette différence concernant la représentation des préconditions ne constitue pas un point de comparaison entre les deux modèles, car elle dépend d’un choix de modélisation et non des propriétés de chaque modèle. Nous

aurions également pu faire en sorte que l'agent ne puisse pas attaquer à moins d'être à une certaine distance de l'oiseau en configurant les préconditions du comportement d'attaque implémenté avec COR-E. Dans ce cas, l'agent aurait également fui avant d'attaquer.

Les comportements produits par les modèles EMA et COR-E sont identiques du point de vue d'un observateur humain. Des différences apparaissent dans la sélection du comportement, mais ces différences sont liées à des choix d'implémentation ou de représentation, et non à la nature même de chaque modèle. Nous pouvons conclure que les comportements obtenus par les deux modèles sont les mêmes, et qu'ils sont cohérents avec la description de la vidéo originale.

8.5.2 Comparaison des propriétés des modèles

Les différences entre les modèles COR-E et EMA portent sur la nature des variables utilisées et le processus de sélection d'un comportement. Le modèle EMA manipule un certain nombre de variables d'évaluation représentées par une valeur numérique ou symbolique, qui déterminent le comportement choisi. Le modèle COR-E manipule la valeur d'un comportement, calculée grâce aux préférences d'un agent sur les ressources et aux effets du comportement, et attribue des priorités à différents type de comportements. Les comportements choisis sont déterminés par la valeur du comportement et par des règles sur les priorités. Nous comparons ci-après les variables et les règles de sélection utilisées par les deux modèles sur la base du scénario de l'oiseau, afin d'expliquer leurs avantages et leurs limites.

Les modèles EMA et COR-E utilisent tous les deux les notions de *valence* et d'*intensité*. La *valence* est représentée par le signe positif ou négatif qui est associé à un événement, et l'*intensité* est représentée par l'importance d'un comportement, c'est-à-dire sa valeur absolue. D'après Russell (2003) et Barrett et Bliss-Moreau (2009), ces deux dimensions forment la base des phénomènes affectifs. De plus, les deux modèles permettent d'interpréter l'*attribution causale* d'une action, c'est-à-dire l'agent responsable du déclenchement de l'action, ainsi que les *implications*, ou effets, d'une action, et la *perspective* d'un agent, qui est le point de vue depuis lequel un événement est envisagé. Ces variables sont présentes dans le modèle OCC (Ortony *et al.*, 1988), et utilisées par une majorité de modèles affectifs. En revanche, les variables représentant le *contrôle* d'un événement et les variables de *probabilité* sont utilisées par le modèle EMA, mais pas par le modèle COR-E. Par ailleurs, ces deux modèles permettant de représenter les préférences d'un agent, mais elles sont gérées différemment. Le modèle EMA gère des préférences sur des états, et le modèle COR-E gère des préférences sur des ressources. Nous allons voir quelles sont les implications de ces différences, en prenant pour exemple le scénario de l'oiseau.

Le modèle EMA utilise une variable de *contrôle*, indiquant le contrôle qu'un agent peut avoir sur les conséquences d'une action qu'il réalise. Dans le scénario de l'oiseau, lorsque l'agent estime que la variable de contrôle pour l'action STRIKE est faible, cela signifie qu'il a des incertitudes sur l'effet que ce comportement va produire. Les auteurs du modèle actualisent cette variable de contrôle grâce aux préconditions du comportement : lorsque les préconditions du comportement STRIKE sont remplies, la variable de contrôle a une valeur élevée, et lorsqu'elles ne sont pas remplies, elle a une valeur faible. Les auteurs ne donnent pas la règle de calcul permettant de déterminer cette valeur de contrôle. Lorsqu'un agent a un contrôle faible de la situation, il choisit une stratégie d'*évitement*. Dans le modèle COR-E, il n'y a pas de variable de contrôle. Un agent peut réaliser un comportement si ses préconditions sont vérifiées. Face à une menace, il choisit un comportement de protection de type confrontation s'il en existe un (de valeur positive et avec préconditions vérifiées), sinon il choisit un comportement de protection de type fuite. Le

contrôle dans le modèle COR-E est considéré comme l'interprétation d'une situation par un observateur humain : un observateur peut estimer qu'un agent a le « contrôle » s'il peut réaliser une attaque, c'est-à-dire éliminer durablement la menace. Dans le modèle EMA, il est nécessaire de calculer la valeur de la variable de contrôle, et de déterminer son effet sur le déclenchement de la stratégie d'évitement. Dans le modèle COR-E, il n'existe pas de variable de contrôle devant être configurée, et la règle de sélection utilisée est plus directe. Cela facilite l'utilisation du modèle et permet de mieux en maîtriser les effets. En contrepartie, les règles de sélection de COR-E sont plus rigides, et donner systématiquement la priorité à la confrontation par rapport à la fuite pourrait ne pas toujours être approprié (nous avons discuté cet aspect section 5.3.2.3).

Le modèle EMA oblige à fixer des valeurs de *probabilité* sur les états obtenus à la suite d'une action. Plus précisément, pour chaque action pouvant être réalisée par un agent, il est nécessaire de fixer P_I , la probabilité que l'agent ait l'intention de réaliser l'action, et P_E , la probabilité que l'action soit effectivement réalisée. Ces valeurs déterminent la probabilité des états affectés par l'action, mais ce calcul n'est pas précisé par les auteurs. Les arbres de probabilités sont couramment utilisés en théorie de la décision, et servent à prévoir l'espérance de gain associée à la réalisation d'une séquence d'actions. Pour cela, la probabilité d'obtenir un gain donné à partir d'un état donné grâce à une action particulière doit être connue, soit grâce à des observations antérieures (il a été observé que lorsqu'on mine dans une région r , il existe une probabilité p de tomber sur un filon de diamant), soit théoriquement (si on pioche dans une urne contenant n tickets gagnants et m tickets perdants, la probabilité de gain sur cette action de pioche est de $n/(n+m)$). Dans le scénario de l'oiseau, nous avons représenté des actions dont la probabilité ne peut pas être connue ni statistiquement (il n'y a pas d'apprentissage), ni théoriquement. Avec le modèle EMA, les auteurs ont du fixer arbitrairement ces probabilités. Par exemple, la probabilité que le parapluie soit en position levée si l'agent choisit de réaliser l'action *RAISE* est de 0,9, et la probabilité qu'un oiseau ait l'intention d'attaquer (P_I) et que cette action réussisse (P_E) sont respectivement de 0,8 et 0,44. Ces valeurs peuvent être difficiles à déterminer pour l'utilisateur d'un modèle (c'est-à-dire le concepteur de la simulation), et elles nécessitent certainement un travail de paramétrage qui demande d'exécuter plusieurs fois le scénario afin de fixer les valeurs appropriées. Ce travail de paramétrage est à recommencer si le scénario est modifié. De plus sur une grande séquence d'actions dépendantes, il peut être très difficile d'anticiper les effets des probabilités fixées. Cet aspect prend encore plus d'importance dans un système multi-agents, où les interactions entre agents sont nombreuses, et où il est souvent impossible d'obtenir tous les états possibles du système pour vérifier si les valeurs sont bien configurées. Le modèle COR-E n'utilise aucune valeur de probabilité, ce qui permet d'éviter ces difficultés de paramétrage, et de maîtriser plus facilement les effets d'une configuration. En contrepartie, il n'est pas possible d'introduire de la variabilité sur les comportements produits grâce aux probabilités, ce qui rend le modèle plus déterministe. Par ailleurs, il n'est pas possible de coupler le modèle COR-E avec un processus d'apprentissage capable de calculer des probabilités, alors que cela serait possible pour le modèle EMA.

Les modèles EMA et COR-E permettent la représentation des préférences d'un agent, mais ces préférences sont gérées différemment. Dans le modèle EMA chaque agent a une préférence pour des états de l'environnement, qui se traduit par une valeur bornée d'utilité positive ou négative associée à l'état. Un état d'utilité négative est indésirable, et un état de valeur positive est désirable. L'agent cherche donc à réaliser des actions permettant d'atteindre et d'éviter respectivement les états désirables ou indésirables. Un postulat important de la théorie COR, dont le modèle COR-E s'inspire, est que pour déterminer la

valeur d'un événement, il est nécessaire de le décomposer en considérant quelles ressources sont gagnées ou perdues lors de cet événement. Le modèle COR-E calcule donc la valeur d'un comportement pour un agent en fonction des ressources gagnées ou perdues, et de la valeur que l'agent accorde à ces ressources, c'est-à-dire ses préférences. Dans le modèle EMA, il faut déterminer les états atteints suite à l'exécution des actions, et l'utilité de ces états pour l'agent. Ces états dans le modèle EMA pourraient éventuellement représenter des ressources perdues ou gagnées, mais comme les agents de ce modèle n'ont pas de préférences sur les ressources, la valeur fixée par l'utilisateur du modèle à chaque état pourrait présenter des incohérences. Par exemple en ce qui concerne le modèle COR-E, si dans le scénario de l'oiseau un comportement $c_1 \in \mathcal{C}$ fait perdre une ressource de santé $sante_i \in \mathcal{R}$ à un agent $i \in \mathcal{A}$, et qu'un comportement $c_2 \in \mathcal{C}$ fait gagner la ressource de santé $sante_i$ à i , la valeur des comportements c_1 et c_2 du point de vue de i dépendra toujours de la préférence de l'agent i sur sa ressource $sante_i$, encodée explicitement dans le modèle. Pour le modèle EMA, il serait nécessaire de déterminer deux états BLESSE et NON-BLESSE représentant respectivement l'agent i blessé et non blessé, et l'utilisateur du modèle devrait lui-même déterminer la valeur de ces états du point de vue de i . Cela ne garantit pas que la valeur utile de ces états soit cohérente avec l'importance que l'agent accorde à sa santé, puisque cette information n'est pas explicitement encodée. Cet exemple est relativement simple, mais cette cohérence peut être rapidement perdue si une action cause plusieurs états, et qu'il existe de nombreux états associés à plusieurs actions, car il est impossible pour un utilisateur humain d'ajuster parfaitement la valeur d'un état par rapport aux autres.

D'après ces éléments d'analyse, nous pouvons mettre en évidence les avantages et les limites de chaque modèle. Le modèle COR-E semble bien approprié dans une simulation multi-agents ne nécessitant pas de processus d'apprentissage et pas de simulation d'expressions faciales. Sa configuration semble plus intuitive que celle du modèle EMA, et les effets de cette configuration peuvent être mieux anticipés. Le modèle EMA est en revanche mieux approprié pour une simulation dans laquelle on souhaite utiliser des probabilités, afin d'introduire de l'apprentissage ou une sélection non déterministe. Le modèle EMA propose aussi des règles permettant de déterminer une catégorie d'émotion associée à un agent, ce qui rend possible la simulation d'expressions faciales correspondant à des émotions.

8.6 Conclusion

Nous avons montré que le modèle COR-E peut produire des comportements réalistes comme le modèle EMA sur le scénario de l'oiseau. Nous avons également proposé une analyse comparative du fonctionnement des deux modèles, mettant en évidence les différences sur les variables utilisées et la sélection du comportement. Le modèle EMA utilise des variables d'évaluation telles que la *probabilité* d'un événement et le *contrôle* d'un agent sur sa situation, qui déterminent le comportement choisi par l'agent. La configuration de ces variables et la maîtrise de leurs effets sur la sélection du comportement peut s'avérer difficile. Le modèle COR-E réduit l'espace et la nature des variables utilisées, en manipulant des variables comme les préférences des agents sur les ressources, et les effets des comportements sur les ressources. Il n'existe pas de couche intermédiaire entre ces éléments de bas niveau et le processus de sélection du comportement. Ce type d'architecture peut être plus facilement maîtrisé par l'utilisateur du modèle, et permet de mieux mesurer les effets de la configuration des variables sur les comportements sélectionnés par les agents.

Le modèle COR-E comporte en revanche des limitations concernant les capacités com-

municatives des agents. Les modèles manipulant davantage de variables d'évaluation sont capables de gérer les expressions faciales des agents, ce que COR-E ne permet pas de faire actuellement. Les auteurs du modèle EMA ont géré de façon séparée la sélection de stratégies et le calcul de catégories d'émotions permettant éventuellement la sélection d'expressions faciales.

Les conclusions de cette évaluation comparative peuvent s'étendre aux modèles manipulant le même type de variables d'évaluation que le modèle EMA. Toutefois, une comparaison sur un seul scénario mettant en scène des comportements simples reste limitée. Afin de confirmer ces résultats, il serait nécessaire de comparer les deux modèles sur un autre scénario, comme celui proposé par Gratch et Marsella (2004). Dans ce scénario, un docteur doit choisir entre administrer ou non de la morphine à un patient jeune atteint d'un cancer. Cette action a pour effet de soulager les douleurs du patient, mais risque aussi d'accélérer sa mort. Les auteurs montrent comment le modèle EMA permet de modéliser ce scénario, et quelle dynamique conduit le docteur à effectuer son choix, notamment via des stratégies cognitives comme le *déni*. Dans le modèle EMA, la stratégie de déni a pour effet d'abaisser la probabilité qu'un événement négatif se produise. Le scénario du docteur ne correspond pas directement aux applications du projet Terra Dynamica, mais il permettrait de vérifier si le modèle COR-E est capable de gérer des stratégies d'ordre psychologique. Le modèle COR-E, avant tout inspiré d'une théorie psychologique, est prévu à cet effet. Le déni peut être modélisé comme un « comportement » de protection destiné à préserver la ressource de bien-être d'un individu, consistant à ignorer un événement négatif avéré ou anticipé (perte ou menace d'une ressource). L'utilisation de COR-E dans un tel scénario permettrait d'explorer davantage la validité de notre approche sur l'aspect psychologique.

Chapitre 9

Simulation des groupes avec COR-E

9.1 Introduction

La simulation de groupes d'agents est un sujet qui a déjà été étudié par la communauté en systèmes multi-agents. Certains travaux se sont intéressés aux émotions des groupes pour simuler des postures et des expressions faciales émotionnelles (Musse et Thalmann, 2001), ou des phénomènes de contagion émotionnelle (Bosse *et al.*, 2011). Ces modèles de groupe ont utilisé une approche entité des émotions, c'est à dire une architecture intégrant des variables émotionnelles, mais aucun ne semble avoir utilisé une approche émergente pour la simulation de comportements émotionnels. COR-E est un bon candidat pour tester les capacités d'un modèle d'émergence des émotions pour traiter les comportements de groupes. La théorie COR (Hobfoll, 1998) sur laquelle le modèle COR-E est fondé fait référence à des comportements d'acquisition et de protection effectués par des groupes. Nous avons donc étendu le modèle COR-E au groupe pour représenter ce type d'événements.

Dans ce chapitre nous présentons d'abord les travaux existants sur la simulation des groupes (section 9.2), puis nous expliquons comment nous avons étendu le modèle COR-E afin de simuler des groupes (section 9.3). Nous illustrons ensuite cette extension avec un scénario de manifestation configuré sur le modèle COR-E implémenté (section 10.2).

9.2 Contexte

9.2.1 Modèles informatiques

D'après les travaux existants, la simulation de groupes d'agents peut être effectuée selon deux méthodes : l'approche par émergence, et l'approche par entité (Helbing et Molnar, 1995; Reynolds, 1987; Musse et Thalmann, 2001; Moulin et Larochelle, 2010). La notion d'émergence utilisée dans les travaux sur les simulations des groupes est différente de la notion d'émergence que nous avons utilisée à propos des émotions. Dans les travaux qui suivent nous faisons référence à la notion d'émergence uniquement en tant qu'émergence de groupe. L'émergence d'un groupe désigne la formation spontanée d'un groupe, non encodée par avance dans le système. Cette formation peut-être reconnaissable visuellement, ou être établie d'après les caractéristiques communes de certains agents. Par exemple, plusieurs agents qui se massent au milieu d'une place pour observer un spectacle forment un groupe que l'on peut identifier visuellement, même s'il n'y a aucune représentation de ce groupe dans le système. Dans l'approche par émergence, les agents ont uniquement des

propriétés individuelles, il n'existe pas d'agents ou de variables représentant un groupe. Dans l'approche par entité, les groupes sont explicitement modélisés et ils ont des attributs propres, comme par exemple une émotion (Musse et Thalmann, 2001).

L'approche par émergence peut être illustrée par le modèle de *flocking* de Reynolds (1987), simulant le déplacement d'une population d'oiseaux, et par le modèle à particules de Helbing et Molnar (1995); Helbing *et al.* (2000), utilisé pour la simulation du déplacement de piétons. Dans ces modèles, chaque agent exerce une force attractive et répulsive sur les autres agents qui va déterminer leur direction et leur proximité aux autres agents. Chaque agent a les mêmes caractéristiques. Delgado-Mata *et al.* (2007) ont défini un modèle basé sur celui de Reynolds (1987), qui prend en compte le comportement de fuite. Ce comportement est influencé par une variable représentant la peur, qui augmente la vitesse des agents ainsi que leur tendance à fuir et à rester à proximité des autres agents. Les auteurs ont testé leur modèle sur des animaux virtuels représentant des cerfs pouvant fuir face à des jaguars. Afin d'évaluer leurs travaux, ils ont demandé à des observateurs humains de remplir un questionnaire sur plusieurs aspects de la simulation, en particulier le réalisme des comportements observés. Braun *et al.* (2003) ont proposé une extension du modèle de Helbing *et al.* (2000) en introduisant des différences chez les agents. Chacun d'eux a un degré d'altruisme fixé aléatoirement, et certains appartiennent à une même famille. Un agent altruiste peut revenir sur ses pas pour aider un autre agent faisant partie de la même famille à se déplacer. La famille peut être considérée dans ce modèle comme la représentation d'un groupe, ce qui classe ce modèle à la fois dans une approche émergente et dans une approche entité du groupe.

D'autres modèles privilégient une approche par entités, où les groupes sont explicitement représentés. Certains ont pour objectif de réduire les ressources matérielles requises pour faire tourner une simulation, en réduisant plusieurs agents partageant des caractéristiques communes en un seul groupe (Navarro *et al.*, 2011). D'autres s'intéressent davantage aux aspects sociaux et émotionnels des groupes. C'est notamment le cas des modèles ViCrowd (Musse et Thalmann, 2001) et CrowdMAGS (Moulin et Larochelle, 2010).

Dans ViCrowd il existe 3 types d'entités : la foule, le groupe, et l'individu. Ces dernières sont modélisées selon une architecture BDI, elles ont des connaissances, des croyances et des intentions. Les intentions des agents sont de se rendre sur des points d'intérêts, correspondant à une planification de trajectoire, ou sur des points d'actions afin de réaliser une action (par exemple regarder un tableau). La priorité des actions effectuées par les agents dépend du type d'action concerné. Les comportements réactifs sont prioritaires par rapport aux comportements planifiés. Lorsqu'un événement se déclenche, l'agent exécute le comportement réactif associé à cet événement. D'après un exemple des auteurs, si des agents sont à proximité d'une statue et que cette dernière prend vie subitement, ils exécutent le comportement réactif lié à cet événement qui est fuir.

Chaque groupe est associé à un agent leader. Les capacités de perception du groupe dépendent de ce leader, qui peut percevoir des informations dans l'environnement, et également être perçu. Le leader détermine aussi le comportement du groupe.

ViCrowd intègre également des aspects sociaux. Chaque individu a une variable d'appréciation sur l'intervalle $[0, 1]$ à propos de chaque groupe. Si un individu appartenant à un groupe a une meilleure appréciation pour un autre groupe, alors il peut changer de groupe. Cette variable d'appréciation est calculée d'après une variable de statut émotionnel associée aux agents d'un groupe, elle-même tirée aléatoirement dans un intervalle $[0, 1]$ (ce calcul est détaillé dans le travail de Musse et Thalmann (1997)). Un agent peut aussi avoir un état émotionnel symbolique, comme « triste » ou « explosif », qui détermine sa posture et sa façon de marcher. On peut spécifier pour une foule ou pour un groupe le

nombre d'agents se trouvant dans un état émotionnel particulier.

Le modèle CrowdMAGS de Moulin et Larochelle (2010) introduit quant à lui une distinction entre un groupe social et un groupe spatio-temporel (*STG*). Conceptuellement, un groupe social représente un groupe d'agents partageant les mêmes caractéristiques (famille, amis, association sportive). L'affiliation d'un agent à un groupe social ne change pas au cours de la simulation. Un STG représente un groupe d'agents situé dans l'espace et dans le temps, reconnaissable par un observateur externe. Par exemple une ligne de policiers ou un groupe d'amis marchant ensemble sont des STGs. Dans le modèle, un STG est représenté comme une entité. L'affiliation d'un agent à un STG est dynamique : un agent peut décider de rejoindre ou quitter un STG. Un STG assigne un comportement à chacun de ses agents membres. Lorsqu'un agent rejoint un STG, il adopte donc le comportement qui lui est attribué. Chaque STG a un leader qui gère les buts collectifs, les besoins collectifs, et les ressources du groupe. Chaque agent et chaque groupe a une image projetée, qui contient les informations accessibles aux autres agents (*e.g.* actions collectives, type du groupe et nombre d'agents).

La décision d'un agent de rejoindre ou quitter un STG est basée sur deux variables : l'*enthousiasme* et le *soutien* vis à vis d'un STG (définies sur un intervalle $[-1,+1]$). L'*enthousiasme* représente l'appréciation d'un agent vis à vis des actions collectives menées par un STG. Par exemple, un passant peut apprécier les chants des manifestants, mais ne pas apprécier qu'ils lancent des projectiles. D'autres au contraire peuvent apprécier les projectiles mais pas les chants. C'est l'*agressivité* d'un agent, représentée par une constante sur $[0, +1]$ qui détermine cette appréciation. La variable de *soutien* représente l'appréciation d'un agent pour un STG sur le long terme, et c'est la valeur de cette variable qui détermine si l'agent rejoint ou quitte un STG au delà ou en deçà d'un certain seuil. Cette variable est actualisée en fonction de l'appréciation pondérée d'un agent pour les actions collectives courantes du groupe.

CrowdMAGS utilise la notion de ressource pour simuler la disponibilité d'équipements comme des gaz lacrymogènes, mais aussi des objets plus abstraits comme de la « guérison » ou de de la « relaxation », utilisées pour remonter le niveau de santé des agents blessés. Ces ressources sont fournies par des points de distribution et sont en quantité limitée. L'auteur du modèle mentionne que très peu de modèles de simulation s'intéressent à la notion de ressource que les agents peuvent utiliser, et qu'il est intéressant de prendre en compte cet aspect.

9.2.2 Travaux en psychologie

Les modèles de groupe ne sont pas toujours inspirés de travaux en psychologie ou en sociologie, car certains d'entre eux s'intéressent uniquement au déplacement des groupes, et se concentrent sur des problèmes de navigation spatiale. Pour modéliser ces processus, il est possible d'utiliser des modèles physiques (Helbing et Molnar, 1995; Helbing *et al.*, 2000), ou des méthodes d'agrégation (Navarro *et al.*, 2011), et d'obtenir de très bons résultats. Ces modèles sont efficaces pour représenter les déplacements des agents, mais ne permettent pas à un agent de réaliser des choix comme entrer ou sortir d'un groupe en fonction de ses préférences. D'autres modèles revendiquent une inspiration puisée dans la psychologie, dans le but de répondre à ces limites. C'est par exemple le cas du modèle CrowdMAGS (Moulin et Larochelle, 2010), dont l'auteur s'est inspiré de la théorie de l'identité sociale de Reicher (1982). Cette théorie postule qu'un individu adopte l'identité d'un groupe lorsqu'il en fait partie, et modifie son comportement en accord avec les standards du groupe.

La théorie COR (Hobfoll, 1998), dont s'inspire le modèle COR-E, s'étend également à la notion de groupe. D'après l'auteur, un groupe peut travailler plus efficacement qu'un

individu seul pour obtenir des ressources. L'auteur prend pour exemple l'économie de marché, en faisant remarquer qu'un travail en groupe permet de produire bien plus rapidement que ne le ferait un individu seul. Si un individu devait subvenir lui-même à tous ses besoins, il passerait son temps à chasser, préparer sa nourriture, semer, récolter, travailler le grain, fabriquer ses vêtements, monter la garde, il ne pourrait que dormir très peu et mènerait une existence pauvre. Au fur et à mesure que la société progresse, les ressources individuelles et collectives sont de plus en plus intriquées. Hobfoll (1998) pointe aussi les différences culturelles concernant la valorisation des ressources individuelles ou collectives. La culture américaine valorise davantage les ressources individuelles, tandis que la culture italienne accorde plus d'importance à la famille, dont les besoins passent avant ceux de l'individu qui en fait en partie. Des facteurs individuels sont aussi impliqués. Par exemple, les individus ayant une haute estime d'eux-mêmes auraient plutôt tendance à agir seul, car recevoir l'aide des autres les placerait dans une position de faiblesse (Fisher *et al.* (1982), cité dans Hobfoll (1998)). Les principes de la théorie COR ont été énoncés pour un individu, mais on peut penser que l'auteur sous-entend qu'ils s'appliquent également au groupe. Il est en effet possible de réaliser des actions collectives pour l'acquisition et la protection de ressources, et l'auteur en donne plusieurs exemples. Il cite Caughey (1975), qui a rapporté que des mineurs formaient des coalitions pour pouvoir accomplir leur travail, mais également afin de défendre leurs ressources. Pendant la ruée vers l'or en Californie, des groupes de mineurs blancs ont fait pression sur les autorités locales pour qu'ils défavorisent les groupes de mineurs asiatiques, présents dans certaines communes en supériorité numérique. Pour cela, ils ont demandé qu'ils soient désaffranchis et taxés plus lourdement.

La théorie psychologique des groupes proposée par Thibaut et Kelley (1986) est assez proche de celle de Hobfoll (1998). Dans cette théorie, chaque relation entre deux individus comporte des coûts et des récompenses. Les coûts peuvent représenter par exemple du temps, de l'argent, des efforts, et les récompenses peuvent représenter du soutien ou de la compagnie. Un individu calcule la valeur d'une relation en soustrayant les coûts des récompenses. Cette valeur détermine si un individu va s'engager dans une relation avec l'autre, la poursuivre, ou l'arrêter. Cette théorie s'applique à des paires d'individus, mais pourrait être étendue à des groupes plus larges.

9.3 Modèle de simulation des groupes avec COR-E

9.3.1 Principe général et motivations

Le modèle que nous proposons permet à un agent de rejoindre un groupe afin d'y réaliser des comportements collectifs qu'il ne pourrait pas réaliser seul. Il peut s'agir de comportements d'acquisition, comme jouer en équipe pour obtenir une récompense, ou de comportements de protection, comme manifester pour protéger son emploi. Un agent entre dans un groupe lorsque (i) il peut s'allier à des agents de ce groupe pour réaliser un comportement collectif qu'il souhaite effectuer, et (ii) ce groupe est compatible avec ses valeurs. Si un agent a le choix entre plusieurs groupes, il choisira celui qui correspond le mieux à ses valeurs. Pour déterminer si un groupe correspond aux valeurs d'un agent, nous nous basons sur ses préférences et sur les comportements adoptés par des agents du groupe. Si les comportements des agents du groupe ont des effets négatifs sur des ressources estimées par l'agent, la valeur du groupe du point de vue de cet agent va baisser. Si au contraire ces comportements ont des effets positifs sur des ressources estimées par l'agent, la valeur du groupe du point de vue de cet agent augmente. Un agent peut aussi quitter

un groupe si la valeur de ce dernier devient négative.

Dans cette section, nous présentons un modèle de comportements de groupe en représentant un groupe comme une entité. Comme nous l'avons vu, il existe des modèles considérant le groupe comme un phénomène émergent. Dans le scénario de la file d'attente que nous avons utilisé dans les évaluations du modèle COR-E (chapitre 7), on peut observer l'apparition d'un groupe de type émergent, représenté par les agents de la file d'attente. Plusieurs agents réalisant une activité semblable au même endroit peuvent en effet apparaître comme faisant partie d'un groupe. Comme l'ont fait remarquer Moulin et Larochelle (2010), la représentation du groupe comme phénomène émergent n'est toutefois pas suffisante. Certains groupes ont une démarcation claire, c'est à dire une identité, et l'ensemble des individus qui y appartiennent peut être bien défini. C'est le cas par exemple pour les membres d'une équipe sportive, ou pour un ensemble de manifestants partageant les mêmes valeurs. En vue d'être accepté par un groupe, un individu peut-être amené à réaliser des comportements particuliers. De même, certains comportements sont destinés à exclure un individu d'un groupe. L'appartenance d'un individu à un groupe peut aussi permettre un accès à certaines ressources, ou faire bénéficier d'une protection. Enfin, des groupes peuvent s'opposer entre eux (Caughey, 1975). Il n'est pas possible de gérer ces mécanismes en utilisant uniquement une représentation émergente des groupes. Dans leur travail Moulin et Larochelle (2010) font une distinction entre un groupe social et un groupe spatio-temporel (STG). Dans notre travail, nous faisons une distinction entre les groupes émergents, dont la formation n'est pas intentionnelle, et les groupes entités, dont la formation est intentionnelle en vue d'acquiescer ou de protéger une ressource collectivement. Un exemple de groupe émergent simulé par COR-E est celui de la file d'attente. Ce groupe est formé de façon non intentionnelle : les agents se trouvent au même endroit et au même moment, mais ils agissent pour leurs propres intérêts, et le groupe visible ne partage pas de valeurs ou d'objectifs communs. Dans le travail qui suit, nous représentons des groupes entités représentant des manifestants, qui partagent un objectif commun et des valeurs communes.

Il existe deux moyens de simuler les groupes comme entités avec COR-E. La première méthode ne nécessite aucun ajout au modèle présenté au chapitre 5. Elle consiste à considérer qu'un groupe est représenté par un agent $i \in \mathcal{A}$. Dans ce cas, seule la représentation graphique de l'agent est modifiée pour faire apparaître soit un groupe, soit un individu. Cette méthode est la plus simple, mais elle a deux limites importantes :

- elle ne permet pas de représenter des individus appartenant à un même groupe qui ont des caractéristiques différentes et des comportements différents ;
- un individu peut rejoindre un groupe, mais lorsqu'il le rejoint il doit être fusionné avec le groupe sous la forme d'un seul agent. En conséquence, aucun agent ne peut ressortir du groupe.

Pour pallier ces limites, nous avons choisi d'explorer la seconde méthode, qui consiste à simuler des groupes pouvant être composés de plusieurs individus, conservant chacun leurs caractéristiques et leurs capacités de décision.

9.3.2 Représentation des individus et des groupes

Nous introduisons une distinction parmi l'ensemble des agents entre les individus et les groupes. Soit $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ un ensemble fini d'agents, nous définissons $\mathcal{I} \subset \mathcal{A}$ un ensemble fini d'individus, et $\mathcal{G} \subset \mathcal{A}$ un ensemble fini de groupes, avec $\mathcal{I} \cap \mathcal{G} = \emptyset$.

La représentation d'un individu $i \in \mathcal{I}$ correspond à la représentation d'agent qui a été présentée au chapitre 5. La représentation d'un groupe $g \in \mathcal{G}$ est différente et comporte de nouveaux attributs. Un groupe g peut contenir des individus, notés $individus_g \in \mathcal{I}$, et

dispose d'un drapeau, noté $drapeau_g$, qui indique quels comportements sont réalisés par $individus_g$. Ces informations peuvent être perçues par les individus situés à moins d'une certaine distance du drapeau. De plus, un groupe dispose d'un attribut $libreAcces_g$, qui vaut vrai si un individu i peut entrer ou sortir du groupe g sans en demander l'autorisation aux membres du groupe, et faux sinon. Dans l'état actuel du modèle nous gérons seulement l'entrée et la sortie des individus dans les groupes étant en libre accès. Tous les groupes référencés dans cette section sont considérés comme étant en libre accès, et nous ne vérifions pas la valeur de cet attribut.

9.3.3 Représentation des comportements collectifs

Afin de représenter un comportement c pouvant être réalisé par plusieurs individus, nous introduisons la notion de comportement collectif. Tout comportement $c \in C$ possède un attribut $collectif_c$ qui vaut vrai si c est un comportement collectif, et faux sinon. La valeur de cet attribut dépend du type du comportement, par exemple un comportement de type « manifester dans la rue » est un comportement collectif.

Tout individu i souhaitant réaliser un comportement collectif c , c'est à dire ayant sélectionné ce comportement, doit se trouver dans un groupe déjà en train de réaliser c . Il s'agit d'une pré-condition. Le modèle COR-E actuel ne permettant pas la création d'un groupe, un individu peut uniquement rejoindre ou quitter un groupe (nous détaillons ce mécanisme juste après, section 9.3.4). Deux ensembles d'agents réalisant chacun un comportement collectif de type différent, comme « lancer des projectiles » ou « tenir une pancarte », peuvent se retrouver dans le même groupe. Ces ensembles sont déterminés à l'initialisation du groupe. Si un individu i perçoit un drapeau $drapeau_g$, alors l'individu i perçoit également tous les comportements collectifs C_g réalisés par les agents du groupe g . Un comportement collectif c doit être réalisé par un nombre minimum d'agents noté $minAgents_c$, et un nombre maximum d'agents notés $maxAgents_c$. Par exemple, le comportement « descendre une rivière en canoë » admet un nombre d'individus bien inférieur au comportement « manifester dans la rue ». On note $nbAgents_c$ le nombre d'individus réalisant le comportement c .

9.3.4 Dynamique du groupe

9.3.4.1 Rejoindre un groupe

Afin de réaliser un comportement collectif qu'il a sélectionné, un individu i doit se trouver dans un groupe qui contient au moins un agent réalisant déjà ce comportement. Si i ne se trouve pas dans un groupe remplissant cette condition, il doit en trouver un et le rejoindre. Afin de choisir le groupe qu'il rejoint, i prend en compte les comportements collectifs réalisés par les agents des groupes qu'il perçoit. Un individu i peut percevoir les comportements collectifs C_g réalisés par les agents d'un groupe g s'il perçoit le drapeau du groupe $drapeau_g$. Si au moins un agent du groupe g réalise le comportement collectif c que i a sélectionné, et que $nbAgents_c < maxAgents_c$, alors le groupe g va faire partie des groupes candidats dans lesquels i peut entrer. Pour choisir un groupe parmi les groupes candidats, i attribue une valeur à chacun d'eux. Pour cela, il calcule la valeur de chaque comportement collectif effectué par les agents du groupe, par rapport à son propre point de vue. Le calcul de la valeur d'un comportement collectif est identique au calcul de la valeur d'un comportement présenté au chapitre 5 section 5.3.2.2. Par exemple, si plusieurs agents d'un groupe g manifestent en lançant des projectiles pouvant blesser d'autres agents, et que la vie de ces agents est une ressource ayant une valeur positive pour i , cela va influencer

négativement la valeur du groupe g pour i . De la même façon, si des agents brandissent des banderoles pour protester contre leur perte d'emploi et le protéger, et que cet emploi est une ressource de valeur pour i , alors cela va influencer positivement la valeur du groupe g . Un groupe peut contenir plusieurs agents réalisant des comportements collectifs différents. Plus il y a d'agents qui réalisent un même comportement collectif, plus la valeur de ce comportement prend de l'importance. Cela représente le fait qu'un individu est plus attiré par un groupe où il y a proportionnellement plus d'agents réalisant un comportement correspondant à ses valeurs.

Soit $C_g \in \mathcal{C}$ l'ensemble des comportements collectifs réalisés par les agents d'un groupe $g \in \mathcal{G}$, et $i \in \mathcal{I}$ un individu. Nous notons $\mathcal{V}(c, i)$ la valeur d'un comportement du point de vue de i , $nbAgents_{c,g}$ le nombre d'individus réalisant le comportement c dans le groupe g , et $nbAgents_g$ le nombre d'agents dans le groupe g . La valeur d'un groupe g du point de vue d'un individu i est à égale à :

$$val_g(i) = \frac{1}{nbAgents_g} \sum_{c \in C_g} \mathcal{V}(c, i) * nbAgents_{c,g}$$

L'algorithme 2 montre comment un agent sélectionne le meilleur groupe parmi un ensemble de groupes candidats. Un agent i choisit le groupe de valeur positive maximum parmi ces groupes candidats. L'algorithme 3 montre la procédure qui est appliquée lorsqu'un agent i a sélectionné un comportement collectif c . L'individu récupère d'abord l'ensemble des groupes qu'il peut percevoir autour de lui grâce à la fonction *PercevoirGroupes*(i), calcule la valeur du meilleur groupe, puis si cette valeur est positive il rejoint ce groupe s'il n'y est pas déjà. L'action que doit réaliser un agent pour rejoindre effectivement un groupe g est directement encodée par le type du groupe. Pour un groupe de manifestants, cette action est de se déplacer jusqu'au groupe.

Algorithme 2: TrouveMeilleurGroupe(i, \mathcal{G})

Input : $i \in \mathcal{I}$ un individu, $groupes \subset \mathcal{G}$ un ensemble de groupes.

$groupeMax \leftarrow NULL$

$valeurMax \leftarrow -1$

foreach $g \in groupes$ **do**

$val_g(i) = \frac{1}{nbAgents_g} \sum_{c \in C_g} val(c, i) * nbAgents_{c,g}$

if $val_g(i) > valeurMax$ **then**

$valeurMax \leftarrow val_g(i)$

$groupeMax \leftarrow g$

return $groupeMax$

9.3.4.2 Quitter un groupe

Un individu $i \in \mathcal{I}$ appartenant à un groupe $g \in \mathcal{G}$ quitte le groupe g lorsqu'une de ces trois conditions est remplie :

1. À la fin de son pas de temps d'exécution, i a terminé le comportement collectif $c \in \mathcal{C}_g$ qu'il réalisait dans le groupe g , et il n'a pas sélectionné de nouveau comportement collectif appartenant à g . Formellement $estTermine(c)$ vaut vrai, et $comportementCourant_i = \emptyset$.

Algorithme 3: `TraiterComportementCollectif(i, c)`

Input : $i \in \mathcal{I}$ un individu, $c \in \mathcal{C}$ un comportement sélectionné par i .

```

if collectif( $c$ ) then
   $groupes \leftarrow percevoirGroupes(i)$ 
  if  $groupes \neq NULL$  then
     $g = TrouveMeilleurGroupe(i, groupes)$ 
    if  $g \neq NULL$  then
      if  $i \in individus_g$  then
         $Executer(i, c)$ 
      else
         $Rejoindre(i, g)$ 

```

2. Au pas de temps d'exécution précédent, i était en train de réaliser le comportement $c \in \mathcal{C}_g$ dans le groupe g , mais il sélectionne au pas de temps courant un autre comportement n'étant pas un comportement collectif de g . Formellement, à la fin du pas de temps d'exécution courant $comportementCourant_i \notin \mathcal{C}_g$. Par exemple, un individu est en train de manifester dans un groupe, lorsqu'un incendie se déclare à proximité. L'agent peut alors décider de fuir en abandonnant son comportement précédent. Un individu peut aussi sélectionner un comportement collectif réalisé dans un autre groupe que le sien, il va alors abandonner son groupe actuel pour rejoindre l'autre groupe.
3. La valeur du groupe g devient négative pour i , formellement $val_g(i) < 0$. Un individu réévalue la valeur des groupes auquel il appartient au début de son pas de temps d'exécution, avant la sélection de comportement. La valeur d'un groupe peut changer lorsqu'un ou plusieurs agents du groupe changent de comportement collectif, ou lorsqu'un ou plusieurs nouveaux agents rejoignent ou quittent le groupe.

Lorsqu'un individu i quitte un groupe, il est retiré de l'ensemble des agents contenus dans le groupe.

9.4 Illustration sur un exemple testé expérimentalement

9.4.1 Présentation du scénario

Afin de tester la capacité des agents à rejoindre un groupe sur la base de leurs préférences, nous avons configuré dans l'implémentation de COR-E un scénario de cortège de manifestation se déroulant dans une rue. Les agents de ce scénario cherchent à protéger leur emploi, menacé par un projet de licenciement de leur entreprise. Nous avons modélisé deux groupes, dont les agents réalisent des actions collectives différentes destinées chacune à protéger leur emploi. Le premier groupe contient des agents réalisant le comportement de manifester en chantant, et le second groupe contient des agents réalisant le comportement de manifester en lançant des projectiles. Nous avons également modélisé deux individus se trouvant en dehors des groupes sur le trottoir, dont l'emploi est également menacé. Ces individus auront la possibilité de rejoindre un groupe du cortège lorsqu'ils vont le voir passer, afin de manifester en chantant ou de manifester en lançant des projectiles.

L'emplacement initial des agents est montré sur la figure 9.1. Les deux individus sont l'agent vert et l'agent bleu situés en bas au centre, et un seul des deux groupes est visible à gauche de l'image. Les groupes se déplacent de la gauche vers droite (ce comportement de déplacement est scripté), et leur vitesse de déplacement est inférieure à la vitesse de déplacement des individus.

9.4.1.1 Ressources

Nous avons utilisé 3 types de ressources dans ce scénario :

- **Emploi** : il existe une seule ressource de type *Emploi*, nommée $emploi1 \in \mathcal{R}$, qui représente l'ensemble des emplois menacés de licenciement.
- **Attention** : les ressources d'attention représentent l'attention que peuvent obtenir les agents grâce à leurs comportements. Nous avons utilisé deux ressources d'attention $attention1$ et $attention2 \in \mathcal{R}$, avec $type(attention1) = type(attention2) = Attention$. La ressource $attention2$ représente une attention plus importante que la ressource $attention1$. En conséquence, $attention2$ a toujours une valeur supérieure à $attention1$ dans la liste de préférences des agents. Formellement, $\forall i \in \mathcal{I}$, $attention2 \succeq_i attention1$. Une faible attention pourrait par exemple être celle de quelques passants, tandis qu'une attention importante pourrait être celle obtenue de la part des médias.
- **Biens de la Société** : il existe une seule ressource de type *BienSoc*, nommée $bienSoc1 \in \mathcal{R}$. Cette ressource est représentée par une voiture, et représente un bien appartenant à la société.

9.4.1.2 Comportements

Afin de protéger un emploi menacé, les agents peuvent réaliser deux types de comportements. Ces comportements se différencient par leurs effets sur les ressources de l'environnement.

- **Manifester en lançant des projectiles** : ce comportement a comme effet de protéger une ressource de type *emploi* menacée par un licenciement économique. Il permet d'obtenir la ressource $attention2$, et menace la ressource $bienSoc1$. C'est un comportement collectif, admettant au minimum 5 agents, et au maximum le nombre d'agents contenu dans la simulation ;
- **Manifester en chantant** : ce comportement a comme effet de protéger une ressource de type *emploi* menacée par un licenciement économique. Il permet d'obtenir la ressource $attention1$, c'est à dire une ressource d'attention ayant moins de valeur que celle du comportement précédent. C'est un comportement collectif, admettant au minimum 5 agents, et au maximum le nombre d'agents contenu dans la simulation.

9.4.1.3 Profils des Agents

Il y a deux profils d'agents, caractérisés par leurs préférences sur les ressources de l'environnement. Les deux profils d'agents accordent une valeur à leur emploi et aux ressources d'attention. En revanche, le premier profil d'agent n'accorde aucune valeur aux biens de la société. Les préférences correspondant à ces profils sont les suivantes :

- si un agent i est de profil A, alors $Emploi \succeq_i Attention2_i \succeq_i Attention1$
- si un agent i est du profil B, alors : $Emploi \succeq_i BiensSoc \succeq_i Attention2 \succeq_i Attention1$

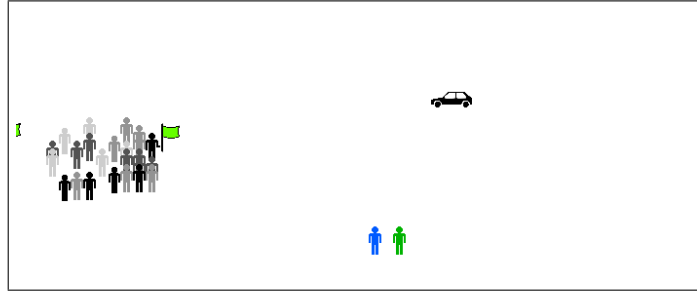


FIGURE 9.1 – Capture d’écran de la simulation au pas de temps 0.

Ces profils vont donc avoir une influence sur la valeur des comportements. Si un agent appartient à un profil de type A, le comportement lancer un projectile a plus de valeur pour lui que le comportement chanter. En revanche si un agent appartient à un profil B, le comportement chanter a plus de valeur que le comportement lancer un projectile.

9.4.2 Initialisation

Nous avons défini deux groupes de 20 agents. Dans le premier groupe, 100% des agents ont un profil de type A, et dans le second groupe 100% des agents ont un profil de type B. Nous avons placé le groupe contenant les agents de profil A en tête du cortège, et le groupe contenant les agents de profil B en second dans le cortège. Nous avons aussi modélisé deux individus ne faisant partie d’aucun groupe à l’initialisation, situés un peu plus loin que le point de départ du cortège. Le premier individu a un profil de type A, il est coloré en vert, et le second a un profil de type B, il est coloré en bleu. Tous les agents de la simulation ont la ressource *emploi1* dans leurs ressources acquises, formellement $partageable_{emploi1}$ vaut vrai et $\forall i \in \mathcal{I}, emploi1 \in RA_i$. Nous avons également défini un agent *entreprise* $\in \mathcal{G}$ représentant l’entreprise ayant engagé les démarches de licenciement vis à vis de ses employés. Cet agent a un comportement scripté : il exécute pendant tout le temps de la simulation le comportement *licencier*(*individus* $\in I$), dont l’effet de début est de menacer la ressource *emploi1* possédée par les individus de la simulation, et dont l’effet de fin est de leur faire perdre définitivement. Dans notre scénario ce comportement ne se termine pas car nous lui avons fixé une durée illimitée, les effets de fin ne sont donc jamais appliqués. Nous avons également placé la ressource *bienSoc1*, représentée sous la forme d’une voiture, à proximité d’un point de passage du cortège. Cette voiture est considérée comme garée et reste donc immobile, il ne s’agit pas d’un agent.

9.4.3 Déroulement de la simulation

Au départ de la simulation (pas de temps 0), le premier groupe du cortège est visible sur la gauche de l’environnement. Il est formé d’agents se trouvant très près les uns des autres, avec quelques espaces vides aléatoires. Deux agents piétons, l’un coloré en vert et l’autre en bleu, se situent en bas au centre de l’environnement bien à l’écart du groupe. On peut aussi observer une voiture représentant la ressource *bienSoc1*. Une capture d’écran correspondant à ce pas de temps est montré sur la figure 9.1.

Lorsque la simulation est lancée (pas de temps 1), l’agent *entreprise* engage le comportement scripté *licencier*, qui menace la ressource *emploi1* de tous les individus de la simulation. En réaction, les agents sélectionnent un comportement leur permettant de protéger *emploi1* correspondant à leurs préférences. Les agents contenus dans le premier groupe réalisent le comportement « manifester en lançant des projectiles », et les agents

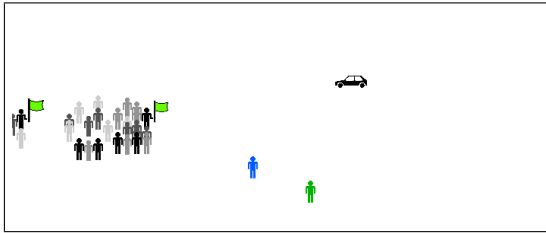


FIGURE 9.2 – Capture d’écran de la simulation au pas de temps 14.

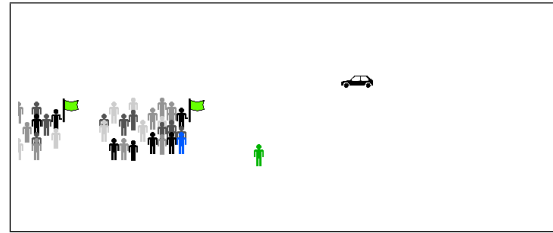


FIGURE 9.3 – Capture d’écran de la simulation au pas de temps 22.

du second groupe réalisent le comportement « manifester en chantant ». Les individus isolés sur le trottoir ne peuvent pas réaliser les comportements de protection possibles, car ils ne font pas partie d’un groupe, et ils ne perçoivent pas encore les groupes qu’ils pourraient rejoindre. Dans les pas de temps qui suivent (pas de temps 2-7), les agents des groupes continuent à réaliser leur comportement de protection. Le premier groupe du cortège avance vers la droite dans l’environnement, conformément au comportement de déplacement qui a été scripté. Ce premier groupe est suivi par le second groupe du cortège qui avance dans le même sens. Au pas de temps 8, l’agent bleu perçoit le premier groupe, qui se trouve maintenant suffisamment proche de lui. A l’intérieur de ce groupe, les agents réalisent le comportement « manifester en lançant des projectiles » afin de protéger la ressource *emploi1*. Ce comportement a une valeur positive pour l’agent bleu, qui cherche aussi à protéger la ressource *emploi1*. Il calcule donc la valeur du groupe pour savoir s’il peut le rejoindre et réaliser aussi ce comportement. Comme la valeur du groupe est positive du point de vue de l’agent bleu, il le rejoint. Une capture d’écran de l’agent bleu en train de rejoindre le premier groupe au pas de temps 14 est montrée sur la figure 9.2.

Au pas de temps 11, l’agent bleu n’a pas encore rejoint le premier groupe, mais il perçoit maintenant le second groupe. Ce groupe réalise le comportement « manifester en chantant » afin de protéger la ressource *emploi1*. Par rapport aux préférences de l’agent bleu, ce comportement a plus de valeur pour lui que le premier. En effet, « manifester en lançant des projectiles » menace la ressource *bienSoc1*, à laquelle l’agent bleu accorde de la valeur, et cette ressource a plus de valeur qu’obtenir une attention importante (représentée par *attention2*). L’agent calcule la valeur du second groupe, qu’il évalue comme positive, et en conséquence il sélectionne le comportement « manifester en chantant », et rejoint le second groupe pour le réaliser.

Au pas de temps 14, l’agent vert perçoit le premier groupe, qui se trouve suffisamment proche de lui. Ce groupe ayant une valeur positive pour lui, il décide de le rejoindre afin de pouvoir réaliser l’action collective « manifester en lançant des projectiles ».

Au pas de temps 17, l’agent vert perçoit également le second groupe. Cependant, il ne va pas changer d’avis et décider de rejoindre ce second groupe comme l’a fait l’agent bleu. En effet, pour l’agent vert les biens de la société n’ont aucune importance, donc le comportement « manifester en lançant des projectiles » reste celui qui a le plus de valeur à ses yeux car il rapporte une attention plus importante que « manifester en chantant ». L’agent vert continue donc à rejoindre le premier groupe.

Au pas de temps 21 l’agent vert a rejoint le premier groupe, et réalise le comportement « manifester en lançant des projectiles ». Au pas de temps 26, l’agent bleu rejoint le groupe vert, et réalise le comportement « manifester en chantant ». Les deux groupes continuent de se déplacer de gauche à droite, en réalisant chacun leur comportement collectif. La capture d’écran montrée sur la figure 9.4 montre l’environnement lorsque les deux agents ont rejoint leur groupe, et celle sur la figure 9.5 montre l’environnement à la fin de la

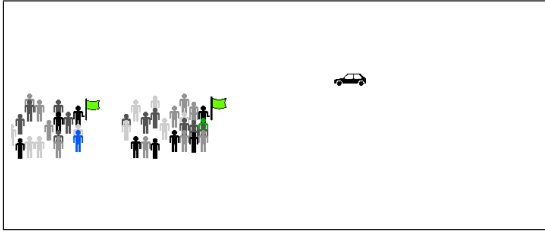


FIGURE 9.4 – Capture d’écran de la simulation au pas de temps 26.

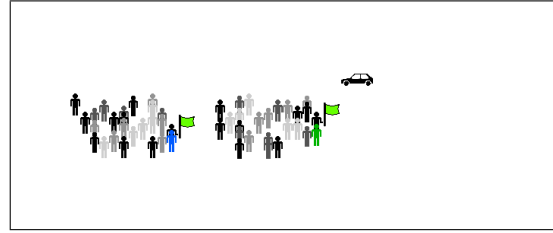


FIGURE 9.5 – Capture d’écran de la simulation au pas de temps 60.

simulation.

9.5 Comparaison du traitement des groupes chez COR-E avec d’autres modèles

Nous avons déjà effectué dans ce chapitre (section 9.3.1) la comparaison des modèles simulant les groupes comme un phénomène émergent, et ceux représentant le groupe comme une entité. Nous avons vu que l’utilisation d’une approche émergente seule était insuffisante pour simuler certains phénomènes de groupe, et que le modèle COR-E tirait profit des deux approches à la fois. Le modèle de groupe comme entité que nous avons proposé peut-être comparé en particulier avec ceux de Musse et Thalmann (2001) et Moulin et Larochelle (2010).

La force du modèle COR-E est de se servir des intérêts qu’un individu peut avoir vis à vis de certaines ressources pour prendre la décision de rejoindre ou quitter un groupe. Dans d’autres modèles, cette décision est fondée sur des facteurs pouvant poser certains problèmes. Dans ViCrowd (Musse et Thalmann, 2001), la variable d’appréciation d’un agent pour un groupe dépend d’une variable émotionnelle tirée aléatoirement dans un intervalle $[0, 1]$. La décision de rejoindre un groupe semble donc dépendre exclusivement du hasard, et elle n’est pas représentative des caractéristiques d’un agent et de la situation dans laquelle il se trouve. Dans CrowdMAGS (Moulin et Larochelle, 2010), la variable d’appréciation dépend de l’enthousiasme de l’agent pour certains comportements du groupe. Par exemple un agent peut apprécier le chant des manifestants, mais pas le fait qu’ils lancent des projectiles. Cette approche est meilleure que celle proposée dans le modèle ViCrowd car elle tient compte des caractéristiques d’un agent, mais elle présente aussi des limites. On ne sait en effet pas pourquoi les agents d’un groupe lancent des projectiles ou chantent, et tout individu qui aime le comportement « lancer des projectiles » ou « chanter » va rejoindre un groupe qui réalise ce comportement. Si on utilise ce modèle dans une ville virtuelle, cela signifie que peu importe les causes de la manifestation, les agents aimant chanter iront chanter et les agents aimant lancer des projectiles iront lancer des projectiles. On ne peut donc pas tester les effets de manifestations concernant des sujets différents. Dans le modèle COR-E, les agents rejoignent un groupe uniquement si l’action collective du groupe présente un intérêt pour eux, c’est à dire si elle leur permet d’acquérir une ressource qu’ils souhaitent, ou de protéger une ressource qui est menacée. De plus, nous ne supposons pas que certains agents sont agressifs par nature, et aimeront de fait les comportements violents, mais que c’est la cause de la menace et les ressources impliquées qui vont déterminer le comportement d’un agent. Des employés d’une entreprise peuvent commettre des actions violentes si leur emploi est menacé, sans pour autant être des personnes violentes par nature qui rejoindront n’importe quel groupe lançant des projectiles.

Ce principe est le fondement de la théorie COR (Hobfoll, 1998), d'après laquelle ce n'est pas l'événement en lui-même qui doit être considéré, mais les effets de cet événement sur les ressources.

9.6 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté dans cette section une extension du modèle COR-E pour la simulation des groupes. Un agent peut rejoindre un groupe compatible avec ses valeurs pour y réaliser des comportements collectifs. La valeur d'un groupe est déterminée d'après le comportement des agents qui font partie de ce groupe, et l'effet de ces comportements sur les ressources de l'environnement. Nous avons montré grâce à l'utilisation du modèle dans un scénario de manifestation que les algorithmes proposés pour rejoindre un groupe fonctionnent correctement. Le travail que nous avons présenté dans cette section est préliminaire, et il donne lieu à plusieurs perspectives. Nous les présentons dans la partie perspectives de cette thèse.

Chapitre 10

Mise en œuvre

10.1 Introduction

Dans ce chapitre nous décrivons l'implémentation du prototype du modèle COR-E (section 10.2), ainsi que l'intégration du modèle COR-E dans le projet Terra Dynamica (section 10.3). L'implémentation que nous présentons ci-après a été utilisée lors des évaluations présentées dans les chapitres 6, 7, 8, ainsi que pour la simulation de groupes présentée au chapitre 9. L'architecture du projet Terra Dynamica est en cours de développement.

10.2 Implémentation de COR-E

COR-E a été implémenté en Java 6 dans le simulateur MASON (Luke *et al.*, 2005). Nous présentons d'abord le simulateur MASON, puis nous décrivons l'implémentation du modèle COR-E.

10.2.1 Le simulateur MASON

10.2.1.1 Présentation Générale

MASON est un outil de simulation pour les systèmes multi-agents écrit en Java. Il est conçu pour la simulation mono-processus d'événements discrets, et est adapté à la simulation en essaim. Le principe de la simulation en essaim est de modéliser un grand nombre d'agents dont le comportement est régi par des règles simples, de sorte à obtenir des phénomènes émergents résultant des interactions entre ces agents. Le simulateur MASON a été utilisé pour de nombreuses applications, comme des simulations de réseaux sociaux et de trafic urbain (Luke *et al.*, 2005).

MASON a été conçu de sorte à être rapidement pris en main par tout développeur Java. Il offre une librairie minimale pouvant être facilement étendue, plutôt qu'une librairie riche et spécialisée mais ne répondant pas aux besoins du développeur. Le simulateur offre des fonctionnalités de base très utiles pour la simulation multi-agents, comme un planificateur permettant de programmer l'exécution des agents, et une interface graphique permettant de visualiser leurs attributs. Ces caractéristiques nous ont amené à choisir MASON pour implémenter le prototype du modèle COR-E.

L'architecture du simulateur est composée de trois couches : la couche des *utilitaires*, la couche *modèle*, et la couche de *visualisation*. La couche des utilitaires comprend des classes utilisables dans de nombreuses situations. Elle contient par exemple un générateur de nombres aléatoires, des structures de données plus efficaces que celles proposées dans la

librairie Java standard, des widgets pour l'interface graphique, et des outils pour enregistrer des vidéos de simulations et prendre des captures d'écran. La couche modèle comprend des classes qui permettent la planification d'événements, et une variété de grilles, sur lesquelles on peut placer les objets de la simulation et accéder à leur position. Il est possible de faire tourner des simulations à partir de ces deux couches uniquement, car la couche de visualisation est indépendante. La couche de visualisation permet d'observer la simulation graphique, de surveiller certaines données, et de manipuler le modèle en modifiant ses paramètres.

10.2.1.2 La couche modèle

Un modèle MASON est entièrement contenu dans une instance de sous-classe héritant de la classe `SimState`. Cette sous-classe est définie par l'utilisateur. Dans l'implémentation de COR-E, elle se nomme `Simulation`. Cette instance contient un planificateur d'événements discrets `Schedule`, un générateur de nombre aléatoires `MersenneTwisterFast`, et zéro ou plusieurs grilles 2D ou 3D.

Agents et planificateur : un agent au sens de MASON est une entité informatique pouvant être planifiée pour réaliser une action, et pouvant manipuler l'environnement. Un agent peut avoir une représentation physique dans cet environnement, mais cela n'est pas obligatoire. Chaque agent doit être planifié de sorte à ce qu'il puisse être appelé à un certain moment dans le futur par le planificateur représenté par la classe `Schedule`. Pour cela un agent MASON implémente l'interface `Steppable`. Lorsqu'un agent est appelé, sa méthode `step()` est exécutée. Les instructions devant être réalisées par un agent lorsqu'il est appelé doivent se trouver dans cette méthode. MASON peut planifier des objets `Steppable` à n'importe quel temps représenté par une valeur réelle dans le futur. Un objet de classe `Schedule` peut diviser un pas de temps en plusieurs parties, de sorte à ordonner l'appel de chaque agent (invoqué par la méthode `step()`) par rapport aux autres agents. De cette façon, un agent programmé à un pas de temps t peut être appelé plus tôt qu'un agent programmé au même pas de temps t . MASON peut aussi appeler tous les agents à la fois au même pas de temps sur des processus parallèles.

Grilles Les grilles permettent de disposer spatialement les agents dans la simulation. Il existe des grilles 2D et 3D pour plusieurs types d'objets, avec différents calques (hexagonaux, triangulaires ou carrés) et différentes options (grille toroïdale ou non toroïdale). Il est possible de déterminer plusieurs grilles pour une simulation, et un agent peut être sur plusieurs grilles à la fois.

Quand le modèle est exécuté, MASON crée une nouvelle instance de la classe `SimState`, puis entre dans la boucle suivante : d'abord, il vérifie si le `Schedule` a encore des agents à appeler. Si ce n'est pas le cas, ou si le nombre maximum de pas de temps a été atteint, MASON sort de la boucle, termine le `SimState` et quitte. Sinon, le `Schedule` avance jusqu'au temps où le prochain agent est planifié, puis appelle tous les agents planifiés à ce pas de temps (dans l'ordre dans lequel ils ont été planifiés, et de façon aléatoire pour les agents à la même position dans cet ordre).

Les agents ont accès au `SimState` et peuvent manipuler ses grilles, le `Schedule` et le générateur de nombre aléatoire. MASON ne fournit pas de protocoles pour simplifier la conception des agents ou pour écrire leurs comportements, cette phase est laissée entièrement au développeur du modèle.

10.2.1.3 La couche de visualisation

La visualisation d'une simulation peut-être effectuée par l'intermédiaire de la classe `GUIState`, qui est un wrapper pour la classe `SimState`. Le `GUIState` permet d'obtenir plusieurs affichages de la simulation dans des fenêtres séparées, et chaque affichage contient une ou plusieurs grilles. Les grilles et les objets contenus dans les grilles sont dessinées selon des portraits (`SimplePortrayal` et `FieldPortrayal`) qui déterminent leur apparence. Il est possible de personnaliser ces portraits. Les portraits des objets peuvent être attachés à des inspecteurs (`Inspector`), qui sont des panneaux d'affichage donnant des informations sur les attributs de l'objet. Ces panneaux sont affichés lorsqu'on clique sur l'objet (par exemple, un agent). Le `GUIState` contient également une fenêtre de contrôle, instance de la classe `Console`. Cette fenêtre graphique permet de démarrer, mettre en pause ou arrêter une simulation. La visualisation de la simulation est synchronisée avec la couche modèle.

Un diagramme UML simplifié des classes de base de MASON est montré sur la figure 10.2, et une capture d'écran montrant le simulateur instancié avec le modèle COR-E est montré sur la figure 10.1.

10.2.2 Implémentation du modèle COR-E

10.2.2.1 Organisation générale de la structure de données

L'environnement de COR-E contient des ressources et des agents. Une ressource est une instance de la classe de la classe `Resource`, et un agent est une instance de la classe `Agent`. Les agents et les ressources contenus dans une simulation sont créés dans la classe `Simulation`, qui hérite de la classe `SimState` de MASON. Une simulation peut être visualisée grâce à la classe `SimulationWithUI`, qui hérite de la classe `GUIState` de MASON. La classe `Agent` représente un agent au sens général, qui peut réaliser un comportement héritant de la classe `Behavior`. Les effets d'un comportement sont représentés par la classe `Payoff`. Un agent de classe `Agent` implémente l'interface `Steppable` de MASON, permettant de planifier son exécution.

La classe `Person`, héritant de la classe `Agent`, représente un agent affectif : cette classe possède des ensembles de ressources, des préférences, une mémoire, un état affectif, et une perception. L'état des ressources du point de vue d'un agent `Person` est contenu dans la classe `ResourceState`, dont une instance est associée à chaque agent. Cette classe contient trois attributs de classe `ResourceSet`, représentant chacun un ensemble de ressources contenant des éléments de type `Resource`. Les attributs de la classe `ResourceState` sont les ressources désirées (`desiredResources`), les ressources acquises (`acquiredResources`) et les ressources menacées (`threatenedResources`). Les préférences d'un agent `Person` sont stockés dans la classe `Preferences`. Cet agent possède également une mémoire, représentée par la classe `Memory`, lui permettant de se souvenir des comportements qu'il a abandonnés et de la cause de cet abandon. Il a aussi une instance de la classe `AffectiveState`, permettant de stocker et d'actualiser son niveau de menace, et une instance de la classe `Perception`, lui permettant de percevoir des comportements et des groupes.

Un groupe est représenté par la classe `Group` qui hérite de la classe `Person`.

Un schéma UML de cette architecture générale est montrée sur la figure 10.3. Les attributs et les méthodes visibles sur ce schéma sont détaillés plus loin.

L'implémentation de COR-E est organisée en 5 paquets principaux :

- le paquet *agents* : ce paquet contient la classe `Agent`, la classe `Person`, ainsi que toutes leurs sous-classes ;

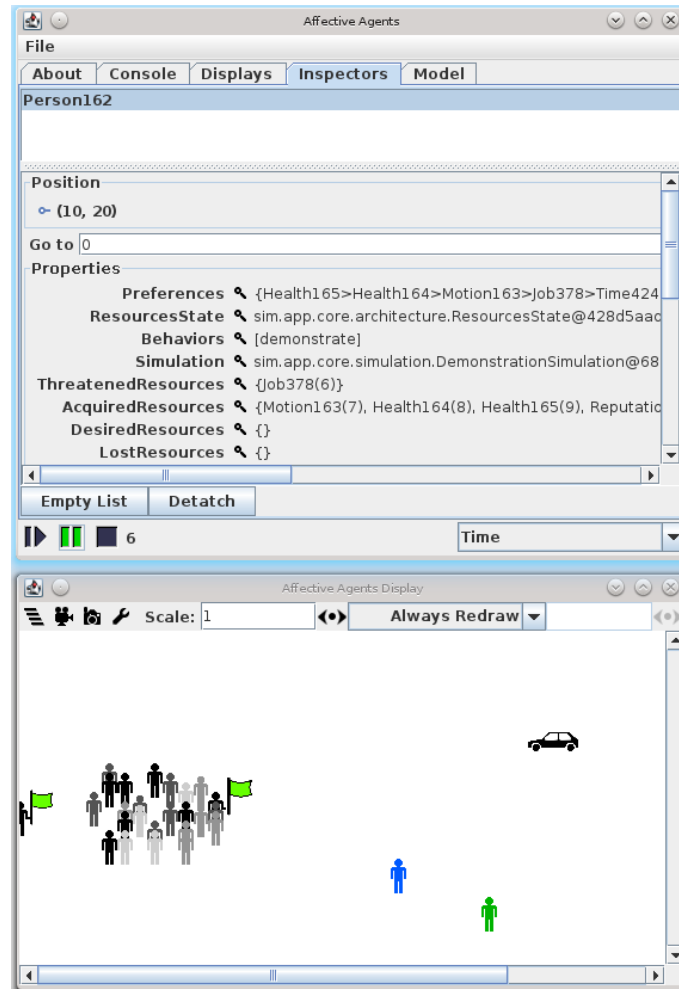


FIGURE 10.1 – Capture d’écran du simulateur MASON instancié avec le modèle COR-E. La fenêtre du haut représente la console, contenant un onglet « Inspectors » permettant de visualiser la valeur des attributs des agents. La fenêtre du bas contient la représentation graphique de la simulation, avec des boutons permettant de prendre des vidéos et de faire des captures d’écran.

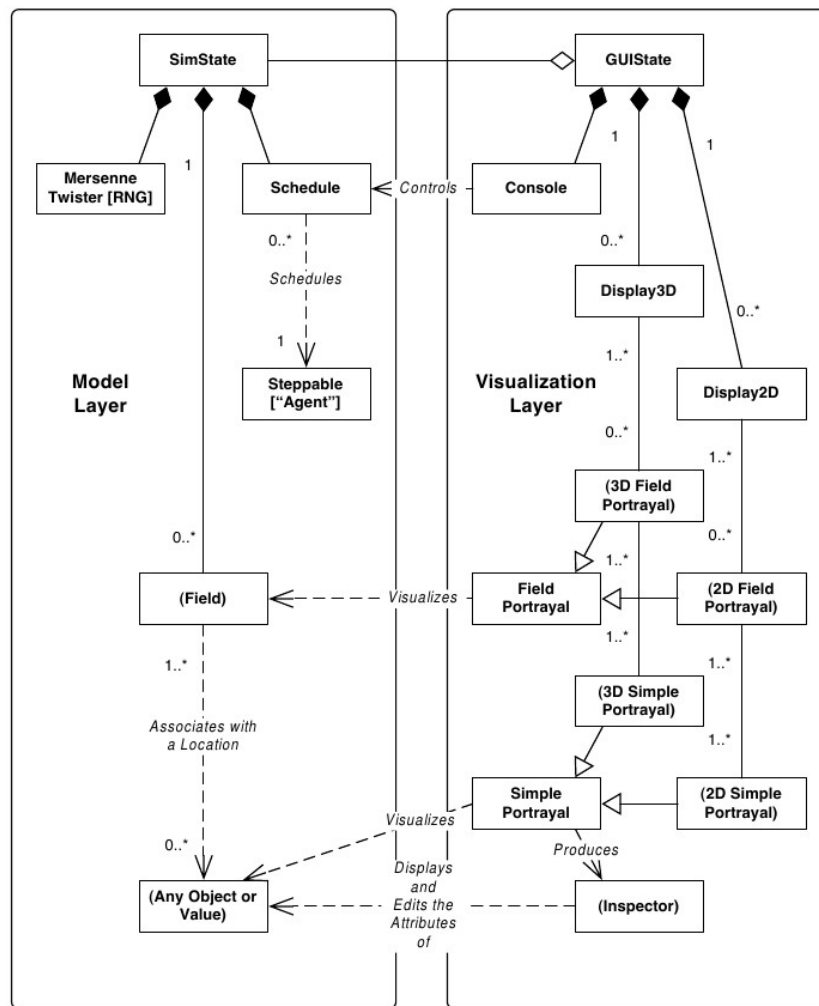


FIGURE 10.2 – Diagramme UML simplifié des classes de base dans les couches modèle et visualisation de MASON extrait de Luke *et al.* (2005). Les éléments entre parenthèses indiquent des ensembles contenant plusieurs classes.

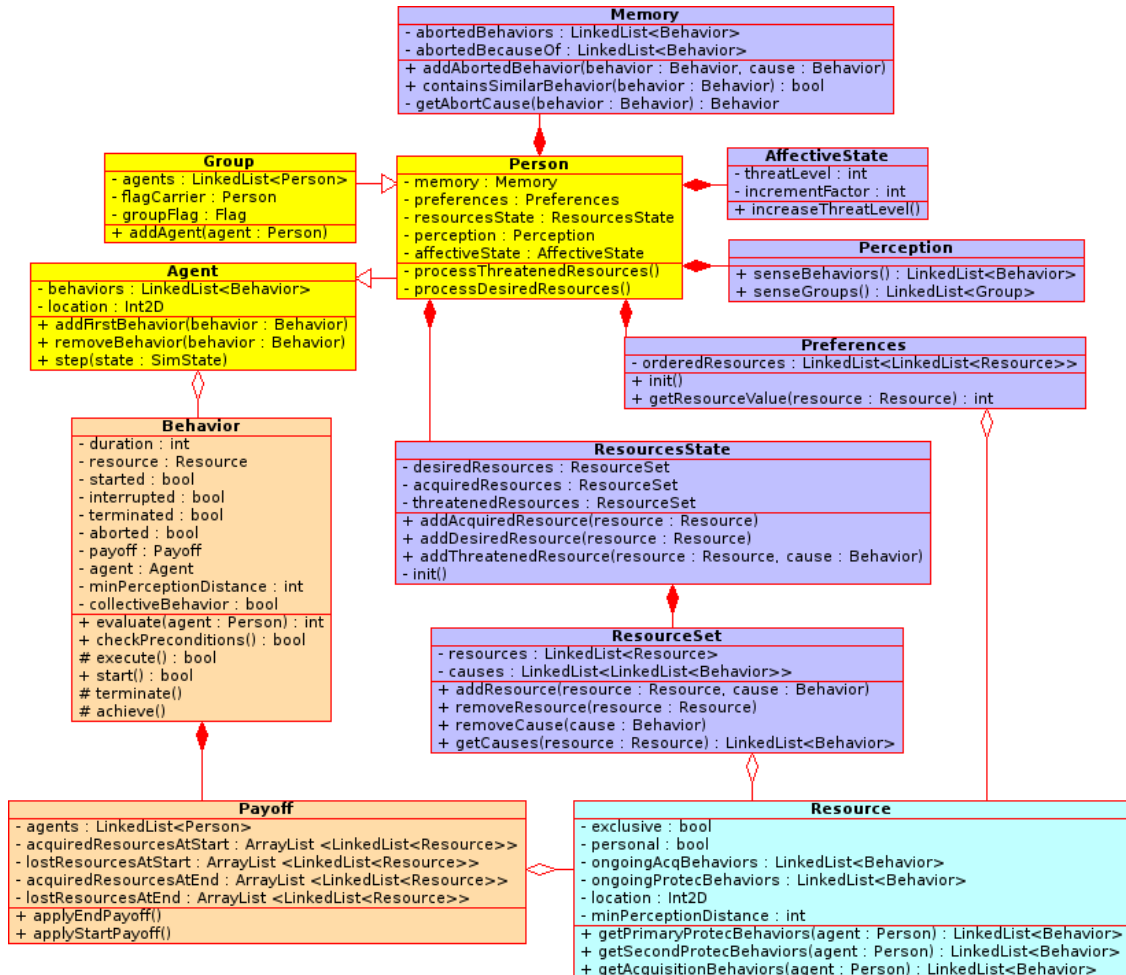


FIGURE 10.3 – Diagramme de classes UML de l’architecture de COR-E. Les classes représentées en violet sont liées à la classe `Person`, et les attributs de cette classe ne peuvent pas exister indépendamment (relation de composition, illustrée par un losange plein). Les classes jaunes représentent les classes d’agents liées par une relation d’héritage (flèche blanche), les classes orange représentent un comportement et ses attributs, et la classe bleue représente une ressource, liée à plusieurs autres classes par relation d’association (losange blanc). Seules les relations d’association et de composition les plus importantes sont représentées.

- le paquet *resources* : ce paquet contient la classe `Resource` ainsi que toutes ses sous-classes ;
- le paquet *behaviors* : ce paquet contient la classe `Payoff`, ainsi que la classe `Behavior` et toutes ses sous-classes ;
- le paquet *architecture* : ce paquet contient l’architecture d’un agent `Person`, c’est-à-dire les classes `ResourceSet`, `ResourceState`, `Preferences`, `Memory`, `Perception`, et `AffectiveState` ;
- le paquet *simulation* : ce paquet contient les classes `Simulation`, `SimulationWithUI` et leurs sous-classes.

10.2.2.2 Description des classes et des méthodes

Les classes utilisées pour notre implémentation contiennent davantage de listes chaînées que de tableaux. Les méthodes que nous avons implémentées requièrent de parcourir un ensemble d’éléments, mais plus rarement d’accéder à un élément en fonction de son indice. Dans ce cas, l’utilisation de listes chaînées est plus performante en temps d’exécution que l’utilisation de tableaux, car le parcours d’une liste chaînée par un itérateur est plus rapide que le parcours d’un tableau par ses indices. De plus, les ensembles d’objets du modèle COR-E peuvent changer fréquemment de taille. Les listes chaînées ne nécessitent pas de ré-allouer de la mémoire suite à ces changements de taille, contrairement aux tableaux (la ré-allocation est faite automatiquement en Java, mais représente quand même un temps d’exécution supplémentaire). En revanche, les listes chaînées peuvent prendre davantage de place en mémoire parce qu’elles associent un pointeur à chaque élément. L’utilisateur du modèle peut choisir la structure de données qui convient le mieux à ses besoins.

La classe `Agent` Cette classe représente un agent générique doté de fonctions de base lui permettant de réaliser un ou plusieurs comportements déterminés par l’utilisateur de la simulation. Elle ne représente pas un agent affectif au sens de COR-E. Les comportements que doit effectuer un agent sont stockés dans la liste chaînée `behaviors`, qui est un attribut de la classe `Agent`. Tout agent exécute dans l’ordre, c’est-à-dire du premier élément au dernier élément, tout comportement appartenant à la liste `behaviors`. Cette liste doit contenir des instances de la classe `Behavior`, représentant un comportement. Un agent ne peut réaliser qu’un seul comportement à la fois. Aussi, les comportements de la liste `behaviors` sont exécutés les uns à la suite des autres.

Les méthodes principales de cette classe sont :

- `public void addFirstBehavior(Behavior behavior)` : cette méthode ajoute le comportement passé en paramètre en tête de la liste `behaviors`. Si avant cet ajout, il existe un comportement *c* en tête de liste qui a été démarré par l’agent (c’est-à-dire l’attribut `started` de *c* vaut `true`), alors *c* est interrompu. En effet, un agent ne peut réaliser qu’un comportement à la fois, et si un comportement est ajouté en tête de liste il est prioritaire sur les autres.
- `public void removeBehavior(Behavior behavior)` : cette méthode supprime de la liste `behaviors` le comportement passé en paramètre.
- `public void step(SimState state)` : cette méthode provient du simulateur `MASON` et est utilisée par le planificateur du simulateur (`Schedule`) pour appeler un agent. Les instructions se trouvant à l’intérieur de cette méthode sont alors exécutées. Dans la classe `Agent`, cette méthode contient l’instruction d’exécuter le premier comportement de la liste `behaviors` à l’aide de la méthode `execute()` de la classe `Behavior` que nous décrivons ci-après ;

- **Int2D location** : position de l'agent représentée par deux points de coordonnées (x, y) .

La classe Person Cette classe hérite de la classe **Agent**. Elle représente un agent affectif cherchant à acquérir des ressources désirées, et à protéger des ressources menacées. Un agent de cette classe est doté de plusieurs attributs :

- une instance **resourcesState** de la classe **ResourcesState**, représentant la structure de données contenant les ensembles de ressources de l'agent ;
- une instance **preferences** de la classe **Preferences**, représentant les préférences de l'agent ;
- une instance **memory** de la classe **Memory**, représentant la mémoire de l'agent ;
- une instance **affectiveState** de la classe **AffectiveState**, représentant le niveau de menace d'un agent ;
- une instance **perception** de la classe **Perception**, représentant la perception d'un agent.

Ces instances sont créées dès la création d'un agent **Person**. La destruction de l'agent entraîne la destruction de ces instances. Les méthodes principales de la classe **Person** sont :

- **public boolean processThreatenedResources()** : cette méthode examine les ressources menacées de l'agent, récupère les comportements de protection possibles réalisables par l'agent pour ces ressources menacées, et sélectionne le comportement de protection de valeur maximum positive. Si aucun comportement n'a été sélectionné, cette méthode renvoie la valeur **false**, sinon le comportement est exécuté par l'agent et elle renvoie la valeur **true**.
- **public boolean processDesiredResources()** : cette méthode examine les ressources désirées de l'agent, récupère les comportements d'acquisition possibles pour ces ressources désirées, et sélectionne le comportement d'acquisition de valeur maximum positive pour l'agent s'il en existe un. Si aucun comportement n'a été sélectionné, cette méthode renvoie la valeur **false**, sinon le comportement est exécuté par l'agent et elle renvoie la valeur **true**.
- **public void step(SimState state)** : cette méthode, héritée de la classe **Agent**, est réécrite pour la classe **Person**. La méthode **step(SimState state)** appelle d'abord la méthode **processThreatenedResources()**, puis si cette dernière retourne la valeur **false**, alors elle appelle la méthode **processDesiredResources()**.

La classe Group Cette classe hérite de la classe **Person**, et représente un groupe d'agents. Elle possède un attribut **agents** de type **LinkedList<Person>** contenant un ensemble d'agents, un attribut **groupFlag** de classe **Flag** héritant de **Resource**, représentant le drapeau du groupe, et un attribut **flagCarrier** de type **Person** qui représente l'agent portant le drapeau du groupe. Le drapeau n'est pas forcément représenté physiquement, il est avant tout utilisé pour situer la position du groupe, et cette position est utilisée pour déterminer si les comportements des agents dans le groupe peuvent être perçus par un agent extérieur au groupe (voir la description de la classe **Perception** ci-après). Comme la classe **Group** hérite de la classe **Person**, il est aussi possible de l'utiliser comme un agent autonome. Nous n'avons pas encore testé ce cadre d'utilisation avec COR-E, nous discutons cette aspect dans la partie perspectives de cette thèse. La méthode principale utilisée par cette classe est :

- **public void addAgent(Person agent)** : si l'agent **agent** passé en paramètre n'est pas déjà contenu dans la liste **agents**, cette méthode l'ajoute à la liste.

Cette classe contient également des attributs et des méthodes permettant de placer physiquement les agents du groupe dans un rectangle de coordonnées définies par l'utilisateur du modèle.

La classe `ResourcesState` Cette classe représente les ensembles de ressources d'un agent. Elle contient trois attributs qui sont chacun des instances de la classe `ResourceSet`. L'attribut `desiredResources` représente les ressources qui sont désirées par l'agent, l'attribut `acquiredResources` représente les ressources acquises, et `threatenedResources` représente les ressources menacées. Les méthodes principales de cette classe sont :

- `init()` : cette méthode crée les ensembles de ressources de la classe `ResourceSet` d'un agent, et les initialise selon la configuration de l'utilisateur du modèle.
- `public void addDesiredResource(Resource resource)` : ajoute l'objet `resource` à la structure de données `desiredResources`. Une ressource acquise par un agent ne peut pas être ajoutée à son ensemble de ressources désirées.
- `public void addAcquiredResource(Resource resource)` : cette méthode ajoute la ressource `resource` à la structure de données `acquiredResources`, puis appelle la méthode `removeDesiredResource(Resource resource)`. Une ressource acquise ne peut en effet plus être une ressource désirée.
- `public void addThreatenedResource(Resource resource, Behavior cause)` : ajoute la ressource `resource` à la structure de données `threatenedResources`, ainsi que le comportement `cause` étant la cause de la menace. Une ressource non acquise par un agent ne peut pas être ajoutée à son ensemble de ressources menacées.
- `public void removeDesiredResource(Resource resource)` : cette méthode supprime la ressource `resource` de la structure de données `desiredResources`.
- `public void removeAcquiredResource(Resource resource)` : cette méthode supprime la ressource `resource` de la structure de données `acquiredResources`. Elle peut être appelée lorsqu'un comportement ayant pour effet de faire perdre une ressource à un agent s'est terminé avec succès.
- `public void removeThreatenedResource(Resource resource)` : cette méthode supprime la ressource `resource` de la structure de données `threatenedResources`, ainsi que ses causes correspondantes. Cette méthode peut être appelée lorsqu'un comportement menaçant cette ressource se termine, et que la ressource n'est plus menacée par un autre comportement (ce peut-être vérifié grâce à un attribut de la ressource contenant les comportements menaçants).

La classe `ResourceSet` Cette classe représente un ensemble de ressources contenu par la classe `ResourcesState`. Elle contient une liste chaînée d'objets de type `Resource` nommée `resources`, et une liste chaînée d'objets de type `LinkedList<Behavior>` nommé `causes`. Un élément de la liste `causes` représente un ensemble de comportements, pouvant être vide, ayant causé l'inclusion d'une ressource dans l'ensemble `ResourceSet`. Une ressource est donc associée à un ensemble de comportements, ayant causé son inclusion dans l'instance de la classe `ResourceSet`. Les comportements associés à une ressource sont placés à la même position dans la liste `causes` que la ressource dans la liste `resources`.

Les méthodes principales de cette classe sont :

- `public void addResource(Resource resource, Behavior cause)` : si la ressource `resource` n'est pas contenue dans la liste `resources`, alors cette méthode ajoute `resource` en tête de cette liste, et crée un objet de type `LinkedList<Behavior>` contenant le comportement `cause` (y compris s'il vaut `null`), puis l'ajoute en tête de

- la liste `causes`. Sinon, la méthode ajoute le comportement `cause` à la liste des comportements située à la même position dans `causes` que `resource` dans `resources`.
- `public void removeResource(Resource resource)` : cette méthode supprime la ressource `resource` de la liste `resources`, et l'ensemble de comportements qui lui est associé dans la liste `causes`.
 - `public void removeCause(Resource resource, Behavior cause)` : cette méthode supprime le comportement `cause` de l'ensemble des comportements associés à la ressource `resource`.
 - `public LinkedList<Behavior> getCauses(Resource resource)` : cette méthode est utilisée pour récupérer les causes de la présence de la ressource `resource` dans la liste `resources`. La ressource `resource` passée en paramètre doit être incluse dans la liste `resources`. La méthode renvoie un ensemble de comportements, représentant les causes.

La classe `AffectiveState` Cette classe représente l'état affectif de l'agent auquel elle appartient. Elle détermine et actualise son niveau de menace. Elle contient deux attributs : `threatLevel`, qui est un entier non borné représentant le niveau de menace de l'agent, et `incrementFactor`, qui est entier inclus dans un intervalle $[0, 100]$ déterminant l'augmentation de la valeur `threatLevel`. Cette classe contient une méthode principale :

- `public void increaseThreatLevel()` : cette méthode détermine l'augmentation du niveau de menace d'un agent. Lorsqu'elle est appelée, cela signifie que la variable `threatLevel` a une chance d'être incrémentée d'une valeur de 1 (sauf si `incrementFactor` vaut 0). La probabilité que cette variable soit incrémentée est déterminée par la valeur de `incrementFactor` : un nombre `n` local à cette méthode est tiré aléatoirement entre 0 et 100, et si `n < incrementFactor`, alors la variable `threatLevel` augmente de 1. Plus la valeur de `incrementFactor` est haute, plus la valeur de `threatLevel` a des chances d'augmenter.

Le travail sur le niveau de menace étant préliminaire, il n'existe actuellement pas de méthode pour le faire baisser. Nos premiers résultats présentés au chapitre 7 indiquent que la variable `incrementFactor` doit être fixée à 1, mais ces résultats nécessitent d'être confirmés.

La classe `Memory` Cette classe représente la mémoire d'un agent, et lui permet de ne pas répéter certains comportements d'acquisition ayant échoué par le passé à cause du comportement de protection d'un autre agent. Cela peut se produire lorsqu'un agent essaye d'acquérir une ressource non partageable possédée par un autre agent, dans ce cas il s'agit d'un vol. Cette classe contient deux attributs, `abortedBehaviors`, qui représente une liste de comportements abandonnés par l'agent, et `abortedBecauseOf`, qui représente une liste de comportements ayant causé l'abandon des comportements de la liste `abortedBehaviors`. Un comportement de la liste `abortedBehaviors` et le comportement de la liste `abortedBecauseOf` ayant causé son abandon partagent tous les deux la même position dans leur liste, ce qui permet de les associer. Les méthodes principales de cette classe sont :

- `public void addAbortedBehavior(Behavior behavior, Behaviour cause)` : ajoute le comportement `behavior` abandonné par l'agent à la liste `abortedBehaviors`, et ajoute le comportement `cause` ayant causé cet abandon à la liste `abortedBecauseOf`. Ces comportements sont ajoutés chacun en tête de liste.
- `public boolean containsSimilarBehavior(Behavior behavior, LinkedList<Behavior> list)` : cette fonction détermine si le comportement `behavior` passé en

paramètre est similaire à un comportement contenu dans la liste de comportements `list`. Nous avons décrit la notion de comportement similaire au chapitre 5 section 5.3.2.4¹. S'il existe un comportement similaire dans la liste, alors la méthode renvoie la valeur `true`, sinon elle renvoie la valeur `false`.

- `private Behavior getAbortCause(Behavior behavior)` : cette méthode est utilisée pour récupérer la cause de l'abandon du comportement `behavior` dans la liste `abortedBecauseOf`. Le comportement `behavior` passé en paramètre doit être inclus dans la liste `abortedBehaviors`. La méthode renvoie un comportement représentant la cause. Elle est utilisée par la méthode `containsSimilarBehavior(Behavior behavior, LinkedList<Behavior> list)`.

La classe Perception Cette classe représente la perception d'un agent, elle lui permet de percevoir des comportements et des groupes. Elle comprend deux méthodes principales :

- `public LinkedList<Behavior> senseBehaviors()` : cette méthode renvoie la liste des comportements perceptibles par l'agent qui possède cette `Perception`. Pour rappel, un comportement réalisé par un agent i est perceptible par un agent j si la distance de perception minimum pour ce comportement est inférieure ou égale à la distance entre i et j . Le simulateur MASON fournit une méthode pour déterminer la distance entre deux agents placés sur une grille du simulateur. Dans le modèle COR-E, tous les objets de classe `Agent` et de ses sous-classes sont placés sur une grille.
- `public LinkedList<Group> senseGroups()` : cette méthode renvoie la liste des groupes perceptibles par l'agent qui possède cette `Perception`. Un agent de classe `Group` est perceptible par un agent de type `Person` si la distance minimum de perception `minPerceptionDistance` du drapeau du groupe `groupFlag` est inférieure à la distance entre l'agent `Person` et l'agent `flagCarrier` qui porte le drapeau dans le groupe.

La classe Preferences Cette classe représente les préférences d'un agent sur un ensemble de ressources de la simulation. Elle contient un attribut nommé `orderedResources` de type `LinkedList<LinkedList<Resource>`, représentant la liste des ressources classées par ordre de préférences. Plusieurs ressources peuvent être préférées par un agent de façon égale. Elle se trouvent alors à la même position dans la liste `orderedResources`. C'est pour cette raison que `orderedResources` est une liste de listes de ressources. Les méthodes principales contenues par cette classe sont :

- `public void init()` : cette méthode crée la liste de préférences `orderedResources` et l'initialise selon la configuration de l'utilisateur du modèle.
- `public int getResourceValue(Resource resource)` : cette méthode renvoie la valeur de la ressource `resource` du point de vue de l'agent possédant ces `Preferences`. Si l'objet `resource` n'est pas contenu dans la liste de préférences, alors cette méthode renvoie 0. Sinon, elle renvoie le résultat du calcul de la valeur de la ressource par rapport à sa position dans la liste. Nous avons défini ce calcul chapitre 5 section 5.3.1.3².

1. Pour rappel : soit un comportement d'acquisition c_1 permettant d'obtenir une ressource r_1 , et un comportement d'acquisition c_2 permettant d'obtenir une ressource r_2 , c_1 est similaire à c_2 si : $agent(c_1) = agent(c_2) \wedge type(r_1) = type(r_2) \wedge r_1 \in RA_j \wedge causeAbandon(c_2) = j$. Cette notion est utilisée pour représenter le fait que si un agent i a essayé de voler une ressource r d'un certain type à un agent j , mais qu'il n'a pas réussi parce que j l'en a empêché, i n'essayera plus de voler une ressource de ce type à j .

2. Pour rappel : la valeur d'une ressource r pour un agent i , notée $v(r, i)$, dépend du rang de cette ressource $rang(r, i)$ dans la relation $\succeq_i^{\mathcal{R}'}$, c'est-à-dire de sa position dans la liste `orderedResources`. Nous

La classe `Payoff` Cette classe représente les effets d'un comportement. Tout comportement de classe `Behavior` possède un attribut de la classe `Payoff`, et la destruction du comportement entraîne la destruction de cet attribut. La classe `Payoff` possède plusieurs attributs : une liste d'agents `agents` de type `LinkedList<Person>` contenant les agents auxquels les effets sont appliqués, et plusieurs listes d'effets de type `ArrayList<LinkedList<Resource>`. La position d'un ensemble de ressources dans une liste d'effets est associée à la position d'un agent dans la liste `agents`. Cela signifie que les effets placés en position n dans une liste d'effets sont appliqués à l'agent placé en position n dans la liste `agents`. Les listes d'effets sont les suivantes :

- `ArrayList<LinkedList<Resource>` `acquiredResourcesAtStart` : cette liste contient les ressources qui sont acquises lorsque le comportement commence.
- `ArrayList<LinkedList<Resource>` `lostResourcesAtStart` : cette liste contient les ressources qui sont perdues lorsque le comportement commence.
- `ArrayList<LinkedList<Resource>` `acquiredResourcesAtEnd` : cette liste contient les ressources qui sont acquises lorsque le comportement se termine avec succès, c'est-à-dire quand il a été complètement exécuté.
- `ArrayList<LinkedList<Resource>` `lostResourcesAtEnd` : cette liste contient les ressources qui sont perdues lorsque le comportement se termine avec succès.

La classe `Payoff` contient deux méthodes principales permettant d'appliquer les effets :

- `public void applyStartPayoff()` : cette méthode applique les effets de début de comportement. Pour appliquer ces effets, elle parcourt en parallèle les listes `agents`, `acquiredResourcesAtStart` et `lostResourcesAtStart`, et elle ajoute les ressources acquises et les ressources perdues pour chaque agent dans ses ensembles de ressources. De plus, elle parcourt aussi en parallèle la liste `lostResourcesAtEnd`, et ajoute ces ressources dans l'ensemble des ressources menacées des agents concernés. En effet, si un comportement a pour effet de fin de faire perdre une ressource, alors cette ressource est menacée pendant toute la durée du comportement.
- `public void applyEndPayoff()` : cette méthode applique les effets de fin de comportement. Pour appliquer ces effets, elle parcourt en parallèle les listes `agents`, `acquiredResourcesAtEnd` et `lostResourcesAtEnd`, et elle ajoute les ressources acquises et les ressources perdues pour chaque agent dans ses ensembles de ressources.

La classe `Behavior` Cette classe représente un comportement pouvant être réalisé par un agent de classe `Agent` où d'une de ses sous-classes. Elle comprend plusieurs attributs :

- `int duration` : représente la durée du comportement. Si `duration` vaut -1, cela signifie que le comportement ne se termine pas après une certaine durée mais d'après une condition propre au comportement (par exemple, l'agent doit se trouver en position (x, y) ;
- `Resource resource` : ressource dont l'état a déclenché la création de ce comportement. Il ne peut s'agir que d'une ressource étant/ayant été désirée ou menacée, que ce comportement a respectivement pour but d'acquérir ou de protéger ;
- `Agent agent` : agent réalisant le comportement ;
- `bool started` : vaut vrai si l'agent `agent` a démarré l'exécution du comportement, faux sinon ;
- `bool interrupted` : vaut vrai si le comportement a été interrompu avant d'être complètement exécuté, faux sinon ;

notons $maxRang(\succeq_i^{\mathcal{R}'})$ le rang maximum obtenu par une ressource r dans la relation $\succeq_i^{\mathcal{R}'}$, qui est ici égal à la taille de la liste `orderedResources`. Si $r \in \mathcal{R}'$, alors $v(r, i) = maxRang(\succeq_i^{\mathcal{R}'}) - rang(r, i) + 1$. Cela signifie que plus une ressource est préférée par un agent i , plus la valeur de la ressource est grande pour i .

- `bool terminated` : vaut vrai si le comportement est terminé, c'est-à-dire complètement exécuté ou abandonné, et faux sinon ;
- `bool aborted` : vaut vrai si l'agent `agent` a abandonné l'exécution du comportement, faux sinon ;
- `Payoff payoff` : effets du comportement ;
- `int minPerceptionDistance` : distance utilisée par la classe `Perception` pour savoir si ce comportement peut-être perçu par un agent `i` lorsqu'il est en cours de réalisation ;
- `bool collectiveBehavior` : vaut vrai s'il s'agit d'un comportement collectif, et faux sinon. Cet attribut doit être configuré directement dans les sous-classes de la classe `Behavior`. Par exemple, le comportement `manifester` représenté par une classe `Demonstrate` est un comportement collectif. Par défaut, cet attribut vaut faux.

Les méthodes principales de cette classe sont :

- `public int evaluate(Person agent)` : cette méthode évalue la valeur du comportement du point de vue de l'agent passé en paramètre, et renvoie cette valeur. Le calcul de la valeur d'un comportement est effectué grâce aux préférences `preferences` de l'agent, et grâce aux effets `payoff` du comportement. Le calcul de la valeur d'un comportement a été expliqué chapitre 5 section 5.3.2.2.
- `public boolean checkPreconditions()` : cette méthode vérifie si les préconditions du comportement sont remplies. Si oui elle renvoie la valeur `true`, si non elle renvoie `false`.
- `protected boolean execute()` : cette méthode réalise un pas d'exécution du comportement. Pour cela elle passe par plusieurs étapes. Tout d'abord, elle vérifie si les préconditions du comportement sont remplies. Pour cela, elle appelle la méthode `checkPreconditions()`, et poursuit son exécution si la valeur renvoyée par cette méthode est `true`. Sinon, elle appelle la méthode `abort(Behaviour cause)` avec la valeur `null` en paramètre, et renvoie la valeur `false`. Ensuite elle vérifie si le comportement a toujours lieu d'être exécuté, c'est-à-dire si la ressource `resource` est toujours désirée s'il s'agit d'un comportement d'acquisition, ou menacée s'il s'agit d'un comportement de protection. Si ce n'est pas le cas, alors elle appelle la méthode `abort(Behaviour cause)` avec la valeur `null` en paramètre, et renvoie la valeur `false`. Après cela, elle vérifie si un agent de la simulation essaye d'interrompre ce comportement au moyen d'un autre comportement, nommé `opponentBehavior`. Si c'est le cas, elle compare la valeur des deux comportements du point de vue de l'agent pour vérifier s'il vaut mieux abandonner le comportement ou le continuer (cette étape est décrite dans le chapitre 5 dans la section 5.3.2.4, partie sur l'abandon). Si le comportement doit être abandonné, alors la méthode `execute()` appelle la méthode `abort(Behaviour cause)` avec la valeur `null` en paramètre, et renvoie la valeur `false`. Pour finir, la méthode exécute le comportement sur un pas de temps. Si la variable `duration` a une valeur supérieure à 0, elle est décrémentée. Si elle vaut 0, le comportement se termine (appel de `terminate()`). Si la variable `duration` vaut -1, cela signifie que le comportement n'a pas de durée définie et qu'il se termine d'après d'autres conditions. Cette variable n'est alors pas décrémentée. La façon dont un comportement est exécuté est déterminée par la configuration de sa classe. Par exemple, pour un comportement de déplacement de classe `Move` héritant de la classe `Behavior`, l'exécution du comportement correspond à un déplacement de l'agent avec une vitesse et une direction déterminée, sur une durée correspondant à un pas de temps.
- `public boolean start()` : cette méthode démarre un comportement. Elle appelle

la méthode `execute()`. Si la valeur retournée par `execute()` vaut `true`, alors la méthode `applyStartPayoff()` est appelée, afin d'appliquer les effets de début du comportement, et la valeur `true` est affectée à la variable `started`. La méthode `start()` renvoie la valeur renvoyée par `execute()`.

- `public void achieve()` : cette méthode est appelée dans le cas où le comportement s'est terminé avec succès. Cela se produit si la durée de réalisation du comportement s'est complètement écoulée, ou si une condition propre au comportement est remplie (par exemple, arriver en position (x, y)). Elle appelle la méthode `terminate()` puis la méthode `applyEndPayoff()`.
- `public void terminate()` : cette méthode est chargée de mettre fin définitivement à un comportement. Elle affecte la valeur `true` à la variable `terminated`, et supprime le comportement de l'ensemble des comportements `behaviors` de l'agent `agent`.
- `public void abort(Behavior cause)` : cette méthode abandonne un comportement. Si la valeur `cause` est différente de `null`, alors le comportement abandonné et la cause de son abandon sont stockés dans la classe `Memory` appartenant à l'agent `agent`. Enfin, la méthode appelle la méthode `terminate()`.

La classe Resource Cette classe représente une ressource de l'environnement. Il est possible pour l'utilisateur du modèle de définir plusieurs sous-classes de la classe `Resource` correspondant à des ressources matérielles, sociales ou psychologiques. Par exemple nous avons défini des classes telles que `Reputation` représentant la réputation d'un agent, `Hamburger` représentant un hamburger, et `Health` représentant la santé d'un agent. La classe d'une ressource représente son type. La classe `Resource` comprend plusieurs attributs indiquant les propriétés de son type, sa position et la distance à laquelle elle peut-être perçue. Ces attributs sont :

- `protected boolean exclusive` : cet attribut vaut `true` si le type de la ressource (c'est-à-dire le nom de sa classe) est exclusif, et `false` sinon ;
- `protected boolean personal` : cet attribut vaut `true` si le type de la ressource est personnel, et `false` sinon ;
- `protected boolean shareable` : cet attribut vaut `true` si le type de la ressource est partageable, et `false` sinon ;
- `public int minPerceptionDistance` : distance utilisée par la classe `Perception` pour savoir si cette ressource peut-être perçue par un agent ;
- `Int2D location` : position de la ressource représentée par deux points de coordonnées (x, y) .

Les propriétés des types de ressources ont été expliqués chapitre 5 section 5.3.1.4. Les méthodes principales de la classe `Resource` sont :

- `public LinkedList<Behavior> getAcquisitionBehaviors(Person agent)` : cette méthode renvoie les comportements d'acquisition pour la ressource pouvant être réalisés par l'agent `agent`. La méthode crée et instancie les comportements.
- `public LinkedList<Behavior> getPrimaryProtecBehaviors(Person a, Behavior counteredBehavior)` : cette méthode renvoie les comportements de protection de type *attaque* pour la ressource pouvant être réalisés par l'agent `agent` en réaction contre le comportement `counteredBehavior`, qui doit être la cause de la menace. La méthode crée et instancie les comportements.
- `public LinkedList<Behavior> getSecondProtecBehaviors(Person a, Behavior counteredBehavior)` : cette méthode renvoie les comportements de protection de type *fuite* pour la ressource pouvant être réalisés par l'agent `agent` en réaction contre le comportement `counteredBehavior`, qui doit être la cause de la

menace. La méthode crée et instancie les comportements.

10.2.2.3 Planification de l'appel des agents

Pour chaque pas de temps de la simulation, les agents sont appelés par le `Scheduler` dans un ordre aléatoire et de façon séquentielle, chacun leur tour. Cela signifie qu'un agent i peut agir avant un agent j à un pas de simulation p , puis que j peut agir avant i au pas de temps suivant $p+1$. Lorsqu'un agent est appelé, il sélectionne et réalise immédiatement son comportement, avant l'appel au prochain agent. Nous avons opté pour cette méthode afin d'éviter des problèmes de conflit qui pourraient survenir si plusieurs agents agissaient en même temps. L'ordre d'appel aléatoire permet de ne pas toujours donner la priorité à certains agents plutôt qu'à d'autres pour réaliser leurs comportements.

10.3 Intégration au projet Terra Dynamica

10.3.1 Le projet Terra Dynamica

Le projet Terra Dynamica, soutenu par les pôles de compétitivité Cap Digital et Advancity, et sélectionné par le FUI (Fonds Unique Interministériel) 8, regroupe plusieurs partenaires industriels et académiques, dont en particulier THALES, porteur du projet, et l'UPMC (équipe Systèmes Multi-Agents du LIP6, dirigée par Amal El Fallah Seghrouchni, Professeur UPMC). Ce projet vise à développer les technologies permettant d'animer une ville virtuelle réaliste en la peuplant d'habitants et de véhicules réalisant leurs activités habituelles, mais aussi capables de réagir aux événements et de s'adapter aux évolutions de l'environnement de manière crédible. Les domaines d'application de ces technologies sont nombreux ; Terra Dynamica vise en particulier les applications liées à la sécurité, au jeu vidéo, à l'urbanisme, et aux transports. Le consortium inclut des partenaires spécifiques pour ces thématiques. En particulier, le laboratoire LIP6 de l'UPMC (équipe SMA), en collaboration avec THALES, se charge dans le noyau du moteur d'animation comportementale permettant de doter les agents (piétons, véhicules, etc.) de la simulation interactive d'une Intelligence Artificielle afin d'obtenir des comportements crédibles. Les défis technologiques sont nombreux, incluant par exemple le haut niveau d'interactivité visé et le nombre élevé d'agents à gérer, ce qui oriente vers des architectures d'agents autonomes pouvant gérer des granularités variables (individu, groupe, foule).

10.3.2 Architecture décisionnelle conçue au LIP6

L'architecture décisionnelle conçue pour le projet Terra Dynamica au sein du LIP6, intitulée FlexMex (de Sevin *et al.*, 2012), est prévue pour comporter plusieurs modules gérant des aspects différents du comportement des agents. Par exemple, elle peut gérer à la fois des comportements réactifs à court terme et des capacités cognitives à long terme. FlexMex a été conçue de façon à répondre aux contraintes du projet Terra Dynamica. Ces contraintes sont :

- la crédibilité des comportements des piétons : les piétons doivent avoir leur buts propres, réagir aux événements selon leurs caractéristiques individuelles, anticiper et planifier leurs comportements, etc.
- passage à l'échelle : le projet Terra Dynamica vise la simulation d'un grand nombre d'agents, il doit donc être possibles de simuler des milliers d'agents au même moment.
- temps-réel : il est nécessaire que les agents puissent répondre rapidement aux événements de leur environnement pour être crédibles

- définition d’une architecture générique : l’architecture et la plate-forme utilisées doivent être suffisamment générique pour convenir à plusieurs domaines d’application comme les jeux vidéo, la sécurité, les transports et l’urbanisme.

Pour répondre à ces contraintes, l’architecture FlexMex doit présenter les caractéristiques suivantes :

- flexibilité : l’architecture doit être capable de gérer des comportements réactifs simples, mais aussi des processus cognitifs plus complexes ;
- modularité : l’architecture doit pouvoir contenir plusieurs module gérant des aspects différents du comportement des agents. Le nombre et le type de ces modules ne doit pas être limité.
- cohérence : les modules doivent être indépendants et pouvoir fonctionner en parallèle. Il doit être possible d’activer ou de désactiver un module, sans que cela n’altère le fonctionnement des autres modules. Un module est spécialisé, et propose des comportements liés à sa spécialisation. Par exemple l’architecture peut contenir un module affectif proposant des comportements réactifs, et un module cognitif proposant des comportements délibératifs.
- généricité : cette propriété permet de pouvoir utiliser la même architecture pour plusieurs domaines d’application et plusieurs instanciations.

L’architecture est décomposée en *modules de haut niveau*, et en un *module décisionnel*. Un module de haut niveau envoie des propositions de comportements au module décisionnel, représentant les comportements sélectionnés par le module pour chaque agent. Le module décisionnel est chargé d’intégrer les propositions venant des différents modules de haut niveau, et de sélectionner le comportement qui sera finalement adopté par un agent. Des *modules de bas niveau* peuvent décomposer le comportement en plus petites unités d’action si nécessaire (par exemple, un module de navigation peut décomposer un trajet en plusieurs parties). Un module de haut niveau peut être spécialisé dans les comportements affectifs, et ainsi envoyer des comportements de type affectif, ou encore spécialisé dans la coordination, et envoyer des comportements de type coordination. Les modules travaillent en parallèle. Ils peuvent échanger des informations, mais ne s’influencent pas les uns les autres. Par exemple, un module de type cognitif n’inhibera pas un module chargé de gérer des comportements réactifs. Il n’existe pas non plus de priorités entre les modules, c’est-à-dire qu’un module réactif n’a pas la priorité face à un module cognitif, comme c’est le cas dans d’autres architectures (pour plus de détails, se reporter aux références citées par de Sevin *et al.* (2012)). Cette architecture permet au module décisionnel de pouvoir accéder à tout moment aux propositions faites par les différents modules de haut niveau, sans subir de perte d’information. Elle peut ainsi s’adapter très rapidement à toute nouvelle situation, ce qui garantit sa *flexibilité*. D’autre part, comme les modules de haut niveau sont indépendants, il est possible de les activer ou de les désactiver à tout moment, sans que cela ne perturbe le fonctionnement de l’architecture. Pour certaines applications, on peut vouloir ne conserver que quelques modules, pour des contraintes d’optimisation, ou parce qu’ils sont plus pertinents que d’autres. FlexMex donne cette possibilité grâce à sa *modularité*. Comme les modules n’exercent pas d’influence les uns sur les autres, l’architecture permet également d’obtenir plus facilement des comportements *cohérents*. En effet, la modélisation de relations d’inhibition ou d’excitation entre modules requiert de déterminer des variables numériques, et de les paramétrer en parvenant à contrôler leurs effets. Cette tâche peut s’avérer difficile pour l’utilisateur du modèle. L’architecture FlexMex, comme le modèle COR-E, cherche à garantir le contrôle des effets de la configuration du modèle sur les comportements produits, tout en simplifiant la configuration de l’architecture. Enfin, FlexMex est une architecture *générique*, ne dépendant pas d’un cadre d’application

donné. Elle doit pouvoir être instanciée sur des domaines d'application aussi variés que la sécurité, les jeux vidéos, les transports ou l'urbanisme.

10.3.3 Application de l'architecture FlexMex au projet Terra Dynamica

10.3.3.1 Modules de haut niveau et bas niveau

Dans le cadre du projet Terra Dynamica, 4 modules de haut niveau ont été définis pour l'architecture FlexMex :

- **module motivationnel** : le module motivationnel propose des comportements en relation avec les variables internes d'un agent, comme son niveau d'énergie. C'est un module réactif, fonctionnant sur le principe de l'homéostasie qui pousse les agents à satisfaire leurs motivations courantes, leur donnant une certaine autonomie.
- **module affectif** : le module affectif correspond au modèle COR-E défini dans cette thèse. Il propose des comportements affectifs en réaction aux événements de l'environnement, et en tenant compte des caractéristiques individuelles des agents. Il s'agit également d'un module réactif.
- **module cognitif** : ce module est chargé d'élaborer des plans pour atteindre des buts. Il est doté de capacité d'anticipation et de planification à long terme.
- **module de coordination** : ce module est chargé de gérer la coordination de plusieurs agents souhaitant atteindre un but commun. Plus particulièrement, ce module est chargé de gérer les patrouilles d'agents. Le modèle de patrouille utilisé a été conçu par Poulet *et al.* (2012).

Ces modules reçoivent des informations sur l'état de l'environnement, et effectuent leurs propres calculs pour aboutir à des propositions de comportements. Ces propositions sont transmises au module décisionnel.

Il existe également deux modules de bas niveau :

- **module de navigation spatiale** : ce module est chargé de planifier le trajet d'un agent pour se rendre d'un point à un autre de l'environnement. Ce module est décrit par Harkouken-Saiah *et al.* (2011).
- **module interaction** : ce module est chargé d'exécuter les actions transmises par le module décisionnel, impliquant des interactions avec l'environnement ou les autres agents. Par exemple il peut être chargé de l'exécution d'une action comme « acheter un ticket ».

Enfin, un **module environnement** permet de transmettre des informations provenant de l'environnement à tous les autres modules, en indiquant par exemple où peut se rendre un agent pour manger, où si un feu a été déclaré à proximité. Ce module est décrit par Harkouken-Saiah *et al.* (2011, 2012).

Un schéma de l'organisation des différents modules dans l'architecture est montré sur la figure 10.4. L'architecture FlexMex et l'intégration des modules pour le projet Terra Dynamica sont actuellement en cours de développement.

10.3.3.2 Exemple d'application dans un scénario

Deux scénarios d'application sont cités par de Sevin *et al.* (2012) pour le projet Terra Dynamica, qui illustrent le rôle de chaque module au sein de l'architecture FlexMex. Les auteurs donnent en particulier l'exemple d'un scénario de manifestation, dans lequel on souhaite modéliser un groupe violent et des brigades de policiers. Le travail que nous avons présenté sur la simulation des groupes au chapitre 9 s'intègre parfaitement dans ce cadre d'application. Ce scénario peut être utilisé par la police pour gérer des groupes de

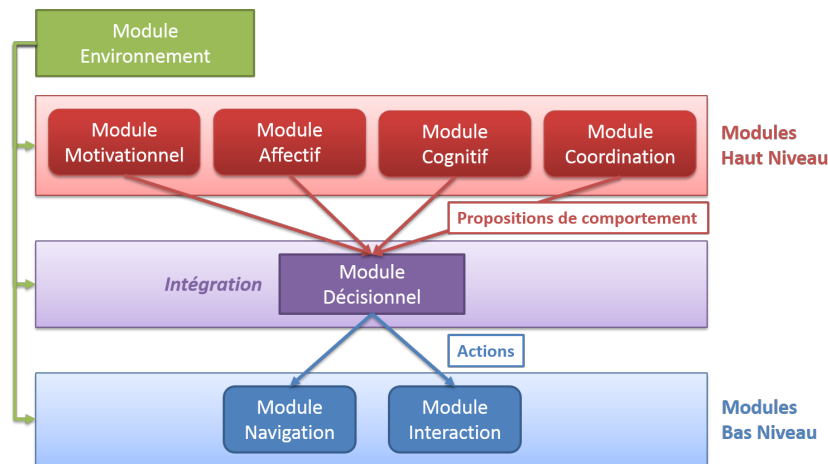


FIGURE 10.4 – Organisation des modules dans le Projet Terra Dynamica

manifestants en situation de simulation, de façon à mieux anticiper les actions possibles dans à une situation réelle. Le rôle de chaque module dans ce scénario peut être décrit de la façon suivante :

- **module affectif (géré par COR-E)** : ce module permet aux manifestants de rejoindre un groupe en fonction de leurs préférences individuelles, en choisissant par exemple de manifester de façon pacifique ou de façon violente. Il peut être désactivé pour les agents représentant des policiers, qui agissent davantage selon leur rôle et leur compétence.
- **module cognitif** : ce module peut anticiper l'évolution de la manifestation, et les actions des policiers et des manifestants. Il peut permettre au policiers de réaliser des actions requérant de la planification, comme arrêter un individu.
- **module de coordination** : ce module peut être utilisé par les manifestants pour coordonner leurs actions, ou par les policiers pour effectuer des patrouilles.
- **module motivationnel** : ce module peut-être utilisé pour satisfaire les motivations répondant aux besoins internes de chaque agent.

Dans ce scénario, le modèle COR-E, représentant le module affectif, transmettrait au module de décision les comportements sélectionnés pour chaque agent s'il y en a. Un comportement transmis pourrait être par exemple "rejoindre le groupe violent", ayant été sélectionné dans le module affectif par un agent i . Le module de décision prendrait cette proposition de comportement en compte, avec toutes les autres propositions de comportement transmises par les autres modules de haut niveau, et serait chargé de déterminer le comportement finalement adopté par i . Si le comportement sélectionné par le module décisionnel pour i est "rejoindre le groupe violent", alors le module décisionnel demanderait au module de navigation de déterminer le trajet de l'agent i jusqu'au groupe violent et de l'exécuter.

10.3.4 Utilisation du Module Affectif dans le projet Terra Dynamica

Le travail que nous avons présenté dans les chapitres 6, 7, 8, et 9 a été réalisé grâce à l'implémentation du prototype du modèle COR-E, que nous avons décrite section 10.2. Afin d'être utilisé dans le projet Terra Dynamica, ce modèle a été implémenté dans la plate-forme du projet, où il représente le Module Affectif du projet. Cette implémentation présente des différences avec l'implémentation du prototype concernant la sélection du comportement. Ces différences portent sur les points suivants :

- **propositions de comportements** : dans le projet Terra Dynamica, chaque module de haut niveau propose un ensemble de comportements qui seront traités par le Module Décisionnel. Afin de donner davantage de choix au Module Décisionnel, le Module Affectif envoie jusqu'à trois propositions de comportements pour chaque agent. Cela permet d'augmenter les chances qu'un comportement du Module Affectif soit pris en compte, si jamais le Module Décisionnel ne sélectionnait pas un des comportements proposés. Par exemple, dans le cas où le Module Affectif propose au Module Décisionnel les comportements « sauver l'enfant », « sauver le chien » ou « fuir » pour un agent i , si le Module Décisionnel ne sélectionne pas « sauver l'enfant » en raison d'une contrainte particulière, il pourrait toujours sélectionner les comportements « sauver le chien » ou « fuir », ce qui permettrait à l'agent i d'adopter un comportement affectif dans cette situation. Les comportements envoyés pour chaque agent i sont les comportements de valeur maximale positive tout agent $i \in \mathcal{A}$. S'il y a plus de trois comportements de valeur maximale positive pour i , alors trois comportements sont tirés aléatoirement parmi ces comportements de valeur maximale avant d'être envoyés au Module Décisionnel.
- **exécution parallèle des comportements des agents** : contrairement à l'implémentation du prototype de COR-E que nous avons réalisée, dans le projet Terra Dynamica les agents n'agissent pas chacun leur tour mais en même temps. Cela signifie qu'il peut y avoir des conflits, par exemple si au même moment deux agents se déplacent au même endroit pour prendre une place dans une file d'attente, ou s'ils cherchent à déplacer la même valise pour la sauver des flammes. L'implémentation de la plate-forme du LIP6 emploie donc des processus de gestion de conflit, qui empêchent un agent de sélectionner un comportement entrant en conflit avec le comportement sélectionné par un autre agent.
- **communication avec les autres modules** : nous avons expliqué que le Module Affectif de la plate-forme communique ses propositions de comportements au Module Décisionnel. Il peut aussi demander et recevoir des informations en échangeant avec le Module Environnement. Ce module est chargé de gérer la représentation sémantique de l'environnement du point de vue d'un agent, et de fournir des informations spécifiques demandées par les autres modules. Par exemple, dans le cas où un agent du Module Affectif examine le comportement « éteindre le feu », il doit déterminer s'il existe un objet dans son environnement lui permettant d'éteindre le feu. Il va alors faire une requête au Module Environnement pour lui demander si un tel objet existe, et attendre sa réponse pour déterminer si le comportement « éteindre le feu » peut être réalisé. Le Module Environnement peut aussi envoyer spontanément des informations à d'autres modules, pour les informer par exemple qu'une poubelle est en feu à proximité. Dans le Module Affectif, la signalisation d'un événement « poubelle en feu » sera interprétée comme une menace sur les agents et les objets se trouvant autour du point de coordonnées de cet événement.

La plate-forme du projet Terra Dynamica contient un Module Motivationnel, qui est chargé de gérer les besoins internes d'un agent comme la faim et la soif, et de proposer des comportements motivés par ces besoins comme « se nourrir » ou « boire ». Ce type de comportement peut également être proposé par le Module Affectif, si on souhaite par exemple représenter les préférences affectives d'un agent pour une nourriture plutôt qu'une autre. D'autres comportements sont plus spécifiques au Module Affectif, comme les comportements de *protection* concernant différentes ressources, et les comportements d'acquisition concernant des ressources socio-psychologiques, comme la réputation. Ce module, correspondant au modèle COR-E, permet de proposer des comportements de

protection cohérents avec les préférences des agents sur les ressources de l'environnement. Par exemple, si un incendie se déclare à proximité d'un agent représentant un enfant, les agents aux alentours prendront en compte l'importance qu'ils accordent à la « vie d'un enfant » dans le choix de leur comportement, ou même éventuellement de l'importance qu'ils accordent à leur réputation. Pour un homme politique se trouvant sur le lieu de l'incendie « sauver un enfant » lui permettra de gagner la « réputation », qui est un type de ressource très important à ses yeux. Ces comportements proposés par le Module Affectif se différencient donc des comportements de type réflexe pouvant être proposés par d'autres modules (par exemple un comportement de fuite qui serait déclenché automatiquement par l'événement « feu de poubelle »). Dans la section suivante, nous donnons un exemple concret de comportements pouvant être gérés le Module Affectif.

10.3.5 Exemple sur un scénario en cours de configuration

Le scénario que nous présentons dans cette section est en cours de configuration dans la plate-forme Terra Dynamica. Il peut donc être sujet à modification jusqu'à la réalisation complète de ce travail, et à la suite des phases de test. Il s'agit d'un scénario où des agents marchent dans la rue, quand un feu de poubelle se déclare dans l'environnement. Juste à côté du feu se trouve une poussette sur laquelle est assise un enfant qui se trouve seul, et une valise. Les agents peuvent alors adopter des comportements différents, selon qu'ils perçoivent ou non cet événement, et selon leurs caractéristiques individuelles. La représentation des comportements dans le Module Décisionnel comprend des comportements de haut niveau, et des actions qui sont des représentations plus spécifiques de ces comportements. Les comportements que peuvent proposer les différents modules de haut niveau au Module Décisionnel dans ce scénario sont les suivants :

- se nourrir : peut être réalisé avec les actions « manger dans un restaurant » ou « manger dans un fast-food » ;
- s'hydrater : peut être réalisé avec les actions « boire un café dans une brasserie » ou « boire un soda dans une brasserie » ;
- se reposer : peut être réalisé avec les actions « se détendre dans un café », « s'asseoir sur un banc », ou « rentrer chez soi » ;
- se divertir : peut être réalisé avec les actions « aller au cinéma » ou « aller dans une librairie » ;
- obtenir de l'argent : peut être réalisé avec l'action « retirer de l'argent dans un distributeur » ;
- jeter un objet : peut être réalisé avec l'action « jeter un objet dans une poubelle » ;
- protéger quelqu'un ou quelque chose : peut être réalisé avec les actions « protéger une valise » ou « protéger un bébé » ;
- éteindre le feu : peut être réalisé avec les actions « éteindre avec un extincteur », « éteindre avec de l'eau » ou « éteindre avec du sable » ;
- éviter le feu : peut être réalisé avec les actions « éviter le feu » ;
- regarder le feu : peut être réalisé avec l'action « regarder le feu ».

Le Module Affectif, comme tous les autres modules, doit avoir sa propre représentation des comportements qu'il souhaite pouvoir proposer au Module Décisionnel. Il faut aussi définir tous les éléments nécessaires à la prise en charge de ces comportements dans ce module (ressources, préférences, interprétations des événements de l'environnement en menaces). Nous expliquons ci-après comment nous avons effectué ces représentations. Le scénario étant en cours de configuration, les éléments que nous allons décrire peuvent évoluer. Des comportements et des ressources peuvent éventuellement être ajoutés ou supprimés, et des préférences peuvent être modifiées.

10.3.6 Représentation du scénario dans le Module Affectif

Ressources Les ressources configurées pour ce scénario sont :

- **la santé des agents** : il existe plusieurs instances de ressources de type *Sante*, et chaque agent en possède une par défaut. $\forall i \in \mathcal{A}, sante_i \in RA_i \wedge type(sante_i) = Sante$. Cette ressource est *personnelle* ($personnel_{sante} = vrai$), ce qui signifie qu'elle est automatiquement désirée par un agent lorsque ce dernier la perd ;
- **un bébé** : il existe au moins une ressource *bebe* de type *Bebe* représentant un bébé en poussette, ne pouvant se déplacer seul, qui est possédée par un agent $j \in \mathcal{A}$ de la simulation. Le *bebe* se trouvera à proximité de l'événement « feu de poubelle » lorsqu'il sera déclaré. $bebe \in RA_j \wedge type(bebe) = Bebe$;
- **une valise** : il existe au moins une ressource *valise* de type *Valise* représentant une valise posée par terre, qui est possédée par un agent $j \in \mathcal{A}$ de la simulation. La *valise* se trouvera à proximité de l'événement « feu de poubelle » lorsqu'il sera déclaré. $valise \in RA_j \wedge type(valise) = Valise$;
- **du bien-être** : il existe plusieurs instances de ressources de type *Bien – Etre*, représentant le bien-être d'un agent, et chaque agent en possède une par défaut. $\forall i \in \mathcal{A}, bien - etre_i \in RA_i \wedge type(bien - etre_i) = Bien - Etre$. Cette ressource est *personnelle* ($personnel_{Bien-Etre} = vrai$), ce qui signifie qu'elle est automatiquement désirée par un agent lorsque ce dernier la perd.
- **des ressources culturelles cinématographiques** : il existe des ressources culturelles de type *CultureCinema* représentant une culture cinématographique pouvant être acquise par un agent. Chaque instance de ce type peut par exemple représenter un film. Ces ressources sont partageables ($partageable_{CultureCinema} = vrai$), car tous les agents ayant vu le même film ont la même instance de ressource acquise (cela évite de multiplier les ressources dans l'environnement de simulation) ;
- **des ressources culturelles littéraires** : il existe des ressources culturelles de type *CultureLitteraire* représentant une culture littéraire. Chaque instance de ce type peut par exemple représenter un livre. Ces ressources sont partageables, car tous les agents ayant lu le même livre ont la même instance de ressource acquise ($partageable_{CultureLitteraire} = vrai$) ;

Comportements Le Module Affectif modélise un sous-ensemble des comportements représentés dans le Module Décisionnel, avec la représentation propre au modèle COR-E :

- *eviterFeu(i)* : permet à un agent $i \in \mathcal{A}$ d'éviter un feu de type « feu de poubelle », dans le but de protéger sa ressource de type *Sante*. $R_{eviterFeu(i)}^{termo}(i) = \{sante_i\}$;
- *protéger(i)* : permet à un agent $i \in \mathcal{A}$ d'emmener une ressource r de type *Bebe* ou *Valise* loin du feu, dans le but de protéger cette ressource. $R_{protéger(i)}^{termo}(i) = \{r\}$;
- *seDivertirAuCinema(i)* : permet à un agent $i \in \mathcal{A}$ de se divertir, dans le but de gagner la ressource *bien – etre_i* de type *Bien – Etre*, et lui permet d'acquérir une ressource *cultureCinema* de type *CultureCinema*. $R_{seDivertirAuCinema(i)}^{+termo}(i) = \{bien - etre_i, cultureCinema\}$;
- *seDivertirEnLibrairie(i)* : permet à un agent $i \in \mathcal{A}$ de se divertir, dans le but de gagner la ressource *bien – etre_i* de type *Bien – Etre*, et lui permet d'acquérir une ressource *cultureLitteraire* de type *CultureLitteraire*. $R_{seDivertirEnLibrairie(i)}^{+termo}(i) = \{bien - etre_i, cultureLitteraire\}$

Initialisation Chaque agent possède une ressource de type *Sante*, et quelques agents désirent une ressource de bien-être qu'ils n'ont plus dans leurs ressources acquises. $\forall i \in \mathcal{A}$,

$sante_i \in RA_i, \forall i \in \mathcal{A}' \subset \mathcal{A}, bien - etre_i \in RD_i \wedge bien - etre_i \notin RA_i, \forall i \in \mathcal{A} - \mathcal{A}'$, $bien - etre_i \in RA_i$. Pour la plupart des agents, les préférences d'un agent i peuvent être configurées de sorte que $bebe \succ_i^{\mathcal{R}'} sante_i \succ_i^{\mathcal{R}'} valise$, c'est-à-dire que protéger le bébé sera plus important que protéger leur propre santé, et protéger leur propre santé sera plus important que protéger la valise. Pour quelques agents, leur santé pourra être plus importante que le bébé. En revanche, un ordre de préférences où la valise serait préférée à la santé de l'agent ou au bébé ne devrait a priori pas être utilisé, car il serait peu crédible. Les préférences entre les ressources de type *CultureLivre* et *CultureCinema* peuvent être tirées aléatoirement entre les agents.

Prévision du déroulement du scénario Ce scénario n'a pas encore été complètement configuré dans la plate-forme du projet, et il est encore en développement. Nous pouvons toutefois anticiper en partie comment il va se dérouler. Tout d'abord, tant que le feu ne sera pas déclaré, des passants marcheront dans la rue pour atteindre certains buts. Le Module Affectif va proposer les comportements « se divertir en librairie » ou « se divertir au cinéma » pour les agents désirant une ressource de bien-être, en fonction de leurs préférences entre la culture littéraire ou la culture cinématographique. Si le Module Décisionnel sélectionne des comportements proposés par le Module Affectif, nous pourrions observer des agents se rendre au cinéma ou dans une librairie en fonction de leurs préférences. Une image représentant un livre ou une pellicule de film sera normalement affichée dans une bulle au dessus de leur tête pour représenter leur choix. Lorsque le feu de poubelle va se déclencher, le Module Environnement va transmettre cette information au Module Affectif, et signaler quels agents et quelles ressources sont à proximité (le *bebe* et la *valise*). Le Module Affectif va interpréter ces informations, en mettant à jour l'ensemble des ressources menacées de chaque agent. C'est-à-dire que pour l'agent i possédant la ressource *bebe*, $RM_i \leftarrow bebe$, pour l'agent j possédant la ressource *valise*, $RM_j \leftarrow valise$, et pour tout agent k à proximité du feu $RM_k \leftarrow sante_k$. Ces menaces vont être perçues par les agents à proximité, représentés par un ensemble $\mathcal{A}' \in \mathcal{A}$, de sorte que $\forall k \in \mathcal{A}', P_k(RM_j) = RM_j$, $P_k(RM_i) = RM_i$, et $sante_k \in P_k(RM_k)$. Les agents de l'ensemble \mathcal{A}' pour qui les ressources *valise* et *bebe* ont une valeur > 0 vont tenter d'engager des comportements de protection pour sauver ces ressources. Si parmi ces agents certains allaient au cinéma ou à la librairie, ces comportements de divertissement ne seront pas proposés par le Module Affectif. En effet dans le modèle COR-E, la protection d'une ressource menacée est prioritaire par rapport à l'acquisition d'une ressource désirée. Les comportements proposés par le Module Affectif seront donc « éviter le feu », « protéger l'enfant » ou « protéger la valise », qui auront une valeur différente en fonction des préférences de chaque agent. Si le Module Décisionnel sélectionne ces comportements, des agents iront donc mettre le *bebe* et la *valise* en sécurité, tandis que d'autres éviteront simplement le feu.

10.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'implémentation du prototype du modèle COR-E, ayant été utilisée pour les évaluations présentées dans cette thèse. Nous avons développé ce prototype avec le simulateur MASON (Luke *et al.*, 2005), conçu pour la simulation de systèmes multi-agents. L'architecture générale de l'implémentation de COR-E est organisée autour de classes d'agents, de comportements, et de ressources. Un agent a des attributs personnels comme ses préférences, représentées par une classe qui lui est propre et qui ne peut exister en dehors de cette agent. L'utilisateur du modèle peut ajouter des classes de ressources et des comportements, en les faisant hériter des classes *Resource* et

Behavior. Il peut aussi configurer les préférences d'un agent en créant ses propres listes de préférences pour la classe `Preferences`, et configurer l'état initial des ressources de la simulation du point de vue d'un agent en manipulant la classe `ResourcesState` de cet agent.

Nous avons également présenté le projet Terra Dynamica, et l'architecture décisionnelle développée au LIP6 par de Sevin *et al.* (2012) dans laquelle le modèle COR-E est intégré. Cette architecture peut gérer plusieurs modules traitant des aspects différents intervenant dans le choix du comportement des agents, comme des capacités cognitives ou réactives. Son originalité est de permettre à chaque module de fonctionner en parallèle sans dépendre d'autres modules, et d'intégrer les propositions de comportements de chacun de ces modules grâce à un module décisionnel. Nous avons également présenté comment le modèle COR-E a été intégré à la plate-forme du projet, sous le nom de Module Affectif, et nous avons détaillé un scénario de simulation en cours de développement sur cette plate-forme.

Perspectives

Il existe plusieurs perspectives découlant de la thèse que nous avons présentée. La théorie COR n'avait pas encore utilisée dans le cadre d'une implémentation, et nous n'en avons repris que les principes de base. Cette théorie contient d'autres concepts qui pourraient donner lieu à un modèle plus complet, sur des aspects tels que la simulation de groupes ou le processus de sélection d'un comportement. Nous présentons quelques perspectives de travaux à court terme, moyen terme et long terme pouvant être développées.

Perspectives à court terme

Simulation des groupes

Les perspectives envisageables à plus court terme concernent la simulation des groupes, dont nous avons proposé un modèle préliminaire au chapitre 9.

Nous avons défini deux algorithmes permettant aux agents de rejoindre et quitter un groupe en fonction des comportements collectifs adoptés par le groupe. Seul l'algorithme permettant de rejoindre un groupe a été implémenté et testé. L'algorithme permettant de quitter un groupe doit également être implémenté et testé. Pour cela, il est nécessaire de provoquer l'apparition de conditions provoquant le départ d'un ou plusieurs agents du groupe. Un agent peut changer de comportement, et donc quitter un groupe, dans trois cas : lorsque l'état de ses ressources change, lorsque les autres agents du groupe changent de comportement, ou lorsque ses préférences changent. Comme le modèle COR-E ne permet actuellement pas de faire varier les préférences d'un agent en cours de simulation, il faut introduire un changement dans l'état des ressources d'un ou plusieurs agents. Par exemple, nous pouvons simuler l'arrivée d'une patrouille de police à proximité d'un groupe de manifestants, qui va représenter une menace pour les ressources de certains agents de ce groupe. Cette menace va déclencher ainsi de nouveaux comportements, comme l'agression ou fuite. Ce changement peut aussi concerner l'entrée d'un individu dans un groupe, puisqu'il peut être intéressé par les nouveaux comportements adoptés par les membres du groupe et les rejoindre. Ces mécanismes d'entrée et de sortie de groupe pourront être évalués grâce à des observateurs humains pour déterminer si les comportements obtenus sont jugés émotionnels et crédibles, au moyen des protocoles d'évaluation utilisés dans cette thèse.

D'autre part, les groupes sont actuellement créés par l'utilisateur du modèle dès le début de la simulation, et il n'existe pas de processus de formation de groupe. Nous pourrions proposer un algorithme de formation de groupe, qui permettrait aux agents de se rassembler pour acquérir ou protéger des ressources grâce à la réalisation de comportements collectifs. Pour cela, nous proposons de définir des points de rencontre dans l'environnement, auxquels les agents peuvent se rendre lorsqu'ils souhaitent réaliser un comportement collectif. Tout agent présent au point de rencontre aura accès à une base

de données contenant des propositions de comportements collectifs. Cette structure de données lui permettra : (i) de s'inscrire à un comportement collectif qu'il souhaite réaliser, (ii) de proposer un comportement collectif qu'il souhaite réaliser mais qui n'est pas encore présent dans la base, (iii) de se désinscrire à un comportement collectif qu'il ne souhaite plus réaliser. La base de données sera cachée à l'observateur de la simulation, et le processus d'inscription peut être simplement représenté par des agents en train de discuter. La formation d'un groupe peut être décidée selon deux critères : (i) lorsqu'une proposition de comportement collectif c atteint un nombre n d'agents inscrits, alors un groupe contenant tous les agents inscrits à c est créé, et c peut démarrer, (ii) lorsqu'un intervalle de temps t s'est écoulé après le moment de l'ajout d'une proposition de comportement collectif c dans la base, alors un groupe contenant tous les agents inscrits à c est créé, et c peut démarrer. Il est aussi possible de combiner les deux critères. Dans ce cas, un groupe ne pourra être créé qu'après une certaine durée à partir de l'ajout d'un comportement collectif c dans la base, et si un nombre minimum de n agents sont inscrits à c . Un agent se rendra au point de rencontre uniquement s'il n'a pas perçu de groupe dans lequel il peut réaliser le comportement collectif souhaité. Ce travail sur la formation de groupe est lié à des processus de type délibératif, ce qui élargit l'application du modèle COR-E, jusque là utilisé pour la simulation de comportements réactifs. Mais on peut également envisager des processus de formation de groupe de type réactifs. Par exemple, si un accident de voiture survient sur une route et qu'un piéton se retrouve bloqué sous la voiture, un agent à proximité qui perçoit cet accident pourrait lancer un appel à d'autres agents afin de pouvoir soulever la voiture, sans se rendre auparavant dans un point de rencontre. Dans ce cas, si des agents répondent à cet appel, il s'agira d'une formation de groupe de type réactive, correspondant à un besoin urgent.

Afin de simuler des groupes, nous avons introduit la notion de comportement collectif dans le modèle COR-E. Toutefois, nous n'avons pas considéré les ressources du groupe. En effet, un individu rejoignant un groupe peut acquérir de nouvelles ressources propres au groupe, comme une meilleure protection, un réseau de relations, de la nourriture, du matériel, de la reconnaissance, ou davantage de force physique pour impressionner son adversaire. L'acquisition ou la protection d'une ressource peut motiver un agent à rejoindre un groupe, sans qu'il ne cherche à effectuer de comportement collectif au sein de ce groupe. Afin de prendre cet aspect en compte, il est nécessaire que le groupe puisse posséder des ressources, qu'elles soient partageables par les agents du groupe, et qu'elles soient perçues par les agents à l'extérieur du groupe. Ces ressources pourront alors être acquises par un agent grâce au comportement « rejoindre le groupe ». Cela nécessite peu de modifications dans le modèle COR-E, car un groupe est implémenté de la même façon qu'un agent, ce qui signifie qu'il peut posséder des ressources. Le comportement « rejoindre le groupe » doit être implémenté de sorte que son effet soit de faire acquérir les ressources du groupe à un agent. Avec ces simples modifications, un agent aura la capacité de rejoindre un groupe en fonction des ressources possédées par le groupe. Afin de prendre en compte à la fois la notion de ressources possédées par le groupe, et la notion de comportements collectifs réalisés par le groupe, il est nécessaire d'intégrer ces deux aspects au calcul de la valeur d'un groupe du point de vue d'un agent. Pour cela, on peut envisager que la valeur du groupe corresponde à la somme de (i) la valeur des comportements collectifs du groupe du point de vue de l'agent et (ii) la valeur des ressources possédées par le groupe du point de vue de l'agent. Il faut également prévoir le comportement « quitter le groupe », dont les effets seront de faire perdre à l'agent réalisant ce comportement les ressources offertes par le groupe.

Dans le modèle COR-E, la décision d'un agent de rejoindre ou non un groupe est

actuellement fondée sur les comportements des agents du groupe, et plus précisément sur la valeur de ces comportements. La valeur d'un comportement collectif du point de vue d'un agent est proportionnelle au nombre d'agents qui réalisent ce comportement. Plus il y a d'agents du groupe réalisant ce comportement, plus ce comportement prend de valeur. Ce choix de calcul que nous avons fait peut être affiné davantage, car il comporte des limites. Prenons l'exemple où un agent i , extérieur à un groupe, observe un seul agent dans le groupe réaliser un comportement c_1 ayant une valeur fortement négative pour i , et 50 agents dans le groupe réaliser un comportement c_2 ayant une valeur positive pour i . Le comportement c_1 pourrait être « menacer la vie de quelqu'un » avec une valeur de -120, et le comportement c_2 pourrait être « manifester » avec une valeur de 12. Avec notre méthode de calcul, l'agent i choisira de rejoindre ce groupe, car la valeur du groupe du point de vue de i serait $-120 * 1 + 12 * 50 = 408$. Pourtant on peut imaginer qu'un individu pourrait décider de ne pas rejoindre ce groupe en raison de la gravité de l'acte commis par un de ses membres, qui est « menacer la vie de quelqu'un ». Afin de pouvoir représenter une telle situation, au moins deux méthodes sont envisageables. La première consisterait à déterminer un seuil de valeur négative α , et à faire en sorte que s'il existe un comportement réalisé dans un groupe dont la valeur pour i est inférieure à α , alors i ne rejoint pas ce groupe. Une deuxième méthode consisterait à modifier la règle de calcul de la valeur d'un groupe, en faisant par exemple la moyenne de la valeur des comportements réalisés dans le groupe, sans tenir compte du nombre d'agents qui les réalisent. Nous abordons plus loin les perspectives à plus long terme concernant le groupe.

Représentation des préférences

Un autre axe de perspectives à court terme pour le modèle COR-E est la représentation des préférences d'un agent. Nous avons opté pour une représentation ordinale, qui offre des avantages mais comporte aussi des limites, que nous avons évoqués chapitre 5. Les préférences ordinales semblent plus faciles à configurer pour l'utilisateur du système sur un petit nombre de ressources que des préférences numériques, puisqu'il peut directement visualiser quelles ressources seront préférées ou moins préférées à la ressource qu'il insère dans la liste. Une représentation ordinale permet aussi de préserver plus facilement la cohérence des préférences qu'une représentation numérique. Si on souhaite ajouter une nouvelle ressource r avec un système de représentation numérique, il faut examiner les valeurs qui ont déjà été attribuées aux autres ressources afin de déterminer la valeur adéquate pour r . Il est également plus difficile de faire évoluer les valeurs de toutes les ressources de la liste lorsqu'une nouvelle ressource y est insérée. Par exemple, si on souhaite ajouter une ressource r_1 entre une ressource r_2 de valeur 3 et une ressource r_3 de valeur 4 de sorte que $r_2 \succ r_1 \succ r_3$ et que la valeur de r_1 soit entière, cela n'est pas possible sans modifier la valeur de r_2 ou r_3 , ce qui peut encore entraîner la modification d'autres valeurs. En revanche, les valeurs des ressources de la liste de préférences ordinales évoluent automatiquement lorsqu'une ressource est ajoutée. Mais la liste ordinale a aussi des limites. Tout d'abord, la valeur des ressources est sensible à la taille de la liste de préférences. Pour pallier cette limite, il serait envisageable de normaliser automatiquement les valeurs des ressources sur un certain intervalle, par exemple $[0, 100]$. Une autre limite porte sur la taille de la liste des préférences. Si la liste ordinale contient un très grand nombre de ressources, il peut être difficile pour l'utilisateur du modèle d'appréhender l'ensemble de la liste et d'y insérer une ressource de façon adéquate. Dans le cas d'un très grand nombre de ressources, l'utilisation de préférences numériques devient plus avantageuse, car on peut se fier à une échelle de valeurs générale pour attribuer un nombre. Une solution serait d'utiliser un système de préférences hybride, permettant de configurer des préférences

avec une méthode ordinale ou avec une méthode numérique. Nous pouvons envisager ce développement dans le modèle COR-E, puisque les ressources ont actuellement une valeur d'après leur position dans la liste ordinale. L'utilisateur du modèle doit simplement avoir accès à deux vues pour la configuration des préférences, une en représentation ordinale et une en représentation numérique, dans lesquelles il pourrait effectuer des modifications. Les vues seraient synchronisées et se mettraient à jour lorsque l'une d'entre elles serait modifiée.

Priorités des comportements

Le processus de sélection du modèle COR-E pourrait connaître certaines améliorations concernant la priorité des comportements. Actuellement, ce processus donne la priorité aux comportements de protection par rapport aux comportements d'acquisition. Le premier principe de la théorie de Hobfoll (1989) postule que la perte de ressources est plus significative pour un individu que le gain de ressources. Ce principe concernant la déformation des gains et des pertes rappelle la *théorie des perspectives* formulée par les économistes Kahneman et Tversky (1979). Avec des études à l'appui, ces auteurs ont affirmé que les individus prennent leurs décisions non pas d'après la richesse monétaire totale qu'ils pourraient obtenir, mais d'après les pertes et les gains envisagés. D'après les économistes, un individu déforme une valeur d'une perte par une fonction convexe, et une valeur de gain par une fonction concave. Une étude récente de Hochman et Yechiam (2011) remet en question cette théorie, en faisant l'hypothèse que les choix d'un individu ne dépendraient pas du fait qu'il pondère différemment les pertes et les gains, mais que les pertes activent davantage son système nerveux autonome, et qu'il y est donc plus attentif. Sur le plan informatique, cette hypothèse peut aussi être représentée grâce à des poids, comme le font déjà certains modèles d'attention (Itti et Koch, 2001).

La théorie COR ne précise pas dans quelle mesure la perte d'une ressource est plus significative qu'un gain. Afin de rester cohérents avec notre objectif de minimiser les paramètres pouvant s'avérer difficiles à configurer, nous avons fait le choix de donner systématiquement la priorité aux comportements de protection par rapport aux comportements d'acquisition. Ce choix comporte des limites, puisqu'un agent choisira toujours de protéger une ressource de faible valeur pour lui plutôt que d'acquérir une ressource ayant une très grande valeur à ses yeux. Si nous souhaitons rendre le modèle COR-E plus réaliste sur le plan psychologique, et que nous nous autorisons à relaxer la contrainte d'après laquelle le modèle doit contenir un minimum de variables, nous pouvons introduire des poids associés aux gains et aux pertes dans le modèle. Comme COR-E ne contient pas de probabilités, nous pouvons uniquement déformer la valeur d'une ressource (la théorie des perspectives déforme également les poids associés aux probabilités). Plus précisément, nous pourrions suivre la démarche suivante :

- supprimer la priorité de la protection sur l'acquisition dans le processus de sélection ;
- introduire deux poids α^- et $\alpha^+ \in [0, 1]$, qui vont être utilisés pour pondérer la valeur des ressources lors du calcul de la valeur d'un comportement possible c du point de vue d'un agent i . Si une ressource est menacée ou perdue en raison de c , alors sa valeur pour i est pondérée par α^- , et si une ressource est acquise en raison de c , alors sa valeur pour i est pondérée par un poids α^+ . Pour rester fidèle à la théorie COR, nous définissons $\alpha^- > \alpha^+$, de telle sorte qu'une ressource menacée ou perdue compte davantage dans le calcul de la valeur d'un comportement qu'une ressource acquise de même valeur ;
- il est ensuite nécessaire d'effectuer des évaluations afin de vérifier l'impact de cette pondération. Pour cela, il faut produire des vidéos de simulation avec trois types de

conditions : 1) $\alpha^- > \alpha^+$, 2) $\alpha^- < \alpha^+$, 3) $\alpha^- = \alpha^+$. Si les vidéos produites avec la première condition obtiennent le meilleur score de réalisme, alors cette condition pourra être introduite dans le modèle. On pourra également produire plusieurs vidéos pour la condition 1) en faisant varier les poids afin de calibrer α^- et α^+ . Il serait souhaitable de produire des vidéos issues de plusieurs scénarios, afin que cette calibration ne soit pas applicable à un unique scénario. Les évaluations peuvent être conduites auprès d'observateurs humains, et auprès d'experts en psychologie.

Le processus de sélection contient aussi une autre priorité pouvant faire l'objet d'une amélioration, qui est celle de la priorité des comportements de type attaque sur les comportements de protection de type fuite. Nous avons choisi de déterminer cette priorité pour rendre compte du fait qu'il est préférable pour un agent d'éliminer une menace plutôt que de la fuir, à moins que le comportement d'attaque n'ait une valeur négative pour l'agent. En effet, si un agent fuit ce comportement ne pare pas à l'éventualité qu'il soit à nouveau menacé dans le futur. Mais au lieu d'accorder une priorité de l'attaque sur la fuite, il serait plus cohérent de prendre en compte le fait que la fuite ne supprime pas une menace sur le long terme, et de comparer cette menace à long terme par rapport à la menace à court terme. Cependant, comme nous avons utilisé COR-E uniquement pour modéliser des comportements de type réactifs afin de s'adapter au cadre du projet Terra Dynamica, nous nous sommes focalisés sur les effets survenant à court terme. Nous avons donc introduit une priorité de l'attaque sur la fuite afin de pouvoir rendre compte de cet effet à long terme sans avoir besoin de le modéliser. Si on souhaite rendre compte des effets à court terme et à long terme d'un comportement, il est tout à fait possible de les intégrer au modèle COR-E. Toutefois cela nécessite un travail de configuration supplémentaire, puisque cet ajout double la taille des effets à configurer. Au commencement de notre travail sur le modèle, nous avons proposé cette distinction entre les effets à court terme et les effets à long terme (Campano *et al.*, 2010). Nous n'avons pas implémenté cette distinction, car nous avons préféré simplifier le modèle afin de tester son noyau et de bien mesurer l'impact de chacune de ses composantes de base. Ce travail montre toutefois qu'il est possible d'affiner la représentation des effets, et d'utiliser une méthode ne requérant pas la priorité de l'attaque sur la fuite.

Évaluation

Des perspectives à court terme sont envisageables dans le cadre des protocoles d'évaluation que nous avons décrits. Nous avons mis en place des protocoles permettant de vérifier si les comportements obtenus étaient jugés crédibles et émotionnels par des observateurs humains, mais nous n'avons pas évalué si les intentions des agents étaient correctement comprises par ces observateurs. Il serait intéressant de vérifier que la dynamique interne du système soit perceptible par les observateurs au travers des comportements adoptés par les agents. Par exemple, si un agent quitte un groupe qui commet des actions violentes, l'observateur devrait comprendre que l'agent ne cautionne pas les actions commises par le groupe et ne partage pas les mêmes valeurs. Cette évaluation serait une étape de plus dans la validation du modèle, car si ces résultats sont positifs, cela montrerait que les observateurs estiment la crédibilité ou le caractère émotionnel d'un comportement en ayant correctement compris la situation, et non en effectuant de mauvaises attributions, qui ne reflètent pas ce qui se passe dans le système. Afin de prendre en compte cet aspect, il faut ajouter deux types de questions concernant les intentions des agents dans le questionnaire. Le premier type serait une question ouverte demandant aux participants d'expliquer un ou plusieurs comportements des agents observés dans la vidéo, et le second type serait une question fermée proposant une liste d'explications possibles pour un comportement,

parmi lesquelles le participant peut choisir une ou plusieurs réponses qui lui semblent correctes et leur attribuer un score de confiance. Sur la simulation des groupes, ces questions pourraient prendre la forme suivante :

1. « Selon-vous, pourquoi l'agent colorié en vert a quitté le groupe ? »
2. « Êtes-vous d'accord avec les affirmations suivantes : a) l'agent colorié en vert a quitté le groupe parce qu'il voulait aller manger, b) l'agent colorié en vert a quitté le groupe parce qu'il se sentait menacé, c) l'agent en vert a quitté le groupe sans raison ». Pour chaque question de ce type, le participant peut attribuer un score sur une échelle de Likert à sept niveaux.

Le type de question numéro 2 serait posé après le type de question numéro 1 sur une page différente, et sans possibilité pour le participant de revenir en arrière. Cela permet de s'assurer que ses réponses au type de question numéro 2 ne soient pas biaisées par le type de question numéro 1.

Une autre perspective concernant l'évaluation porte sur la configuration du modèle COR-E. Nous pensons que ce modèle manipule des concepts dont la signification est concrète, c'est-à-dire dont la représentation peut être facilement comprise, et que les effets de ses variables peuvent être mieux contrôlés que ceux d'un modèle manipulant des catégories d'émotion. Ces éléments devraient faciliter la configuration du modèle pour un utilisateur. Afin de vérifier cette affirmation, nous devons concevoir une interface graphique dans laquelle il est possible de réaliser les opérations suivantes :

- ajouter des types et des instances de ressources dans la simulation ;
- ajouter des comportements et spécifier leurs effets ;
- configurer les préférences des agents.

Ensuite, nous demanderons à des participants de représenter un scénario de notre choix en configurant le modèle grâce à ces trois opérations, par l'intermédiaire de l'interface graphique. Cette évaluation se déroulera sur plusieurs entretiens comprenant chacun un participant et une personne chargée de l'évaluation, qui expliquera les consignes et prendra des notes sur le comportement du participant (dans l'idéal l'entretien sera filmé). Afin de simplifier ces opérations de configuration pour l'utilisateur, nous pouvons proposer une liste de types et d'instances de ressources ainsi qu'une liste de comportements pouvant servir de base. Des méthodes pour configurer simplement les préférences des agents pourront éventuellement être définies, en proposant par exemple des listes de préférences prototypes. Chaque opération devra être évaluée de façon indépendante dans au moins une condition expérimentale. C'est-à-dire que pour un groupe de participants, seul un aspect pourra être configuré (par exemple les préférences). Nous aurons donc trois conditions expérimentales ou seule la configuration d'un aspect sera possible, et une condition expérimentale où l'utilisateur pourra configurer les trois aspects à la fois (les ressources, les comportements, et les préférences). Les conditions indépendantes nous permettront de mieux identifier si une opération de configuration a posé plus de problèmes qu'une autre, et d'approfondir son analyse avec le participant. Afin d'évaluer si la configuration du modèle a pu être manipulée avec succès, nous évaluerons si les participants ont réussi ou non à modéliser le scénario demandé. Nous nous baserons également sur la description de leur comportement pendant l'entretien, indiquant les difficultés éventuelles qu'ils auraient pu rencontrer.

Perspectives à moyen terme

Simulation des groupes

Actuellement un agent du modèle COR-E ne peut appartenir qu'à un seul groupe, ce qui est une limitation du modèle. La possibilité de simuler une appartenance à plusieurs groupes d'agents demande de prendre en compte des aspects un peu plus complexes que pour les perspectives à court terme que nous avons présentées. Afin de déterminer si un agent peut appartenir à plusieurs groupes, et donc cumuler les bénéfices obtenus grâce à chacun de ces groupes, deux solutions sont envisageables. La première, qui est la plus simple, consisterait à limiter le nombre de groupes auxquels un agent peut appartenir, en fixant un chiffre représentant un maximum. L'agent choisirait alors d'appartenir aux groupes auxquels il accorde le plus de valeur, et actualiserait ces choix régulièrement au cours du temps. Cependant, cette solution ne semble pas cohérente pour deux raisons principales : (i) un individu n'a pas de limite en réalité sur le nombre de groupes auxquels il peut appartenir, mais serait plutôt limité sur les ressources qu'il peut investir dans chacun de ces groupes, et (ii) cette solution ne tient pas compte des incompatibilités et des rivalités qui pourraient exister entre les groupes. Une deuxième solution, demandant davantage de développements dans le modèle, serait de déterminer si un agent peut appartenir ou non à un groupe en fonction des ressources dont il dispose encore, et selon les compatibilités entre les groupes auxquels il appartient déjà et le groupe qu'il veut rejoindre. Pour cela, il est nécessaire de mettre au point deux algorithmes correspondant à chacune de ces deux conditions. Les ressources devant être investies par un individu pour faire partie d'un groupe peuvent être, par exemple, le temps et l'argent (adhésion à une association par exemple). Bien sûr, on peut envisager qu'un agent puisse investir des ressources de types différents. Sur la base de notre exemple, on peut donner à chaque agent une réserve de temps et d'argent se renouvelant après une certaine durée, et fixer en attribut de chaque groupe combien de ressources de temps et d'argent un agent doit donner lorsqu'il souhaite y adhérer. Le premier algorithme vérifiera alors si l'agent qui souhaite rejoindre le groupe dispose bien des ressources nécessaires. Si c'est le cas, l'agent sera autorisé à rejoindre le groupe et perdra les ressources qu'il y a investies. Les ressources investies devront bien sûr compter dans le calcul de la valeur du groupe pour l'agent. Le second algorithme est facile à mettre en œuvre lorsque la compatibilité des groupes a été déterminée. Lorsqu'un agent souhaite entrer dans un groupe $g \in \mathcal{G}$, l'algorithme passerait par les étapes suivantes :

1. il déterminerait si le groupe g est compatible avec tous les groupes auxquels l'agent appartient déjà ;
2. si ce n'est pas le cas et que le groupe g a plus de valeur que les groupes auxquels l'agent appartient déjà, alors l'agent quitterait ses groupes actuels pour rejoindre le nouveau groupe. Dans le calcul de valeur du groupe g , les ressources perdues par l'agent en quittant ses groupes actuels aura préalablement été prise en compte ;
3. si la condition de l'étape 2 n'est pas remplie, que l'agent appartient à plus d'un groupe, et que parmi ces groupes il en existe au moins un compatible avec g , alors l'algorithme détermine les ensembles de groupes possibles auxquels l'agent peut appartenir, et attribue une valeur à chacun de ces ensembles selon la valeur des groupes du point de vue l'agent. L'agent choisit alors de rejoindre/conservé les groupes appartenant à l'ensemble de valeur maximum, et de quitter les autres groupes.

En revanche, la méthode permettant de déterminer la compatibilité des groupes peut-être difficile à mettre en œuvre selon la solution choisie. La plus simple consiste à déterminer pour chaque groupe un ensemble de groupes avec lesquels il est incompatible.

Cette liste serait fixée par l'utilisateur du système. D'autres méthodes, plus complexes, pourraient être fondées sur la compatibilité des comportements effectués par les groupes ou leurs préférences. Cela demanderait de déterminer une mesure de similarité entre les groupes, en mesurant par exemple à quel point leurs préférences divergent. On peut imaginer un premier algorithme assez simple, qui consisterait à déterminer pour chaque paire de ressources r_1 et $r_2 \in \mathcal{R}$ présentes dans deux listes de préférences P_1 et P_2 si la préférence entre r_1 et r_2 est la même dans les deux listes. Par exemple, si dans la liste de préférences P_1 , $r_1 \succ r_2$ et que dans la liste P_2 , $r_2 \succ r_1$, cette préférence baisserait le score de similarité, tandis que si dans P_2 , $r_1 \succ r_2$, alors cette préférence augmenterait le score de crédibilité. Pour les mesures concernant les comportements, nous pourrions par exemple prendre en compte le fait que deux groupes cherchent à obtenir une ressource qui ne peut être acquise que par un seul d'entre eux. Cela permettrait de représenter des situations comme celle qui a été décrite dans le travail de Caughey (1975), où des groupes de mineurs se sont opposés pour obtenir des droits d'exploitation sur des terrains. Ces différentes mesures pourraient être davantage développées et testées en perspective de cette thèse.

Une autre perspective à moyen terme concernant la simulation des groupes est la simulation du phénomène de contagion émotionnelle. Ce phénomène désigne la capacité d'un individu à transmettre ses émotions à d'autres personnes, de sorte que l'état émotionnel de ces personnes en soit affecté, et que cela engendre des répercussions sur leurs comportements. Dans la littérature en psychologie, les travaux concernant la contagion émotionnelle s'appliquent surtout à l'expression des émotions (visage, voix, posture) (Rapson *et al.*, 1993), et à la façon dont la performance d'un groupe peut être influencée par l'humeur de certains individus qui le composent (Barsade, 2002). Les modèles informatiques utilisent des modèles de contagion émotionnelle pour améliorer la capacité expressive des agents virtuels, en leur donnant par exemple la capacité d'imiter l'expression faciale de leur interlocuteur (Bevacqua *et al.*, 2010). D'autres modèles utilisent ce phénomène pour simuler des situations de panique, où les agents ont la capacité d'imiter le comportement des agents aux alentours (Tsai *et al.*, 2011). La théorie COR, d'après laquelle le modèle COR-E a été fondé, aborde la notion de contagion émotionnelle via la notion de *stress*. Le grand principe de la théorie COR est qu'un stress apparaît chez un individu lorsque ses ressources sont menacées, ou lorsqu'il en perd. D'après S. E. Hobfoll (Hobfoll, 1998), lorsqu'un besoin important en ressources pèse sur un individu en raison d'un manque (pouvant être occasionné par des pertes), ce besoin peut être ressenti par les personnes qui lui sont proches et peuvent les affecter elles aussi, créant un phénomène de contagion du stress. Ce processus est plus connu en psychologie sous le nom de *crossover* (Bakker *et al.*, 2009). Sur le plan informatique, la modélisation de ce processus est une perspective originale par rapport aux travaux existants sur la contagion émotionnelle, qui manipulent des catégories d'émotions transmises d'agent à agent. Il est en effet possible de simuler ce processus sans utiliser de catégories d'émotion, en transmettant les menaces et les demandes en ressources exercées sur un agent à un autre agent. Par exemple, Hobfoll décrit une situation dans laquelle des menaces et des pertes de ressources subies par un individu sont ressenties par un membre de sa famille, grâce à un processus d'empathie. Pour prendre en compte cet aspect avec le modèle COR-E, nous devons déterminer des cercles d'influence, pouvant par exemple représenter un groupe familial restreint comme des époux, ou bien un groupe présent à une manifestation. Les menaces, les pertes et les besoins en ressources subis par un individu appartenant à un cercle seraient alors transmis aux autres individus appartenant à ce cercle, c'est-à-dire ajoutés à leurs propres ensembles de ressources. Comme les comportements des agents du modèle COR-E sont produits à partir de l'état de leurs ensembles de ressources, cette transmission pourrait avoir un impact direct sur

leur comportement. Ce processus est une représentation de l'empathie fondée sur l'état des ressources des individus, et non sur leur état émotionnel. Concrètement, si deux agents i et $j \in \mathcal{A}$ appartiennent à un même cercle c , si la ressource d'emploi de l'agent i est menacée, alors elle comptera aussi comme une ressource menacée pour l'agent j . Si cela est possible, l'agent j pourrait donc adopter des comportements pour essayer de protéger l'emploi de l'agent i . Comme le modèle COR-E permet déjà à un agent i de réaliser un comportement pour le compte d'un autre agent j , cette extension semble tout à fait compatible. Il serait simplement nécessaire d'ajouter la notion de cercle d'influence.

Diversité des comportements

Les comportements que nous avons représentés dans les scénarios implémentés avec le modèle COR-E sont relativement peu nombreux, et cette base pourrait être enrichie. Il est possible de prendre en compte des comportements de protection plus diversifiés, en incluant les différentes stratégies d'adaptation citées dans les travaux en psychologie. En particulier, S. E. Hobfoll (Hobfoll, 1998) a répertorié plusieurs actions individuelles et collectives pouvant être appliquées par les individus. Ce répertoire contenant une cinquantaine d'actions, intitulé SACS (*Strategic Approach to Coping Scale*), a été établi d'après des inspirations différentes, comprenant des théories psychologiques sur les stratégies d'adaptation, mais aussi d'autres sources comme « *L'art de la guerre* » de Sun Tzu, ou encore des stratégies appliquées par les entreprises. Par exemple, l'item « rechercher un soutien social » comprend des actions comme « demander à ses amis ce qu'ils feraient », « demander à des membres de la famille ce qu'ils feraient », ou encore « demander à des amis ou à la famille ce qu'ils pensent de nos intentions ». Une difficulté serait de déterminer l'effet de chacune de ces stratégies en termes d'effets sur les ressources, mais elle devrait être surmontable. Par exemple les stratégies que nous venons de citer peuvent permettre d'acquérir des ressources de type « Plan », représentant un plan qu'un agent peut exécuter pour parvenir à ses buts.

Gestion des ressources désirées

Il existe des perspectives de développement pour le modèle COR-E concernant la mise à jour des ressources désirées RD_i de chaque agent i . La théorie COR postule qu'un agent cherche à acquérir toute ressource qu'il ne possède pas, mais nous avons restreint l'ensemble des ressources qu'un agent souhaite acquérir en définissant un ensemble de ressources désirées. Ces ressources désirées ne contiennent pas nécessairement toutes les ressources que l'agent ne possède pas, et il faut donc trouver d'autres mécanismes permettant d'ajouter des ressources à cet ensemble. Nous avons proposé que lorsqu'un agent perd une ressource de type *personnel*, cette ressource est immédiatement ajoutée à son ensemble de ressources désirées. Les ressources personnelles sont en effet considérées comme constitutives d'un individu, elles représentent des ressources fondamentales comme la « capacité à se déplacer » ou l'« estime de soi ». Elles sont propres à un agent, et ne peuvent pas être acquises par un autre agent. Cependant les ressources personnelles ne sont pas les seules dont un individu peut avoir fondamentalement besoin. L'argent, ou un moyen de locomotion lorsqu'on habite dans un endroit isolé, sont des ressources très importantes, et elles sont citées dans la liste des 74 ressources de la théorie COR. Des ressources correspondant à des besoins internes, comme un apport en sucre et en eau suffisant, devraient aussi être représentées et apparaître dans l'ensemble des ressources désirées d'un agent lorsqu'il en manque. Par ailleurs, il faudrait déterminer si les ressources acquises par un agent sont persistantes, ou si elles finissent par disparaître, créant alors le désir d'en acquérir de nouvelles chez cet

agent. Pour des ressources comme des « nutriments », il serait facile de déterminer leur durée de vie, mais des ressources comme la « volonté », la tâche est moins facile. Une étude de Baumeister *et al.* (1996) suggère que les individus sont capables de résister à certaines tentations grâce à une ressource psychologique, que cette ressource s'épuise lorsqu'elle est utilisée, et qu'elle se renouvelle au bout d'un certain temps. Mais les chercheurs n'ont pas pu quantifier cette ressource, ni indiquer combien de temps était nécessaire pour qu'elle se régénère.

Nous avons vu que la liste des 74 ressources proposées dans la théorie COR pouvait être synthétisée en un plus petit nombre de ressources. Une première perspective serait de modéliser ces types de ressources, et de définir pour chacune les comportements permettant de les obtenir et de les protéger. D'après la théorie COR, chacune de ressources devra être ajoutée à l'ensemble des ressources désirées d'un agent si elle n'est pas acquise par l'agent. Elles devront aussi être classées dans la liste de préférences des agents. Nous pourrions alors vérifier si la présence de ces ressources permet de rendre les agents plus crédibles aux yeux d'un observateur humain. Une seconde perspective serait de tester expérimentalement la régénération et la disparition de ressources psychologiques telles que la « volonté », en se fondant sur des études menées en psychologie. Afin de valider ce travail, nous pourrions nous reposer sur des expériences en psychologie, en comparant le comportement d'un agent dans la simulation avec le comportement des participants à l'expérience.

Le souhait d'acquérir certaines ressources pourrait aussi évoluer lorsqu'un agent se compare à d'autres agents. Par exemple, si un individu constate que son voisin a installé des « palmiers luxueux » dans son jardin, alors il pourrait vouloir en installer également dans le sien. Ce processus de comparaison sociale est aussi évoqué par des travaux sur la file d'attente, qui rapportent que plus un individu observe de personnes derrière lui, plus il est satisfait de la place qu'il occupe dans la file (Zhou et Soman, 2003). Afin de mettre à jour les ressources désirées grâce à ce processus, il faut déterminer l'ensemble des ressources qu'un agent ne possède pas mais qui sont possédées par d'autres agents. Si l'agent valorise des ressources parmi cet ensemble, alors elles seront ajoutées à son ensemble de ressources désirées. Un agent devrait se comparer non pas à tous les agents, mais à un sous-ensembles d'agents, comme son voisinage, les membres de sa famille, ou des agents influents. Il faudra donc aussi déterminer des cercles contenant les agents sur lesquels vont porter les comparaisons.

Modélisation du *stress*

Une perspective à moyen terme pour le modèle COR-E concerne la modélisation d'un état affectif important dans la théorie COR qui est le *stress*. Nous avons fondé le modèle COR-E sur le principe des modèles d'émergence des émotions, qui consiste notamment à ne pas simuler d'états affectifs tels que les émotions au cœur du modèle. Cependant, la modélisation de l'état de stress peut apporter une contribution importante. L'état de stress ressenti par un individu peut déterminer le choix de certaines actions qui visent à réduire ce niveau de stress. Par exemple, si un individu perd son emploi et qu'il se retrouve en situation de précarité parce qu'il n'y a plus d'offres sur le marché, il va ressentir un certain niveau de stress. En conséquence, il peut réaliser des comportements visant à réduire ce niveau stress, même s'il ne peut pas réaliser de comportement lui permettant de récupérer son emploi. D'après la théorie COR, lorsque les individus se sentent en situation de stress, ils se tournent notamment vers leur communauté pour obtenir un soutien social. Dans l'état actuel du modèle COR-E, il serait possible à un agent de réaliser des comportements d'acquisition pour obtenir un nouvel emploi, mais pas de réaliser des comportements permettant de réguler un niveau de stress ressenti, comme « discuter avec

ses amis ». Nous pouvons proposer une première approche pour répondre à cette limitation.

Dans le modèle COR-E, le niveau de stress peut être modélisé en créant pour chaque agent une réserve de ressources de type « Confort », représentant les ressources de bien-être psychologique acquises par un agent. Cette réserve peut contenir un nombre n de ressources de type « Confort ». Lorsqu'elle est pleine, cela signifie que l'agent est en état de *eustress*, qui est un concept issu de la théorie COR représentant le fait qu'un individu se sent bien. Lorsque cette réserve se vide, alors cela signifie que l'agent est en état de *stress*. Les ressources de type « Confort » peuvent être perdues lorsqu'une ressource importante d'un autre type est menacée ou perdue pour un agent (par exemple, son emploi). Lorsqu'un agent perd une ressource de type « Confort », il va chercher à la récupérer grâce à des comportements permettant d'acquérir une ressource de ce type. On peut imaginer qu'il puisse réaliser des comportements bénéfiques comme « discuter avec des amis » ou « aller dans un salon de massage », mais aussi des comportements moins bénéfiques comme « boire de l'alcool ». Si cet agent n'a pas d'amis ou trop peu d'argent pour se distraire, il réaliserait dans ce cas le comportement « boire de l'alcool », lui faisant gagner temporairement une ressource de « Confort », mais pouvant aussi lui faire perdre une ressource de « Santé ». Cet exemple est une vue simplifiée du principe de la *spirale des pertes* de la théorie COR, qui postule que moins un individu dispose de ressources, plus il est sujet à en perdre. Si nous implémentons la solution que nous venons de décrire dans le modèle COR-E, nous pourrions modéliser ce principe, et représenter en même temps le processus du stress tel qu'il est décrit dans la théorie COR. La modélisation d'une réserve de ressources de « Confort » peut-être considérée comme la modélisation d'un état affectif, et sembler contradictoire avec l'approche d'un modèle d'émergence des émotions. Néanmoins, elle s'intègre parfaitement avec le modèle COR-E tel que nous l'avons développé, aurait un véritable impact sur les comportements choisis par un agent, et permettrait d'implémenter davantage de principes présents dans la théorie COR. Il n'y a donc a priori aucune raison de ne pas tester cette solution, qui ne remet pas en question l'approche que nous avons défendue dans cette thèse, mais permet de la nuancer. Cette perspective dépasse le cadre d'application du projet Terra Dynamica, et correspond davantage à l'objectif d'expérimenter la théorie psychologique COR sur un plan computationnel.

Perspectives à long terme

Interprétation des émotions

Le modèle COR-E ne permet pas à un agent d'interpréter une catégorie d'émotion à partir de la situation dans laquelle il se trouve, ce qui constitue une limitation du modèle concernant ses capacités communicatives. Permettre à un agent d'interpréter une situation avec une catégorie d'émotion lui donne la possibilité de communiquer de façon concise ce qu'il ressent. Par exemple, un agent pourrait dire « je suis content », ou « j'ai peur », au lieu de dire « j'ai acquis une ressource diplôme qui avait une valeur importante pour moi » ou « ma ressource de santé est menacée par un chien et je n'ai pas d'action disponible pour la protéger ». La catégorisation, qui est le fait de pouvoir associer un mot à une situation complexe, est une activité fondamentale du langage. Le projet Terra Dynamica n'étant pas orienté sur la communication verbale des agents, nous nous sommes affranchis de cet aspect. Toutefois, si nous souhaitons faire en sorte que des agents du modèle COR-E soient capables de communiquer avec des termes désignant des émotions, plusieurs solutions existent. Une première solution serait de dériver des catégories d'émotions au moyen d'un système de classification, comme la théorie OCC (Ortony *et al.*, 1988). Par

exemple si la ressource d'un agent est menacée et que cet agent est dans l'impossibilité d'agir, il pourrait dire qu'il a « peur ». Cette association est cohérente avec la théorie des tendances à l'action proposée par N. Frijda. Le problème de cette solution est qu'il est impossible de discriminer tous les mots appartenant au vocabulaire émotionnel avec un système de règles. La théorie OCC représente 24 catégories d'émotion, ce qui est déjà riche, mais cette liste est loin d'illustrer la richesse du vocabulaire émotionnel. La base de données lexicographique WordNet Affect recense 4787 termes reliés à des états mentaux ou émotionnels (Strapparava et Valitutti, 2004). Dans ce contexte, la meilleure approche serait d'utiliser un algorithme d'apprentissage, capable de catégoriser une situation donnée avec un mot. De tels algorithmes existent déjà pour attribuer des catégories d'émotions à des données textuelles (Strapparava et Mihalcea, 2008; Alm *et al.*, 2005), mais ils sont pour le moment limités à quelques catégories. Le module de catégorisation n'interviendrait pas dans le fonctionnement du modèle COR-E, mais pourrait prendre les sorties de COR-E en entrée. Dans l'idéal, ce module devrait prendre en compte tous les signaux qu'un agent peut percevoir, allant de ses perceptions sensorielles à ses buts, et ne pas se limiter au vocabulaire émotionnel. Ce problème de généralisation de l'apprentissage est toutefois un objectif de recherche très audacieux, et il demandera sûrement encore de nombreuses années de travaux pour les chercheurs du domaine.

Assistants psychologues

Les applications possibles de la théorie COR en informatique dépassent le cadre de la simulation multi-agents. L'objectif principal de cette théorie est de prédire le niveau de stress d'un individu, et de l'aider à le réduire en lui proposant des solutions préserver ses ressources et les investir pour l'avenir. Elle a donc en premier lieu un objectif *thérapeutique*. L'agent conversationnel ELIZA, conçu en 1966 par J. Weizenbaum (Weizenbaum, 1966), simule une psychologue capable de répondre par écrit à des questions posées par un utilisateur humain. En détectant des mots-clés et des patrons dans les phrases écrites par l'utilisateur, ELIZA peut répondre en posant des questions du type « parlez-moi de votre mère », ou en formulant des réponses génériques. Ce programme n'a pas été conçu avec l'objectif d'apporter une aide thérapeutique à l'utilisateur, mais avec l'objectif de pouvoir se faire passer pour être humain. Ses réponses sont conçues pour dissimuler son manque de compréhension des phrases de l'utilisateur (Weizenbaum, 1966). ELIZA ne dispose donc pas de facultés d'analyse du discours d'un utilisateur, de façon à lui permettre de trouver des solutions à ses problèmes.

Une perspective pour l'application de la théorie COR serait de développer un modèle d'agent capable d'aider un individu en état de stress à améliorer son état psychologique, en dialoguant avec lui. Ce travail de conception consistera en deux étapes : (i) déterminer des mécanismes permettant de détecter quelles ressources fondamentales ont été perdues par l'individu, et quelles sont les ressources actuellement menacées qui entretiennent son état de stress, (ii) déterminer des mécanismes permettant de donner à cet individu des stratégies pour retrouver des ressources perdues si cela est possible, préserver ses ressources existantes et en acquérir de nouvelles. Il sera essentiel de travailler avec des psychologues dans ces deux étapes de conception. La phase (i) peut être une phase d'écoute, et non nécessairement une phase active qui consisterait à poser des questions, ce qui peut être perçu comme agressif par l'individu. Elle peut reposer sur la compréhension verbale des phrases exprimées, et prendre aussi en compte des signes d'expression indirects, comme des tensions dans la voix. Cela permettrait par exemple de détecter si un sujet évoqué par l'individu lui pose problème, sans qu'il ne l'exprime directement. Les capacités d'un tel agent assistant pourraient être limitées, car il n'existe pas encore d'intelligence artificielle

capable de comprendre parfaitement le langage d'un être humain et ses expressions. Tenant compte de ces limitations, il est quand même possible de réaliser des applications utiles. Il existe déjà des agents virtuels ayant pour but d'aider les individus à faire face à certaines problèmes. Par exemple, certains peuvent sensibiliser les enfants sur le harcèlement à l'école (Aylett *et al.*, 2005), ou aider des jeunes à passer un entretien d'embauche (Jones et Sabouret, 2012).

De tels modèles doivent bien sur être évalués avec une grande précaution, et cette évaluation peut nécessiter beaucoup de temps. Il faut en effet s'assurer que l'agent est parfaitement sûr, c'est-à-dire qu'il ne puisse pas avoir un impact psychologique négatif sur l'individu avec lequel il dialogue. Ce point est particulièrement critique pour la perspective que nous envisageons avec le modèle COR, puisque l'agent aurait pour objectif d'aider des patients en état de stress à aller mieux. Cette étape d'évaluation devra aussi se faire en collaboration avec des psychologues.

Le développement d'agents virtuels ou de robots pouvant assister les individus sur le plan psychologique peut être une des solutions envisageables pour répondre à certains problèmes que rencontre actuellement notre société. L'augmentation constante d'une population âgée et dépendante, ainsi que le manque de personnel dans certains établissements crée des situations où le temps qu'il est possible de consacrer à chaque personne est insuffisant pour la rassurer et l'aider sur le plan psychologique. Des personnes se retrouvent également isolées chez elles, avec peu de contacts humains. Des robots sont actuellement conçus pour prendre en charge les soins d'une personne, comme la sortir de son lit, mais les robots capables d'améliorer le bien-être psychologique d'un individu ne sont pas encore très développés, probablement en raison de la complexité de cette tâche. Ces robots ou assistants « psychologues » ne doivent pas avoir la vocation de remplacer du personnel humain et qualifié, mais de pallier les manques de moyens pour répondre aux demandes des personnes en détresse. Il est impossible de prédire actuellement si ces assistants atteindront le niveau de compétence d'un être humain, et s'ils pourront un jour être considérés comme leurs collègues. En attendant, il est nécessaire de trouver des solutions qui permettent de réduire la grande détresse de certaines personnes dépendantes, tout en continuant à privilégier le contact humain lorsque cela est possible.

Conclusion

Dans cette thèse, nous avons proposé un modèle pour la simulation de personnages virtuels affectifs, capables d'exhiber des comportements émotionnels crédibles. Le travail que nous avons présenté s'inscrit en particulier dans le projet Terra Dynamica, dont les domaines d'application comprennent l'urbanisme, la sécurité, les jeux vidéos et les transports. Les personnages que nous simulons grâce à notre modèle peuvent agir et réagir en fonction de leurs buts et des événements survenant dans leur environnement. La dynamique de leurs comportements s'appuie sur un mécanisme d'acquisition et de protection de ressources, sans reposer sur la simulation de catégories d'émotion. Cette architecture est fondée sur une *approche émergente des émotions*, et sur *la théorie COR* du psychologue S. E. Hobfoll (Hobfoll, 1998).

Selon l'approche émergente, les émotions ne doivent pas être codées dans l'architecture du modèle, et elles apparaissent lorsque des observateurs humains interprètent le comportement des agents. Par exemple, en voyant un personnage en train de fuir, un observateur humain peut décrire ce comportement en disant que le personnage « a peur », alors que ce comportement n'est pas déclenché par une catégorie d'émotion représentant la peur. Cette approche est encore minoritaire dans le domaine de l'Informatique Affective, car la plupart des modèles permettant de simuler des comportements émotionnels utilisent des variables représentant des catégories d'émotions. Nous avons montré que ces variables émotionnelles ne sont pas toujours faciles à configurer pour l'utilisateur du modèle, en particulier lorsqu'il faut les associer à des comportements, et que l'approche émergente propose une solution pour contourner ces problèmes. Dans le travail que nous avons présenté, nous nous sommes intéressés à la définition d'un modèle d'émergence des émotions pour la simulation de comportements affectifs dans un environnement contenant plusieurs agents, c'est-à-dire un système multi-agents.

Pour définir ce modèle, nous nous sommes appuyés sur une théorie psychologique qui n'a pas encore été implémentée à notre connaissance. Ce modèle est intitulé COR-E (COR-Engine), et il est fondé la théorie psychologique de la Conservation des Ressources (COR) de Hobfoll (1989). Le principe de cette théorie est qu'un individu cherche à protéger et acquérir des ressources. Ces ressources peuvent être de types différents, c'est-à-dire représenter des objets matériels comme une voiture, ou des concepts socio-psychologiques comme la réputation, c'est-à-dire l'image qu'un individu renvoie aux autres par son comportement. La dynamique des comportements d'un individu est motivée par sa volonté de protéger des ressources qu'il perçoit comme menacées, et d'acquérir de nouvelles ressources. Afin d'implémenter le modèle COR-E, nous avons déterminé quels mécanismes permettent d'obtenir cette dynamique d'acquisition et de protection de ressources. Ainsi dans ce modèle, les agents ont chacun des préférences individuelles sur des ressources de l'environnement, et trois ensembles de ressources individuels leur permettant de déterminer l'état d'une ressource de leur point de vue. Ces ensembles sont les ressources désirées, les ressources acquises, et les ressources menacées. La valeur d'une ressource pour un agent

est déterminée par ses préférences. Un agent cherche à protéger une ressource menacée et à acquérir une ressource désirée. Il peut réaliser ces comportements pour lui-même, ou pour d'autres agents. La sélection d'un comportement par un agent dépend des effets d'un comportement sur l'état des ressources, et de la valeur de chacune de ces ressources pour l'agent.

Les capacités de ce modèle à produire des comportements jugés crédibles et émotionnels ont été vérifiées avec succès grâce à deux évaluations. Ces évaluations ont été conduites auprès de participants devant donner leur opinion sur le caractère crédible et émotionnel des comportements produits par le modèle COR-E. Les protocoles utilisés pour ces évaluations ont été entièrement définis au cours de cette thèse, et sont une de ses contributions. Ils représentent à notre connaissance les premiers protocoles d'évaluation destinés aux modèles d'émergence des émotions. Les résultats positifs obtenus lors des évaluations conduites avec ces protocoles permettent de valider les capacités de tels modèles. Le modèle COR-E se classe ainsi parmi les modèles d'émergence des émotions, permettant à des êtres humains d'interpréter des émotions à partir des comportements simulés par le modèle. Nous avons aussi mis en évidence au cours de ces évaluations qu'un comportement jugé émotionnel n'est pas forcément jugé crédible. Face à des comportements non crédibles, les observateurs ont tendance à donner des explications avec des termes émotionnels. Il est important de vérifier que les comportements simulés, s'ils sont jugés émotionnels, sont aussi jugés crédibles. Cette contribution apporte une précision sur le travail de Bates (1994), qui postule que les émotions augmentent la crédibilité d'un comportement.

Nous avons également effectué une analyse comparative du modèle COR-E avec le modèle EMA (Marsella et Gratch, 2009), afin d'expliquer quelles propriétés différencient ces deux modèles. EMA est un modèle manipulant des variables d'évaluation représentant le point de vue d'un agent, dont la valeur déclenche les stratégies choisies par cet agent. En parallèle, le modèle est capable d'associer une catégorie d'émotion à un agent en se basant sur ces variables. Les modèles EMA et COR-E ont été comparés sur un scénario précédemment utilisé par les auteurs du modèle EMA. L'implémentation de ce scénario avec COR-E a permis de mettre en évidence plusieurs aspects. D'abord, le modèle COR-E est capable de produire des comportements réalistes dans ce scénario comme le modèle EMA. Concernant l'architecture des deux modèles, nous avons mis en évidence que la nature des variables utilisées par le modèle COR-E le rendent plus facile à configurer que le modèle EMA. En contrepartie, les variables du modèle EMA permettent des possibilités supplémentaires, comme la simulation d'expressions faciales. Les deux modèles diffèrent aussi dans leur processus de sélection d'un comportement. Le processus de sélection utilisé par le modèle COR-E est plus simple que celui du modèle EMA, et peut donc être facilement compris et anticipé. Il est aussi plus déterministe. Cela est un avantage dans une simulation multi-agents où l'on souhaite maîtriser les effets d'un modèle, mais aussi une limite si l'on veut introduire plus de souplesse dans la sélection du comportement. Cette comparaison a aussi permis de montrer que le modèle COR-E a une spécificité supplémentaire par rapport au modèle EMA, qui permet de garantir que la valeur d'un comportement du point de vue d'un agent est cohérente avec les préférences individuelles de cet agent.

Enfin nous avons prévu le passage à l'échelle du modèle COR-E, en prenant en compte la notion de groupes d'agents. La représentation de plusieurs niveaux de granularité est un des objectifs du projet Terra Dynamica, dans lequel s'inscrit cette thèse. Nous avons mis en place un mécanisme permettant aux agents de rejoindre des groupes en fonction de leurs préférences individuelles, et des comportements réalisés par les groupes. Une première implémentation du modèle de groupe sur un scénario de manifestation a montré que le modèle COR-E peut s'adapter à la simulation multi-échelle.

Annexe A

Questionnaire de l'évaluation préliminaire

Evaluation de Comportements de Personnes Virtuels

Bienvenue !

Introduction

Vous allez participer à une évaluation de comportements de personnages virtuels. Pour cela, nous vous demandons de regarder la vidéo ci-dessous après avoir lu le contexte, puis de répondre aux questions dans l'ordre. Le questionnaire concerne uniquement le comportement des personnages et non le rendu visuel.

Contexte : deux personnages, un adulte et un bébé, sont dans une cuisine. Le bébé se trouve près d'un oiseau en cage, et un hamburger est posé sur la table. Un feu va se déclencher dans la pièce. L'adulte peut alors exécuter les comportements suivants : sauver le bébé, sauver l'oiseau, ou sauver le hamburger. Il ne peut porter qu'un seul de ces éléments à la fois, et le bébé ne peut pas se déplacer seul.

Vidéo

The video player shows a 2D top-down view of a kitchen scene. On the left, there is a fire icon. In the center, there is a black silhouette of an adult figure. On the right, there is a smaller black silhouette of a baby figure. Above the baby, there is a small red cage containing a bird. A play button is centered over the scene. The video player controls at the bottom show a progress bar at 0:00 and the YouTube logo.

FIGURE A.1 – Début de page 1, scénario d'incendie.

Evaluation de Comportements de Personnes Virtuels

Bienvenue !

Introduction

Vous allez participer à une évaluation de comportements de personnes virtuels. Pour cela, nous vous demandons de regarder la vidéo ci-dessous après avoir lu le contexte, puis de répondre aux questions dans l'ordre. Le questionnaire concerne uniquement le comportement des personnes et non le rendu visuel.

Contexte : des personnes font la queue dans une file d'attente pour obtenir un ticket. Ils ont la possibilité de patienter ou de doubler.

Vidéo



The video player shows a scene with several black stick figures in a queue. One figure is at the front, holding a ticket. Above the queue, the text 'attente un ticket' is visible. The video player interface includes a play button, a progress bar at 0:00, and the YouTube logo.

FIGURE A.2 – Début de page 1, scénario de file d'attente.

Questionnaire

Répondez aux questions suivantes puis cliquez sur "Continuer". A la fin du questionnaire, n'oubliez pas de soumettre vos réponses en cliquant sur "Envoyer".
* Required

Vous êtes : *

Quelle est votre tranche d'âge ? *

Votre catégorie socio-professionnelle : *

Dans quel secteur travaillez-vous (si aucun tapez "aucun") ? *

Quel est votre niveau d'études ? *

Powered by [Google Docs](#)

[Report Abuse](#) - [Terms of Service](#) - [Additional Terms](#)

[Ouvrir Questionnaire](#)

FIGURE A.3 – Fin de page 1.

Questionnaire

Questionnaire

* Required

*Pourriez-vous décrire le(s) comportement(s) du personnage ? **

*A votre avis, pourquoi adopte-t-il ce(s) comportement(s) ? **

« Back Continue »

Powered by [Google Docs](#)

[Report Abuse](#) - [Terms of Service](#) - [Additional Terms](#)

[Ouvrir Questionnaire](#)

FIGURE A.4 – Page 2.

Questionnaire

Questionnaire

* Required

*Selon vous, est-ce qu'il s'agit de comportement(s) réaliste(s) ? **

1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

*Selon vous, est-ce que ce(s) comportement(s) est/sont lié(s) à des traits de personnalité chez le personnage ? **

1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Si vous êtes d'accord avec la question précédente, pourriez-vous citer ces traits de personnalité ?

*Selon vous, est-ce que ce(s) comportement(s) est/sont lié(s) à une/des décision(s) rationnelle(s) chez le personnage ? **

1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Selon vous, est-ce que ce(s) comportement(s)

[Ouvrir Questionnaire](#)

FIGURE A.5 – Début de page 3.

Questionnaire

*Selon vous, est-ce que ce(s) comportement(s) est/sont lié(s) à une/des décision(s) rationnelle(s) chez le personnage ? **

1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

*Selon vous, est-ce que ce(s) comportement(s) est/sont lié(s) à des émotions chez le personnage ? **

1 2 3 4 5

Pas du tout d'accord Tout à fait d'accord

Si vous êtes d'accord avec la question précédente, pourriez-vous citer ces émotions ?

Commentaires (facultatif) :

Powered by [Google Docs](#)

[Report Abuse](#) - [Terms of Service](#) - [Additional Terms](#)

[Ouvrir Questionnaire](#)

FIGURE A.6 – Fin de page 3.

Annexe B

Questionnaire de l'évaluation approfondie

**Merci d'avoir accepté de prendre part à l'évaluation.
Veuillez répondre aux questions avant de commencer.**

Votre âge

Votre genre

Quel est votre niveau d'étude le plus élevé ?

Quel est le domaine travaillez-vous ?

Êtes-vous à l'aise avec l'ordinateur ?

Dans quel pays avez-vous passé la majorité de votre vie?

FIGURE B.1 – Page 1.

Instructions

Votre tâche consiste à observer des personnages évoluant dans un environnement virtuel.
Vous devrez évaluer la crédibilité et l'aspect émotionnel de leurs comportements.

L'étude se déroule de la manière suivante:

- vous allez voir 4 pages avec 2 ou 3 vidéos de 40 sec. représentant des personnages en train de faire la queue à un guichet ;
- dans chaque vidéo, les personnages vont se comporter différemment ;
- pour chaque vidéo, vous devrez noter la crédibilité de leurs comportements ;
- puis déterminer si les comportements sont liés à des émotions chez les personnages ;
- et si c'est le cas, vous devrez choisir lesquelles parmi celles proposées.

Vous ne devez pas vous baser sur la qualité graphique de l'animation.

Vous pouvez revoir chaque vidéo d'une même page autant de fois que vous le souhaitez.
Par contre vous ne pourrez pas revenir en arrière sur une page précédente une fois la page validée.


La durée du test est d'environ 15 minutes.

Afin que nous puissions obtenir les résultats, nous vous remercions de terminer l'évaluation.

FIGURE B.2 – Page 2.

Evaluation des comportements des personnages

*Dans les 3 vidéos sur cette page, les personnages ont la possibilité de patienter ou de doubler les autres personnages dans la file.
Veuillez évaluer ces vidéos en fonction des comportements observés.
Vous pouvez regarder les vidéos plusieurs fois.*



1. Les comportements des personnages sont-ils crédibles ?

2. Ces comportements sont-ils liés à des émotions chez les personnages ?

3. Si oui, lesquelles (par ordre de préférence) ?

FIGURE B.3 – Début de page 3, 4, 5, 6.



7. Les comportements des personnages sont-ils crédibles ?

8. Ces comportements sont-ils liés à des émotions chez les personnages ?

9. Si oui, lesquelles (par ordre d'importance) ?

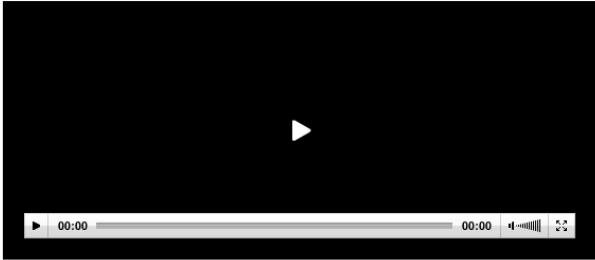
Selon vous, quelle vidéo est la plus crédible ?

Commentaires

FIGURE B.4 – Fin de page 3, 4, 5, 6.

Evaluation des comportements des personnages

*Dans les 3 vidéos sur cette page, le **personnage vert** va réagir différemment lorsqu'il se fait doubler. Veuillez évaluer ces vidéos en fonction des comportements observés du personnage vert uniquement. Vous pouvez regarder les vidéos plusieurs fois.*



1. Les comportements du personnage vert sont-ils crédibles ?

2. Ces comportements sont-ils liés à des émotions chez les personnages ?

3. Si oui, lesquelles (par ordre de préférence) ?

FIGURE B.5 – Début de page pour la série avec le personnage vert.

Bibliographie

- Cecilia Ovesdotter ALM, Dan ROTH et Richard SPROAT : Emotions from text : machine learning for text-based emotion prediction. *In Proceedings of the conference on Human Language Technology and Empirical Methods in Natural Language Processing*, pages 579–586. Association for Computational Linguistics, 2005.
- S.J. ALVARADO, M.G. DYER et M. FLOWERS : *Editorial comprehension in oped through argument units*. UCLA Computer Science Department, 1986.
- M.B. ARNOLD : *Emotion and personality. vol. i. psychological aspects*. 1960.
- J.L. AUSTIN : *How to do things with words*, volume 88. Harvard University Press, 1975.
- O. AVILA-GARCIA et L. CAÑAMERO : Using hormonal feedback to modulate action selection in a competitive scenario. *From animals to animats*, 8:243–252, 2004.
- Ruth S AYLETT, Sandy LOUCHART, Joao DIAS, Ana PAIVA et Marco VALA : Fearnot!—an experiment in emergent narrative. *In Intelligent Virtual Agents*, pages 305–316. Springer, 2005.
- Arnold B BAKKER, Mina WESTMAN et IJ Hetty van EMMERIK : Advancements in crossover theory. *Journal of Managerial Psychology*, 24(3):206–219, 2009.
- L.F. BARRETT : Solving the emotion paradox : Categorization and the experience of emotion. *Pers. and social psychol. review*, 10(1):20, 2006.
- L.F. BARRETT et E. BLISS-MOREAU : Affect as a psychological primitive. *Advances in Experimental Social Psychology*, 41:167–218, 2009.
- Sigal G BARSADE : The ripple effect : Emotional contagion and its influence on group behavior. *Administrative Science Quarterly*, 47(4):644–675, 2002.
- J. BATES : *The role of emotion in believable agents*. Citeseer, 1994.
- R.E. BAUMEISTER, E. BRATSLAVSKY, M. MURAVEN et D.M. TICE : Ego Depletion : Is the Active Self a Limited Resource? *Journal of Personality and Social Psychology*, 74(5):1252–1265, 1998.
- R.F. BAUMEISTER, L. SMART et J.M. BODEN : Relation of threatened egotism to violence and aggression : The dark side of high self-esteem. *Psychological review*, 103(1):5–33, 1996.
- Elisabetta BEVACQUA, S HYNIEWSKA et Catherine PELACHAUD : Positive influence of smile backchannels in ecas. *In International Workshop on Interacting with ECAs as Virtual Characters (AAMAS 2010)*, 2010.

- T. BOSSE, M. HOOGENDOORN, M. KLEIN, J. TREUR et C. van der WAL : Agent-based analysis of patterns in crowd behaviour involving contagion of mental states. *Modern Approaches in Applied Intelligence*, pages 566–577, 2011.
- V. BRAITENBERG : *Vehicles : Experiments in synthetic psychology*. MIT press, 1986.
- A. BRAUN, S.R. MUSSE, L.P.L. de OLIVEIRA et B.E.J. BODMANN : Modeling individual behaviors in crowd simulation. *In Computer Animation and Social Agents, 2003. 16th International Conference on*, pages 143–148, May 2003.
- Christopher R. BROWNING : *Ordinary Men : Reserve Police Battalion 101 and the Final Solution in Poland*. Harper Perennial, 1993.
- S. CAMPANO et N. SABOURET : A socio-emotional model of impoliteness for non-player characters (Extended Abstract). *In Proceedings of The 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, pages 1123–1124. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2009a.
- S. CAMPANO et N. SABOURET : A socio-emotional model of impoliteness for non-player characters. *In 3rd International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII)*, pages 1–7, sept. 2009b.
- S. CAMPANO, N. SABOURET et V. CORRUBLE : Un modèle de comportements affectifs fondé sur la conservation de ressources. *In Workshop sur les Agents Conversationnels Animés (WACA)*, 2010.
- D. CANAMERO : A hormonal model of emotions for behavior control. *VUB AI-Lab Memo*, 2006, 1997.
- D. CAÑAMERO : Modeling motivations and emotions as a basis for intelligent behavior. *In Proceedings of the first international conference on Autonomous agents*, pages 148–155. ACM, 1997.
- L. CAÑAMERO : Emotion understanding from the perspective of autonomous robots research. *Neural networks*, 18(4):445–455, 2005.
- Walter B. CANNON : *Bodily Changes In Pain Hunger Fear And Rage*. D.Appleton And Company., 1920.
- W.B. CANNON : The james-lange theory of emotions : A critical examination and an alternative theory. *The American Journal of Psychology*, 39(1/4):106–124, 1927.
- J.W. CAUGHEY : *The California Gold Rush*. University of California Press, 1975.
- K.M. COLBY : Modeling a paranoid mind. *Behavioral and Brain Sciences*, 4(4):515–560, 1981.
- C. DARWIN : *The expression of the emotions in man and animals*. D. Appleton and company, 1874.
- M. DAVIS, P.J. WHALEN *et al.* : The amygdala : vigilance and emotion. *Molecular psychiatry*, 6(1):13–34, 2001.
- E. de SEVIN et D. THALMANN : A motivational model of action selection for virtual humans. *In cgi*, pages 213–220. IEEE, 2005.

- Etienne de SEVIN, Quentin REYNAUD et Vincent CORRUBLE : Flexmex : Flexible multi-expert meta-architecture for virtual agents. *In Advances in Cognitive Systems*, 2012.
- C. DELGADO-MATA, J.I. MARTINEZ, S. BEE, R. RUIZ-RODARTE et R. AYLETT : On the use of virtual animals with artificial fear in virtual environments. *New Generation Computing*, 25(2):145–169, 2007.
- R. DESCARTES : Les passions de l'âme. 1649.
- D. DÖRNER, J. GERDES, M. MAYER et S. MISRA : A simulation of cognitive and emotional effects of overcrowding. *In International Conference on Cognitive Modeling*, pages 92–98, 2006.
- P. EKMAN : Basic emotions. *Handbook of cognition and emotion*, pages 45–60, 1999.
- P. EKMAN et W.V. FRIESEN : Constants across cultures in the face and emotion. *Journal of personality and social psychology*, 17(2):124, 1971.
- C. ELLIOTT : *The affective reasoner : a process model of emotions in a multi-agent system*. Thèse de doctorat, 1992.
- Clark ELLIOTT et Greg SIEGLE : Variables influencing the intensity of simulated affective states. Rapport technique, AAI Technical Report SS-93-05. AAI Press. Menlo Park, CA, 1993.
- J. ELSTER : *Alchemies of the Mind*. Cambridge Univ Press, 1999.
- J.D. FISHER, A. NADLER et S. WHITCHER-ALAGNA : Recipient reactions to aid. *Psychological Bulletin*, 91(1):27, 1982.
- R.L.B. FRENCH et L. CANAMERO : Introducing neuromodulation to a braitenberg vehicle. *In Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pages 4188–4193. IEEE, 2005.
- Alexandra M FREUND et Michaela RIEDIGER : What i have and what i doÐthe role of resource loss and gain throughout life. 2001.
- NH FRIJDA : The emotions. 1986.
- N.H. FRIJDA : Emotions and action. *In Feelings and emotions : The Amsterdam symposium*, pages 158–173, 2004.
- Nico H FRIJDA : The laws of emotion. *American psychologist*, 43(5):349, 1988.
- P. GEBHARD : ALMA : a layered model of affect. *In International joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 29–36. ACM, 2005. ISBN 1595930930.
- K.J. GERGEN : The social constructionist movement in modern psychology. *American psychologist*, 40(3):266, 1985.
- S. GIL : Comment étudier les émotions en laboratoire. *Revue électronique de psychologie sociale*, 4:15–24, 2009.
- C. GODDARD : Universals and variation in the lexicon of mental state concepts. *Words and the Mind*, page 72, 2010.

- J. GRATCH et S. MARSELLA : A domain-independent framework for modeling emotion. *Cognitive Systems Research*, 5(4):269–306, 2004.
- J. GRATCH, S. MARSELLA, N. WANG et B. STANKOVIC : Assessing the validity of appraisal-based models of emotion. In *Affective Computing and Intelligent Interaction and Workshops (ACII)*, pages 1–8, 2009.
- Vu HA et Peter HADDAWY : A hybrid approach to reasoning with partially elicited preference models. In *Proceedings of the Fifteenth conference on Uncertainty in artificial intelligence*, pages 263–270. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999.
- K. HARKOUKEN-SAIAH, N. SABOURET et J.Y. DONNART : Modélisation de l’information sémantique pour la simulation d’un environnement virtuel sémantique urbain. In *Journées Francophones d’Ingénierie des Connaissances*, 2012.
- K. HARKOUKEN-SAIAH, P. SIMO-KANMEUGNE, N. SABOURET et A. BEYNIER : Simulation des déplacements en milieu urbain à l’aide d’un module sémantique. In *10ème Rencontre des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle*, 2011.
- D. HELBING, I. FARKAS et T. VICSEK : Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, Vol. 407, pp. 487-490, 2000, 2000.
- D. HELBING et P. MOLNAR : Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 51(5):4282, 1995.
- S.E. HOBFOLL : Conservation of resources. *American Psychologist*, 44(3):513–524, 1989.
- S.E. HOBFOLL : *Stress, culture, and community : The psychology and philosophy of stress*. Plenum Pub Corp, 1998.
- Guy HOCHMAN et Eldad YECHIAM : Loss aversion in the eye and in the heart : The autonomic nervous system’s responses to losses. *Journal of Behavioral Decision Making*, 24(2):140–156, 2011. ISSN 1099-0771. URL <http://dx.doi.org/10.1002/bdm.692>.
- Charles J HOLAHAN et Rudolf H MOOS : Personal and contextual determinants of coping strategies. *Journal of personality and social psychology*, 52(5):946, 1987.
- Thomas H. HOLMES et Richard H. RAHE : The social readjustment rating scale. *Journal of Psychosomatic Research*, 11(2):213 – 218, 1967. ISSN 0022-3999. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022399967900104>.
- Laurent ITTI et Christof KOCH : Computational modeling of visual attention. *Nature reviews neuroscience*, 2(3):194–203, 2001.
- C.E. IZARD : The face of emotion. 1971.
- W. JAMES : The emotions. In *The principles of psychology*, 1890.
- Hazaël JONES et Nicolas SABOURET : An affective model for a virtual recruiter in a job interview context. *Procedia Computer Science*, 15:312–313, 2012.
- Daniel KAHNEMAN et Amos TVERSKY : Prospect theory : An analysis of decision under risk. *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, pages 263–291, 1979.
- D.T. KENRICK, V. GRISKEVICIUS, S.L. NEUBERG et M. SCHALLER : Renovating the pyramid of needs. *Perspectives on Psychological Science*, 5(3):292, 2010.

- H. KIM, L.H. SOMERVILLE, T. JOHNSTONE, A.L. ALEXANDER et P.J. WHALEN : Inverse amygdala and medial prefrontal cortex responses to surprised faces. *Neuroreport*, 14 (18):2317–2322, 2003.
- H. KIM, L.H. SOMERVILLE, T. JOHNSTONE, S. POLIS, A.L. ALEXANDER, L.M. SHIN et P.J. WHALEN : Contextual modulation of amygdala responsivity to surprised faces. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(10):1730–1745, 2004.
- Peter J LANG, Margaret M BRADLEY et Bruce N CUTHBERT : Emotion, attention, and the startle reflex. *Psychological review*, 97(3):377, 1990.
- P.J. LANG, M.M. BRADLEY et B.N. CUTHBERT : Motivated attention : Affect, activation, and action. *Attention and orienting : Sensory and motivational processes*, pages 97–135, 1997.
- C.G. LANGE : The mechanism of the emotions. *The Classical Psychologists. Boston : Houghton Mifflin*, 1912, 1885.
- R.S. LAZARUS : A cognitively oriented psychologist looks at biofeedback. *American Psychologist*, 30(5):553, 1975.
- R.S. LAZARUS : Progress on a cognitive-motivational-relational theory of emotion. *American Psychologist*, 46(8):819, 1991.
- R.S. LAZARUS : The costs and benefits of denial. *Fifty years of the Research and Theory of RS Lazarus : An Analysis of Historical and Perennial Issues*, pages 227–251, 1998.
- R.S. LAZARUS et S. FOLKMAN : *Stress, appraisal, and coping*. Springer Publishing Company, 1984. ISBN 0826141919.
- W.G. LEHNERT, M.G. DYER, P.N. JOHNSON, CJ YANG et S. HARLEY : Boris?an experiment in in-depth understanding of narratives. *Artificial Intelligence*, 20(1):15–62, 1983.
- J. LIN, M. SPRARAGEN et M. ZYDA : Computational models of emotion and cognition. *Advances in Cognitive Systems*, 2:59–76, 2012.
- M.P.E. LITTRÉ *et al.* : *Oeuvres complètes d'Hippocrates*, volume 10. Baillière, 1861.
- Orlando LOURENÇO : The danger of words : a wittgensteinian lesson for developmentalists. *New Ideas in Psychology*, 19(2):89–115, 2001.
- S. LUKE, C. CIOFFI-REVILLA, L. PANAIT, K. SULLIVAN et G. BALAN : Mason : A multi-agent simulation environment. *Simulation*, 81(7):517–527, 2005.
- O. LUMINET : *Psychologie des émotions : confrontation et évitement*. De Boeck Université, 2008.
- S. MARSELLA, J. GRATCH et P. PETTA : Computational models of emotion. *A Blueprint for an Affectively Competent Agent : Cross-Fertilization Between Emotion Psychology, Affective Neuroscience, and Affective Computing*, 2010.
- S. MARSELLA, J. GRATCH, N. WANG et B. STANKOVIC : Assessing the validity of a computational model of emotional coping. *In Affective Computing and Intelligent Interaction and Workshops*, pages 1–8, 2009.

- S.C. MARSELLA et J. GRATCH : EMA : A process model of appraisal dynamics. *Cognitive Systems Research*, 10(1):70–90, 2009.
- L.L. MARTIN, T.F. HARLOW et F. STRACK : The role of bodily sensations in the evaluation of social events. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 18(4):412–419, 1992.
- Deborah Henderson MARTINEZ : *An Empirical Test of the Conservation of Resources Model of Stress*. ProQuest, 2007.
- A.H. MASLOW, R. FRAGER et J. FADIMAN : *Motivation and personality*, volume 2. Harper & Row New York, 1970.
- R.R. MCCRAE et O.P. JOHN : An introduction to the five-factor model and its applications. *Journal of personality*, 60(2):175–215, 1992.
- Michael MCGEACHIE et Jon DOYLE : Efficient utility functions for ceteris paribus preferences. In *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE*, pages 279–284. Menlo Park, CA ; Cambridge, MA ; London ; AAAI Press ; MIT Press ; 1999, 2002.
- A. MEHRABIAN : Pleasure-arousal-dominance : A general framework for describing and measuring individual differences in temperament. *Current Psychology*, 14(4):261–292, 1996.
- A. MEHRABIAN et J.A. RUSSELL : *An approach to environmental psychology*. the MIT Press, 1974.
- Gautier MEYER : *Formalisation logique de préférences qualitatives pour la sélection de la réaction d'un agent rationnel dialoguant*. Thèse de doctorat, Université Paris Sud-Paris XI, 2006.
- B. MOULIN et B. LAROCHELLE : Crowdmags, multi-agent geo-simulation of the interactions of a crowd and control forces. *Modelling, Simulation and Identification*, pages 213–237, 2010.
- E.T. MUELLER, M.G. DYER *et al.* : Daydreaming in humans and computers. In *Proceedings of the Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 18–24, 1985.
- H.A. MURRAY : *Explorations in personality : a clinical and experimental study of fifty men of college age*. 1938.
- Soraia Raupp MUSSE et Daniel THALMANN : Hierarchical model for real time simulation of virtual human crowds. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 7:152–164, 2001. ISSN 1077-2626.
- S.R. MUSSE et D. THALMANN : A model of human crowd behavior : Group inter-relationship and collision detection analysis. In *Computer Animation and Simulation*, volume 97, pages 39–51. Citeseer, 1997.
- Laurent NAVARRO, Fabien FLACHER et Vincent CORRUBLE : Dynamic level of detail for large scale agent-based urban simulations. In *The 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 2*, pages 701–708. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2011.
- P.M. NIEDENTHAL : Embodying emotion. *science*, 316(5827):1002–1005, 2007.

- A. NUGIER : Histoire et grands courants de recherche sur les émotions. *Revue électronique de Psychologie Sociale*, 4:8–14, 2009.
- K. OATLEY et P.N. JOHNSON-LAIRD : Towards a cognitive theory of emotions. *Cognition and emotion*, 1(1):29–50, 1987.
- M. OCHS, N. SABOURET et V. CORRUBLE : Modeling the dynamics of non-player characters' social relations in video games. In *Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment*, 2008.
- M. OCHS, N. SABOURET et V. CORRUBLE : Simulation of the dynamics of nonplayer characters' emotions and social relations in games. *Computational Intelligence and AI in Games, IEEE Transactions on*, 1(4):281–297, 2009.
- A. ORTONY, G. L. CLORE et A. COLLINS : *The cognitive structure of emotions*. New York : Cambridge University Press, 1988.
- P. PETTA : The role of emotions in a tractable architecture for situated cognizers. *Emotions in humans and artifacts*, pages 251–288, 2003.
- Donald W PFAFF, Arthur P ARNOLD, Anne M ETGEN, Susan E FAHRBACH et Robert T RUBIN : *Hormones, Brain and Behavior, Five-Volume Set*. Academic Press, 2002.
- R. PFEIFER : The “Fungus Eater” Approach to Emotion : A View from Artificial Intelligence. *Cognitive Studies*, 1:42–57, 1994.
- R.W. PICARD : Affective computing : challenges. *International Journal of Human-Computer Studies*, 59(1):55–64, 2003.
- R. PLUTCHIK : *Emotion, a psychoevolutionary synthesis*. Harper & Row New York, 1980.
- C. POULET, V. CORRUBLE, A.E.F. SEGHRUCHNI *et al.* : Working as a team : using social criteria in the timed patrolling problem. In *24th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, 2012.
- S. RANK et P. PETTA : Basing artificial emotion on process and resource management. *Affective Computing and Intelligent Interaction*, pages 350–361, 2007.
- Richard L RAPSON, Elaine HATFIELD et John T CACIOPPO : *Emotional contagion*. Cambridge university press, 1993.
- SD REICHER : The determination of collective behaviour. *Social identity and intergroup relations*, pages 41–83, 1982.
- C.W. REYNOLDS : Flocks, herds and schools : A distributed behavioral model. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, volume 21, pages 25–34. ACM, 1987.
- I.J. ROSEMAN et C.A. SMITH : Appraisal theory : Overview, assumptions, varieties, controversies. 2001.
- J.A. RUSSELL : Culture and the categorization of emotions. *Psychological bulletin*, 110(3):426–450, 1991.
- J.A. RUSSELL : Core affect and the psychological construction of emotion. *Psychological review*, 110(1):145–172, 2003.

- David SANDER et Klaus SCHERER : *Traité de psychologie des émotions*. Dunod, 2009.
- Irwin G SARASON, Barbara R SARASON et Edward N SHEARIN : Social support as an individual difference variable : Its stability, origins, and relational aspects. *Journal of Personality and Social psychology*, 50(4):845, 1986.
- S. SCHACHTER et J. SINGER : Cognitive, social, and physiological determinants of emotional state. *Psychological review*, 69(5):379, 1962.
- K.R. SCHERER : Appraisal theory. *Handbook of cognition and emotion*, pages 637–663, 1999.
- K.R. SCHERER : Appraisal considered as a process of multilevel sequential checking. *Appraisal processes in emotion : Theory, methods, research*, 92:120, 2001.
- Robert W SCHRAUF et Julia SANCHEZ : The preponderance of negative emotion words in the emotion lexicon : A cross-generational and cross-linguistic study. *Journal of Multilingual and Multicultural Development*, 25(2-3):266–284, 2004.
- C.E. SCHWARTZ, C.I. WRIGHT, L.M. SHIN, J. KAGAN, P.J. WHALEN, K.G. McMULLIN et S.L. RAUCH : Differential amygdalar response to novel versus newly familiar neutral faces : a functional mri probe developed for studying inhibited temperament. *Biological psychiatry*, 53(10):854–862, 2003.
- M. E. P. SELIGMAN : *Helplessness : On depression, development, and death*. WH Freeman San Francisco, 1975.
- R.A. SHWEDER : Deconstructing the emotions for the sake of comparative research. *In Feelings and emotions : The Amsterdam symposium*, pages 81–97. Cambridge University Press Cambridge, 2004.
- R.A. SHWEDER : The cultural psychology of natural kinds and the deconstruction of the emotions : A comment. *Emotion Review*, 4(4):382–384, 2012.
- H.A. SIMON : *The sciences of the artificial*. 1969.
- A. SLOMAN : Beyond shallow models of emotion. *Cognitive Processing*, 2(1):177–198, 2001.
- C.A. SMITH et L.D. KIRBY : Consequences require antecedents : Toward a process model of emotion elicitation. 2000.
- C.A. SMITH et R.S. LAZARUS : *Emotion and adaptation*. 1990.
- Craig A. SMITH et Leslie D. KIRBY : Putting appraisal in context : Toward a relational model of appraisal and emotion. 23(7):1352–1372, 2009.
- J. SONNEMANS et N.H. FRIJDA : The determinants of subjective emotional intensity. *Cognition & Emotion*, 9(5):483–506, 1995.
- C. STRAPPARAVA et A. VALITUTTI : WordNet-Affect : an affective extension of WordNet. *In Proceedings of LREC*, volume 4, pages 1083–1086. Citeseer, 2004.
- Carlo STRAPPARAVA et Rada MIHALCEA : Learning to identify emotions in text. *In Proceedings of the 2008 ACM symposium on Applied computing*, pages 1556–1560. ACM, 2008.

- J.W. THIBAUT et H.H. KELLEY : *The social psychology of groups*. Transaction Publishers, 1986.
- M. TODA et H.F.M. CROMBAG : *Man, robot, and society : Models and speculations*. M. Nijhoff Pub., 1982.
- J. TOOBY et L. COSMIDES : The past explains the present : Emotional adaptations and the structure of ancestral environments. *Ethology and sociobiology*, 11(4):375–424, 1990.
- R. TORLONE et P. CIACCIA : Finding the best when it's a matter of preference. *In Proc. 10th Italian National Conference on Advanced Database Systems (SEBD 2002), Portoferraio, Italy*. Citeseer, 2002.
- J. TSAI, E. BOWRING, S. MARSELLA et M. TAMBE : Empirical evaluation of computational emotional contagion models. *In Intelligent Virtual Agents*, pages 384–397. Springer, 2011.
- T. TYRRELL : *Computational mechanisms for action selection*. Thèse de doctorat, University of Edinburgh, 1993.
- Vinoba VINAYAGAMOORTHY, Marco GILLIES, Anthony STEED, Emmanuel TANGUY, Xueni PAN, Celine LOSCOS, Mel SLATER *et al.* : Building expression into virtual characters. 2006.
- H. VOLKEN : Une fourmi sur la plage. remarques sur les concepts d'agent et de comportement. *Revue européenne des sciences sociales*, pages 95–110, 2001.
- F. WAAL et F. AURELI : Conflict resolution and distress alleviation in monkeys and apes. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 807(1):317–328, 1997.
- JM WEISS, HI GLAZER et LA POHORECKY : Coping behavior and neurochemical changes : An alternative explanation for the original "learned helplessness" experiments. 1976.
- Joseph WEIZENBAUM : Eliza? a computer program for the study of natural language communication between man and machine. *Communications of the ACM*, 9(1):36–45, 1966.
- G.L. WHITE, S. FISHBEIN et J. RUTSEIN : Passionate love and the misattribution of arousal. *Journal of Personality and Social Psychology*, 41(1):56, 1981.
- A. WIERZBICKA : *Emotions across languages and cultures : Diversity and universals*. Cambridge University Press, 1999.
- A. WIERZBICKA : Human emotions : universal or culture-specific? *American Anthropologist*, 88(3):584–594, 2009.
- W.M. WUNDT et C.H. JUDD : *Outlines of psychology*. W. Engelmann, 1894.
- R. ZHOU et D. SOMAN : Looking back : Exploring the psychology of queuing and the effect of the number of people behind. *Journal of Consumer Research*, 29(4):517–530, 2003. ISSN 0093-5301.
- D. ZILLMANN, R.C. JOHNSON et K.D. DAY : Attribution of apparent arousal and proficiency of recovery from sympathetic activation affecting excitation transfer to aggressive behavior. *Journal of Experimental Social Psychology*, 10(6):503–515, 1974.

