



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE
Faculté de génie
Génie électrique et génie informatique

Émotions artificielles pour la structuration sociale d'un groupe de robots

Définition du projet de recherche
Spécialité : génie électrique, génie informatique

Clément RAÏEVSKY

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	1
2	Les émotions	2
2.1	Théories des émotions	3
2.1.1	Théories fondatrices	4
2.1.2	Approches cognitives	5
2.1.3	Approches intégratrices	6
2.2	Fonctions des émotions	8
3	Les émotions artificielles en robotique	10
3.1	Émotions pour l'interaction humain-robot	11
3.2	Émotions pour le contrôle d'un robot	13
3.3	Émotions pour l'apprentissage	17
3.4	Émotions pour un groupe de robots	19
3.5	Sommaire	23
4	L'architecture EMIB	25
5	Projet	28
5.1	Objectifs	28
5.2	Méthodologie	31
	BIBLIOGRAPHIE	33

1 Introduction

L'avantage du travail collectif sur le travail individuel n'est plus à démontrer. Les exemples justificatifs ne manquent pas : travailler en groupe diminue le temps nécessaire pour effectuer une tâche dès que celle-ci est parallélisable ou encore permet d'exécuter des tâches impossibles à réaliser par un individu seul. Le fait que le travail collectif permette de dépasser les limitations propres aux membres d'un groupe est donc un des moteurs qui pousse à s'organiser et à travailler en groupe. Cela est utilisé par les êtres humains depuis la création des premières sociétés. Ainsi, que se soit pour alléger notre charge de travail ou pour augmenter les profits d'une entreprise, nous tendons à faire travailler les robots à notre place. Or les capacités de ces derniers, bien qu'étant potentiellement largement supérieures aux nôtres, resteront toujours limitées. Malgré les progrès technologiques, un robot ne pourra jamais être à deux endroits en même temps ou être infaillible. Pour pallier à ces limitations, il est important de mettre au point des approches permettant aux robots de travailler en groupe, entre eux et avec nous.

Effectuer une tâche de manière collective implique, pour les membres du groupe, d'interagir les uns avec les autres. Le modèle d'interaction le plus évolué dont nous disposons est celui de l'humain. Or les interactions au sein des groupes humains sont fortement influencées par les émotions. En effet, malgré une idée qui fut très répandue, l'humain ne raisonne pas de façon purement logique et rationnelle. Damasio [13] explique que tout raisonnement, toute prise de décision est influencée par notre état émotionnel. Le rôle du corps dans les processus de pensée ne se limite pas à simplement leur fournir des informations. Des mécanismes bio-chimiques lient le fonctionnement du corps et de l'esprit. Ainsi, la sécrétion de certaines hormones, déclenchée artificiellement, peut entraîner le ressenti d'une émotion, phénomène impliquant la conscience et donc l'esprit. Inversement, certains processus de pensée comme l'imagination d'une scène ayant un contenu affectif important peuvent provoquer la sécrétion d'hormones. De façon consciente ou non, les émotions influencent notre façon d'appréhender le monde, notre raisonnement et nos capacités d'action. Il est donc difficile de nier leurs influences sur nos rapports interpersonnels, d'autant plus que les émotions ont une forte composante expressive, directement destinée à la communication.

Le travail en groupe possède également des inconvénients : lorsque une tâche est partagée entre plusieurs agents, humains ou artificiels, il apparaît inévitablement des conflits entre eux au niveau des ressources qu'ils partagent. Par exemple comme deux agents ne peuvent pas être au même endroit au même moment, le partage de l'espace où s'effectue la tâche est une source de conflit.

Goldberg et Mataric [20] expliquent que l'instauration de structures sociales dans un groupe de robots permet de diminuer le nombre de conflits spatiaux (collisions) au sein de ce groupe. Dans le même sens, Argyle [1] affirme que les structures sociales qui existent chez les grands singes réduisent les forces agressives et donc les combats, diminuant ainsi les risques de blessures pour les membres du groupe.

Il ressort donc qu'un groupe a intérêt à se structurer pour diminuer les interférences entre ses membres et augmenter ses performances. Or, la mise en place d'une structure organisationnelle nécessite des interactions entre les membres du groupe. Puisque les interactions au sein des groupes humains sont fortement influencées par nos émotions, il est légitime de se baser sur une approche émotive pour améliorer le comportement d'un groupe de robots. L'objectif du projet présenté ici est donc de fournir à des robots des aptitudes similaires aux fonctions des émotions, identifiées par une revue des travaux en psychologie présentée à la section 2. La section 3 fait l'objet d'une description des travaux utilisant la notion d'émotion dans le domaine de la robotique afin de mettre en évidence ce qui a été fait et ce qui reste à faire. Cet état de l'art ne recense pas les travaux faits sur les agents logiciels car les environnements que ceux-ci rencontrent sont trop différents des environnements réels dans lesquels évoluent les robots. Ainsi, les perceptions des agents logiciels sont souvent symboliques et donc chargées de sens, ce qui est loin d'être le cas des agents matériels. Par conséquent, les prises de décisions ne peuvent se faire sur de mêmes bases. La section 4 présente l'architecture décisionnelle qui servira de base pour l'implémentation de l'approche. Enfin, la section 5 décrit le projet de recherche, les méthodologies qui seront appliquées ainsi que les étapes à franchir.

2 Les émotions

Les émotions ont longtemps été considérées comme des perturbations dans le fonctionnement normal de l'esprit humain. Cependant, cette idée n'a pas résisté aux études en psychologie et physiologie. Ainsi, les recherches effectuées par Damasio [13] sur des patients atteints de lésions au cerveau montrent qu'un individu privé d'émotions n'est plus capable d'avoir une vie normale. Dantzer [14] explique également que les émotions jouent un rôle prépondérant dans la catégorisation du monde faite par les humains en nous fournissant notre plus fondamentale classification du monde : la dichotomie agréable/désagréable. Le fait que les émotions aient été conservées au cours de l'évolution dans le fonctionnement cognitif des humains, qui sont l'exemple le plus évolué dont nous disposons en matière de pensée, suggère également qu'elles sont au moins utiles sinon nécessaires aux

processus de pensée.

Dans le même sens, Minsky [33] pose la question de la nécessité des émotions pour la synthèse de l'intelligence :

La question n'est pas de savoir si des machines intelligentes peuvent avoir des émotions mais si des machines peuvent être intelligentes sans avoir d'émotions. (p. 307)

Cependant, tout travail qui traite des émotions se trouve confronté au problème que pose le terme "émotion". En effet, cette notion recouvre énormément de phénomènes psychologiques et physiologique. Par exemple, la peur qu'entraîne un grand bruit à proximité d'une personne est considéré comme une émotion au même titre que la honte entraînée par une situation sociale embarrassante. Or, ces deux réactions impliquent des mécanismes, des représentations internes et des connaissances très différentes. Ainsi, Arkin [2] qualifie la notion d'émotion comme "nébuleuse" et "relativement non-scientifique" et préfère considérer les émotions comme un sous-ensemble des motivations.

Un autre problème qui se pose lors de l'étude des théories psychologiques portant sur les émotions est l'écart qui existe entre les modèles proposés et une implémentation éventuelle. Beaucoup de modèles psychologiques partent de pré-requis comme la connaissance du caractère agréable ou désagréable d'un stimulus. Or, cette information est loin d'être triviale à obtenir. Il est donc difficile de baser directement un modèle concret de synthèse d'émotions sur des théories de ce type. Cependant, ces théories sont utiles pour identifier les fonctions des émotions. Comme le dit Arkin [2], la variété des modèles et des théories est plus à célébrer qu'à fustiger : tous ces modèles sont susceptibles d'être utilisés pour améliorer les performances des robots, que ces modèles correspondent effectivement au fonctionnement des émotions humaines ou non.

La place manque ici pour détailler toutes les théories des émotions issue de la psychologie. Le lecteur peut consulter des revues de ces théorie dans [14], [45], [16] ou une synthèse plus spécifique à leurs utilités pour la robotique dans [31] et [28]. Les principales sont cependant présentées par ordre chronologique dans la section 2.1. La section 2.2 présente les arguments, tirés des théories des émotions, qui justifient en quoi les émotions sont utiles pour un groupe et notamment pour sa structuration.

2.1 Théories des émotions

Cette section présente, à la section 2.1.1, les premières théories élaborées au sujet des émotions, suivi, à la section 2.1.2 de la description d'un courant plus récent qui regroupe de nombreux travaux,

soient les approches cognitives des émotions. Enfin, la section 2.1.3 présente les travaux qui intègrent différentes théories et approches pour formuler leurs modèles de fonctionnement des émotions.

2.1.1 Théories fondatrices

Strongman [45] présente les premières théories, établies entre la fin du dix-neuvième siècle et la fin des années trente par James et Lange, Cannon et Bard, Papez et Watson. Il explique que ces théories contiennent des concepts essentiels qui n'ont pas été remis en questions par les théories plus modernes :

- Les émotions forment un système qui est influencé et qui influence d'autres systèmes.
- Des émotions différentes peuvent avoir des points communs, c'est-à-dire qu'elles possèdent des composantes non spécifiques.
- Il existe deux classes d'émotions : les émotions primaires ou fondamentales, et les émotions secondaire, dérivées des émotions primaires.
- Les émotions ont des niveaux d'intensité qui changent leur nature lorsque ce niveau passe un certain seuil.
- Les émotions influencent le reste du système en modifiant l'état des motivations ou l'aspect énergétique du comportement.
- Les émotions et la cognition sont intimement liées.
- Les émotions peuvent avoir une influence sur le système moteur et donc sur les expressions, faciales ou corporelles.

Malgré leurs points communs, ces théories ont un point de désaccord qui persiste encore. La théorie développée successivement par James [22] et Lange [24] postule que les réactions physiologiques suivent immédiatement la perception d'un stimulus et que les modifications au niveau cognitif proviennent de la perception subjective de ces modifications. À l'inverse, Cannon [11] et Bard [3] affirment que les modifications physiologiques se produisent en même temps que les modifications cognitives et surtout n'en sont pas la cause.

Bien qu'elles ne soient pas unanimes, ces théories fournissent des éléments pour identifier quelles caractéristiques doivent posséder des approches robotiques utilisant le concept d'émotion. La section 3 présente les différentes approches en robotique qui utilisent le concept d'émotion et dans quelle mesure les modèles proposés possèdent les caractéristiques présentées ci-dessus.

2.1.2 Approches cognitives

Parmi les théories plus récentes, il est possible de distinguer un courant de pensée bien particulier : les approches cognitives. Les principaux représentants de cette école de pensée sont Bull, Simonov, Leventhal, Scherer, Schachter, Arnold et Lazarus [45]. Ces approches sont caractérisées par le fait qu'elles considèrent que des traitements cognitifs jouent un grand rôle dans les émotions. Ainsi, pour ces approches, les émotions dépendent fortement de notre évaluation ou de notre appréciation de la situation présente [45]. Pour Leventhal [26], les émotions sont une forme de cognition car elles fournissent de l'information sur la situation courante et que cette fonction caractérise la cognition. Scherer présente une séquence d'évaluation des stimuli (*Stimulus Evaluation Checks*) qui serait à l'origine des émotions. Cette séquence est constituée de cinq étapes qui évaluent :

1. la nouveauté ou le caractère inattendu du stimulus ;
2. la qualité plaisante ou déplaisante ;
3. le rapport aux buts courants ;
4. la possibilité de s'adapter, de réagir ;
5. l'accord avec les normes sociales et le concept de soi.

Bien que d'un point de vue subjectif ces traitements soient élémentaires et quasi-instantanés, ils ne sont pas triviaux à mettre en œuvre à partir de données sensorielles. Ainsi, le caractère plaisant d'un stimulus dépend de la mémoire, de données innées ainsi que de l'état interne présent. Par ailleurs, le rapport aux buts courants implique la connaissance de liens de cause à effet entre des actes et des modifications du monde. Or, il nous faut une dizaine d'années pour apprendre les formes élémentaires de ces liens. Lazarus considère une émotion comme étant la combinaison d'une évaluation cognitive, d'une tendance à l'action et d'une réaction physiologique particulière. Il insiste sur le fait que ces différentes réactions sont perçues comme un seul et même phénomène [41].

Frijda [16] résume la position des théories cognitive comme suit :

“Les émotions dépendent des appréciations, et les appréciations incluent les représentations de ce qui est présent et désiré.” (p. 64)

Comme ces représentations sont considérées comme une forme de cognition, les émotions dépendent de la cognition. Cependant, Frijda va plus loin : il affirme que les émotions ne sont pas seulement un processus cognitif.

Pour justifier cette proposition, il explique que :

- les appréciations conscientes et les attributions ne constituent pas l’essentiel de l’émotion ;
- les évaluations hédoniques, qui ont un grand rôle dans le processus émotionnel, ne sont pas cognitives ;
- les modifications de la préparation à l’action se font de manière involontaire la plupart du temps.

Pour lui, le processus à l’origine d’une émotion fait intervenir non seulement l’évaluation cognitive de la situation ainsi que les buts courants du système, mais aussi la disponibilité de ses ressources matérielles. Enfin, il considère qu’un des rôles des émotions est d’améliorer les capacités d’adaptation du système.

2.1.3 Approches intégratrices

Comme Frijda, de nombreux chercheurs se tournent vers des approches intégratrices pour faire face à la multitude de théories qui existe dans le domaine. Les principaux représentants de ces approches intégratrices sont Mandler, Leeper, Plutchik, Izard, Ekman, Tomkins et Goleman [45]. Les principaux concepts qui sont introduits par ces chercheurs et qui sont susceptibles d’être utiles pour la mise au point d’un système exhibant des émotions sont les suivants :

- Mandler [27] présente une théorie conflictuelle des émotions selon laquelle les émotions apparaissent en fonction de la similitude entre les prémisses des schémas cognitifs du système et les perceptions courantes. Ainsi, une émotion de valence négative apparaît lorsque les données sensorielles présentes ne correspondent à aucun schéma cognitif. Ce concept peut être mis en œuvre dans l’architecture hybride décrite à la section 4 à l’aide d’un mécanisme de surveillance des modules comportementaux.
- Leeper [28] explique que les émotions ne sont pas actives uniquement lors d’épisodes exceptionnels, mais qu’elles agissent en continu comme source de motivations pour les comportements. Il ajoute que, comme ce sont les motivations qui orientent le comportement, les émotions permettent aux comportements d’être dirigés vers des buts.
- Plutchik [41] affirme que les émotions sont en lien direct avec quatre problèmes universels d’adaptation qu’il définit : le problème de hiérarchie, le problème de territorialité, celui d’identité et enfin celui de temporalité. Plutchik considère que ces problèmes orientent l’adaptation de tous les individus dès qu’ils font partie d’un groupe. Pour lui, les émotions sont donc essentielles pour la gestion des relations sociales. Nous verrons à la section 2.2 comment cela peut être utilisé dans le cadre de la robotique collective.

- Goleman [21] sépare les fonctions cérébrales en deux grandes parties : l'esprit limbique¹ et l'esprit rationnel. Pour lui, l'esprit limbique est le siège des traitements émotionnels qu'il considère comme rapides et imprécis. D'autre part l'esprit rationnel est capable de prendre du recul sur les sentiments et sur son propre fonctionnement. Cet esprit est également en charge de raffiner les traitements de l'esprit émotionnel. Goleman insiste sur le fait que les fonctionnements des deux esprit sont intimement liés.

Aucun domaine scientifique n'étant complètement cloisonné, certaines théories récentes des émotions ont subi l'influence de domaines comme l'informatique et l'intelligence artificielle. Ainsi, Oatley et Johnson-Laird [35] considèrent les émotions comme un système permettant d'ordonner des processus cognitifs. Ils proposent d'organiser ces processus en hiérarchies dans lesquelles les processus de haut niveau font appel aux processus situés plus bas dans la hiérarchie. Pour eux, les modes de fonctionnement émotionnels servent à :

- placer les différents processus qui composent un système cognitif dans un mode de fonctionnement particulier parmi un nombre restreint.
- modifier les priorités relatives de différents buts ainsi qu'à maintenir ces priorités à jour dans d'autres parties du système. Cela permet de faire ressortir certains buts par rapport à d'autres lors de prises de décision².
- signaler aux autres individus les moments importants dans le déroulement d'un plan mutuel.

Comme Plutchik, ils affirment que les émotions ont un rôle à jouer dans les relations sociales :

“Emotions are a form of external communication, important in the adjustment of social relations.”

[35] (p. 48)

¹Goleman reprend la division du cerveau en trois sous-parties introduites par MacLean, mais va plus loin en ne limitant pas les interactions entre ces parties à des inhibitions. Il s'accorde avec LeDoux pour dire que le cerveau limbique ne se limite pas à un seul lieu neurologique.

²Ils citent Tomkins pour affirmer que cette mise en relief de certains buts est réalisée en modifiant les motivations correspondant à ces buts.

En ce qui concerne les réactions émotionnelles à des stimuli, Mandler [27] indique que les modifications physiologiques ne sont pas suffisantes à leur déclenchement :

“... conflicting interruptive (mental and environmental) events play an important role in emotion and many even play an important role in generating the visceral substratum. Conversely, it is recognised that mere visceral response is not a sufficient condition for emotional phenomena, though it may be necessary; other mental or cognitive, events are also required.”

Pour conclure cette brève revue des théories des émotions, plusieurs théories avancées par les scientifiques du domaine. Parmi les plus englobantes, Plutchik [40] estime qu’il est possible de caractériser un état émotionnel comme étant une combinaison de différentes réactions du corps :

“An emotion may be defined as a patterned bodily reaction of either destruction, reproduction, incorporation, orientation, protection, reintegration, rejection, or exploration or some combination of these, which is brought about by a stimulus.”

Les aspects incompatibles des nombreuses définitions qui existent ont poussé Kleinginna et Kleinginna [23] à formuler une définition assez générale :

“Emotion is a complex set of interactions among subjective and objective factors, mediated by neural/hormonal systems, which can (a) give rise to affective experiences such as feelings of arousal, pleasure/displeasure; (b) generate cognitive processes such as emotionally relevant perceptual effects, appraisals, labelling processes; (c) activate widespread physiological adjustments to the arousing conditions; and (d) lead to behaviour that is often, but not always, expressive, goal-directed, and adaptive.”

Cette définition montre bien qu’il est plus aisé de caractériser les émotions par leurs fonctions que par leurs causes et leurs fonctionnements. C’est pourquoi la section 2.2 présente les principales fonctions des émotions qui sont utiles dans la réalisation de ce projet.

2.2 Fonctions des émotions

De ces études trois rôles des émotions dans les processus décisionnels sont identifiables :

- Les capacités d’adaptation que fournissent les émotions à un agent.
- Le fait que les émotions facilitent l’organisation du comportement social des membres d’un groupe.
- L’influence des émotions sur les communications interpersonnelles.

La fonction adaptative des émotions vient en partie du fait qu’elles permettent de mettre en valeur les stimuli pertinents d’une situation et de leur ajouter une qualité agréable ou désagréable [14]. Cela permet de réduire la charge de travail nécessaire à l’analyse de cette situation. Elles facilitent également les transitions entre les différents modes de comportement car elles apparaissent lors de changements significatifs dans l’environnement, c’est-à-dire les changements en rapport avec les objectifs et comportements courants [27][35]. Le problème des changements de comportement apparaît en robotique car les robots évoluent dans un espace continu dans lequel les transitions entre situations pertinentes ne sont pas évidentes. Il semble clair que la fonction de signal des émotions est primordiale. En effet, que ce soit au niveau social ou lors de transitions entre plans, les émotions renseignent sur l’occurrence d’une situation particulière à traiter différemment des autres. Elles permettent de distinguer les situations pertinentes des situations de fonctionnement normal et ainsi de ne pas noyer les informations utiles dans une masse d’informations inutiles.

Un autre problème que les émotions peuvent nous permettre de résoudre est celui de la modélisation de l’environnement. Modélisation qui est impossible en robotique du fait que les robots évoluent dans le monde réel. En effet, les théoriciens incluant un aspect cognitif aux émotions sont globalement d’accord sur le fait que les émotions naissent de la comparaison entre le désiré et l’estimé [16]. Donc, à défaut de pouvoir le modéliser, les émotions peuvent permettre d’évaluer dans quelle mesure le monde³ est et tend vers un état satisfaisant. Cela permet à un agent de prendre une décision en fonction de l’état actuel du monde sans avoir un modèle précis de celui-ci. En tant qu’humains, nous ne possédons d’ailleurs pas de modèle détaillé du monde qui nous entoure et nous sommes capables de nous comporter de manière autonome.

L’utilisation des émotions se justifie donc clairement pour la conception d’un système robotique seul. Elles permettent en effet une meilleure adaptation de l’agent à son environnement. Les émotions peuvent aussi être utilisées dans un contexte de robotique collective. Le fait que les émotions aient une composante expressive n’est plus à discuter. Certains théoriciens reconnus et influents comme Izard [12] ou Ekman [25] prêtent même à l’expression faciale des émotions un rôle prépondérant dans l’expérience émotionnelle. Il n’est donc plus possible de nier le fait qu’une part de nos émotions est visible par les autres et qu’elles influencent nos relations interpersonnelles. La prolifération des binettes⁴ dans le courriel ou dans le clavardage⁵ en sont d’ailleurs des symptômes clairs.

³Ici le monde comprend l’environnement et l’être lui-même.

⁴Traduction du mot anglais “smiley” selon l’Office Québécois de la Langue Française.

⁵Traduction du mot anglais “chat” selon l’Office Québécois de la Langue Française.

Les études faites par Goldberg et Matarić [20] ainsi que les exemples de nos sociétés et des sociétés animales démontrent l'utilité de structurer un groupe pour diminuer les situations de conflit nuisibles aux individus dans leur ensemble. Le parallèle entre l'importance du répertoire émotionnel des humains et le fait que nous possédions les sociétés les plus complexes suggèrent que les émotions ont un rôle à jouer dans l'établissement de telles structures sociales.

Dans le même sens, Argyle [1] dit :

“An important part of the social signalling system is the expression of emotions and interpersonal attitudes by postures and facial expression.” (p. 26)

De plus, considérant qu'une émotion reflète une partie de l'état interne issu de l'interaction d'un individu avec son environnement, alors l'expression d'une émotion permet de transmettre une information chargée de sens entre deux individus. Un tel échange fournit les bases d'une communication. Cette forme de communication, bien qu'étant trop primitive pour permettre la coordination de plans ou le partage d'objectifs, permet l'établissement de relation d'ordre entre individus. Or, il est possible de structurer un ensemble d'éléments à partir d'une relation d'ordre. Plutchik [41] explique ainsi que la peur et la colère interviennent dans la mise en place des structures hiérarchiques verticales qui existent chez les animaux mais aussi chez les humains. Il semble donc que l'expression d'émotions par les membres d'un groupe permet la structuration de ce groupe et donc la diminution des situations de conflit néfastes à l'ensemble du groupe. Cette dernière affirmation est une des hypothèses que le présent projet a pour but de vérifier.

3 Les émotions artificielles en robotique

Le concept d'émotion est de plus en plus utilisé en robotique mobile, notamment pour rendre plus naturelle l'interaction humain-robot, pour améliorer le contrôle d'un robot ainsi que pour faciliter l'apprentissage. Les sous-sections 3.1, 3.2 et 3.3 présentent les approches qui traitent respectivement de ces trois aspects.

Afin de comparer les différentes approches et faire ressortir les aspects importants de chacune d'elle, il est utile de donner une définition de ce qu'est un système doué d'émotions artificielles. Comme mentionné à la section 2.1.3, aucune définition ne fait encore l'unanimité et ce n'est pas la prétention de la définition suivante. Dans la suite, cette définition sert de référence afin de faciliter la comparaison entre les différentes approches et sera donc appelée définition de référence. Elle a

été obtenue à partir de l'analyse et de la synthèse des éléments présents dans les approches actuelles en intelligence artificielle qui traitent des émotions ainsi que des théories et modèles venant de la psychologie.

Un système est dit avoir des émotions artificielles si :

1. L'état émotionnel du système dépend à la fois de l'état de l'environnement et de l'état interne du système.
2. Les émotions influencent les capacités motrices ainsi que les tendances à l'action du système.
3. Les émotions influencent les capacités cognitives du système.
4. L'état émotionnel peut être modifié par les capacités cognitives.
5. Les émotions influencent la perception que le système a du monde.
6. Les émotions sont indépendantes de la tâche que le système effectue.
7. Le système utilise la fonction communicative des émotions pour influencer son contexte social.

3.1 Émotions pour l'interaction humain-robot

Les travaux de Breazeal [5] [6] [8] [7] visent à établir une interaction sociale entre un robot, Kismet, et une personne. Pour ce faire, Breazeal s'inspire de la relation qui existe entre un parent et un enfant lorsque s'établissent les premières formes de communication. Dans ce but, elle fournit à Kismet des capacités d'expression de son état émotionnel. Elle explique que cette forme de communication permet au tuteur humain de savoir dans quelle mesure il satisfait les besoins de Kismet et ainsi de maintenir des conditions favorables à l'apprentissage. Breazeal met l'accent sur le rôle de la posture et des expressions du visage pour maintenir un niveau de stimulation approprié pour l'apprenant dans ce type d'interaction sociale. En effet, le tuteur peut savoir si Kismet est trop ou, au contraire, pas assez stimulé en observant les traits de son visage. Cela ne demande que peu d'effort au tuteur car nous sommes habitués à interpréter ces signes au quotidien. Ces actes de communication permettent à Kismet de modifier le comportement de sa tutrice en vue de satisfaire ses propres besoins ou envies, sans toutefois demander un gros effort d'interprétation à celle-ci. Kismet possède donc les bases nécessaires à l'établissement d'une communication sociale chargée de sens. Le fait que Kismet puisse influencer son environnement social permet à cette approche de répondre au point 7 de la définition de référence.

Breazeal situe son approche dans les architectures à base d'agents : les différents composants qui constituent le système travaillent en parallèle et s'influencent mutuellement. Comme présenté à la

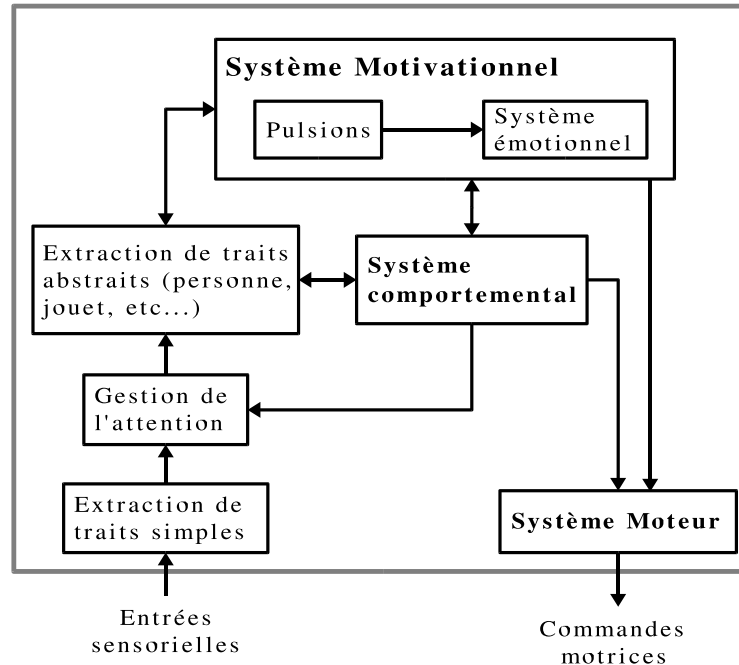


Figure 1 – Schéma de l'architecture développée par Breazeal pour le contrôle du robot Kismet.

figure 1, l'architecture se décompose en six sous-systèmes dédiés respectivement à la perception de l'environnement, à la gestion de l'attention, à l'extraction de stimuli abstraits comme la présence d'une personne, à la sélection des comportements, à l'accomplissement des commandes motrices et enfin à la gestion des motivations. Ce dernier sous-système comporte une partie dédiée aux émotions. Les émotions y sont représentées sous la forme d'unités de calcul élémentaires qui sont des transducteurs, c'est-à-dire l'équivalent de neurones artificiels à fonction échelon. L'état émotionnel de Kismet est donc déterminé par les différents niveaux d'activation de ces unités de calcul. Ces niveaux d'activation sont influencés à la fois par l'état interne du robot et par l'interprétation qu'il fait de son environnement ; ceci répond au point 1 de la définition de référence. Ses buts ou besoins, son état affectif actuel, le comportement qu'il est en train d'effectuer mais aussi l'évaluation affective⁶ des stimuli externes modifient également son état émotionnel. L'approche correspond donc au point 4 de la définition de référence. Pour ce qui est du point 6, la tâche de Kismet étant d'exprimer son état émotionnel, il ne s'applique pas à cette approche. L'état émotionnel de Kismet modifie directement son comportement, et non ses capacités d'action ou ses tendances à l'action. Ce système ne correspond donc que partiellement au point 2 de la définition de référence. En revanche,

⁶I.e. selon leur intensité, leur pertinence, leur caractère intrinsèquement agréable ou désagréable ainsi que selon leur accord avec les buts courants.

le fait que cet état influence ses capacités cognitives par le biais de l'ajustement de son attention répond bien aux points 3 et 5 de cette définition.

Dans les expériences qui ont servi de validation à l'approche, Kismet est doté de cinq émotions de base (colère, dégoût, peur et joie) plus trois ajoutées (surprise, intérêt et excitation) car étant reconnues comme jouant un rôle dans la communication entre un enfant et ses parents.

3.2 Émotions pour le contrôle d'un robot

Ogata et Sugano [36] montrent qu'il est possible de simuler les interactions fines qui existent entre le corps et les émotions via le système hormonal. Dans cette approche, les émotions n'apparaissent pas en tant que telles, mais une partie de leur fonctionnement physiologique est mis en place : les circonstances, internes et externes, sont évaluées du point de vue de l'auto-préservation et influencent la sécrétion de quatre hormones. Dans la pratique, les quantités d'hormones émises sont déterminées par les valeurs obtenues par cette évaluation ainsi que par leurs variations. Cette interprétation des perceptions peut être mise en parallèle avec l'appréciation émotionnelle que nous faisons des situations en ce qui concerne les émotions primaires. Par exemple, la peur que nous inspire un grand bruit modifie notre comportement en libérant des hormones comme l'adrénaline dans notre sang. L'influence des émotions dans ce système se traduit par la modification des ordres moteurs standards en fonction des taux des différentes hormones. Le système a été validé en simulation ainsi que sur une expérimentation robotique. Les résultats montrent l'apparition d'un comportement combinant un évitement d'obstacle et l'avancée vers une cible. Ces travaux exhibent donc les caractéristiques physiologiques des émotions comme les réactions hormonales et la modification des capacités d'action associées à celle-ci. Ils répondent donc au point 1 de la définition de référence. Comme pour Breazeal, les ordres moteurs sont directement modifiés et non les tendances à l'action : le point 2 est donc partiellement satisfait. En revanche, les hormones n'influencent pas les perceptions du système, ce qui ne répond donc pas au point 5. D'autre part, il n'est fait aucune mention d'un aspect cognitif, le modèle ne contenant pas de partie délibérative. Les points 3 et 4 de la définition ne s'appliquent donc pas. Les fonctions s'apparentant à des émotions étant basées sur une mesure d'auto-préservation et non sur des perceptions ou une mesure de l'avancée de la tâche, elles correspondent au point 6. À l'inverse de l'approche précédente, l'expression de l'état émotionnel n'est pas présente, tout simplement parce que cet état n'est pas modélisé. Le point 7 n'est donc pas satisfait.

L'approche de Cañamero [10] modélise également l'aspect hormonal des émotions. Cependant, la comparaison s'arrête là. En effet, cette approche s'inspire fortement de la théorie de Minsky [33] selon laquelle les émotions sont des agents particuliers au sein d'une société d'agents interagissant. Les émotions sont, par conséquent, explicitement représentées dans son approche, contrairement à l'approche précédente. De plus, l'introduction de motivations et les multiples interactions entre tous les composants du système montrent une plus grande complexité de l'approche. Dans l'architecture proposée, chaque agent émotion possède un stimulus déclencheur, une intensité, la liste des hormones dont elle produit l'émission, une liste de symptômes physiologiques et une liste des variables physiologiques qu'elle est susceptible d'influencer. La figure 2 schématise un agent émotion selon l'approche de Cañamero.

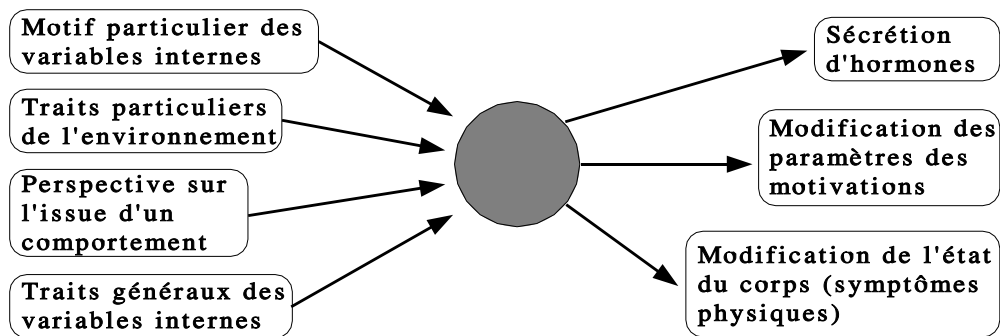


Figure 2 – Schéma d'un agent émotion dans l'architecture de Cañamero pour le contrôle du robot Abott.

Le système est décrit comme ayant les aptitudes émotionnelles d'un jeune enfant et donc n'ayant qu'une seule émotion active à la fois. Le choix de l'émotion à activer prend en compte la reconnaissance de traits particuliers dans les perceptions du robot par des agents reconnaisseurs, ainsi que la détection de motifs dans les variations de l'état interne. L'approche vérifie donc le point 1 de la définition de référence. Les agents émotionnels agissent sur les autres agents par le biais des hormones : leurs différents taux influent sur les motivations du système, c'est-à-dire sur les agents qui choisissent les comportements adéquats en fonction des perceptions courantes. L'approche a été validée dans une simulation où l'architecture proposée contrôle une créature virtuelle, Abbot, dans un monde à deux dimensions. Bien que cette approche soit plus complète et plus évoluée que la précédente, elle reste très figée. Les influences entre les différents agents du système sont prédéterminées dans le but d'obtenir le comportement souhaité.

Toujours concernant l'approche de Cañamero, les points 2 et 5 de la définition de référence sont remplis. En effet, les émotions ne modifient pas directement le comportement mais modifient soit les motivations, soit les perceptions du système. Comme il n'y a pas clairement de partie cognitive dans l'architecture de Cañamero, les points 3 et 4 ne s'y appliquent pas. La façon dont sont générées les émotions ne correspond pas complètement au point 6 car elles dépendent de la détection de traits spécifiques à la tâche dans l'environnement. Cependant comme les prévisions faites sur l'issue d'un comportement et non sur la réalisation d'une tâche particulière, il est possible de considérer que le point 6 est partiellement satisfait. Comme dans l'approche précédente, l'aspect expressif des émotions n'apparaît pas et le point 7 n'est donc pas satisfait.

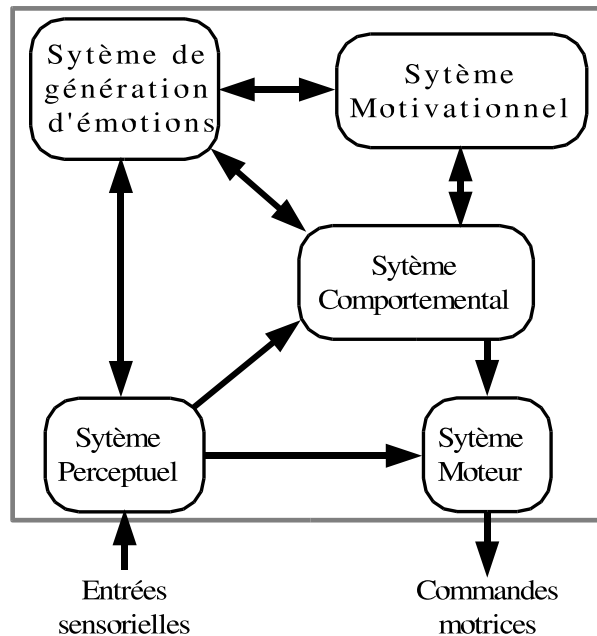


Figure 3 – Organisation conceptuelle des différents systèmes de l'architecture de Velásquez.

La théorie de Minsky a également inspiré le travail de Velásquez [46] [47]. Comme pour les travaux de Cañamero, tous les éléments qui composent le système sont des agents correspondant aux proto-spécialistes de Minsky. Cependant, Velásquez s'intéresse plus à la modélisation de l'aspect neural des émotions. La figure 3 présente les cinq sous-systèmes dans lesquels sont regroupés les différents agents de l'architecture. Le système émotionnel regroupe les agents par lesquels Velásquez modélise les six émotions basiques qu'il identifie : *colère*, *peur*, *détresse/tristesse*, *joie/bonheur*, *dégoût* et *surprise*.

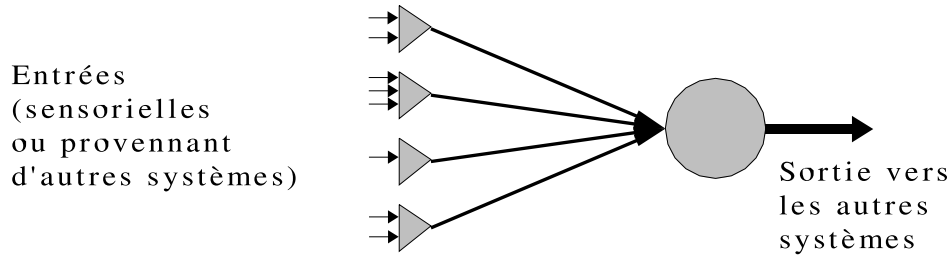


Figure 4 – Unité de calcul considérée comme un agent dans l'architecture de Velásquez.

Tous les agents sont constitués d'une unité de traitement non-linéaire représentée à la figure 4. Cette unité est elle-même composée d'un neurone et de déclencheurs⁷. Ces derniers envoient un signal au neurone s'ils détectent la présence de motifs particuliers dans les données reçues en entrée. Ces déclencheurs sont soit innés, c'est-à-dire fixés au moment de la conception du système, soit acquis par apprentissage. Les déclencheurs innés sont à l'origine des émotions primaires, directement associées aux stimuli, alors que les déclencheurs acquis, dont la fonction est d'anticiper l'activation de déclencheurs innés, permettent l'apparition d'émotions secondaires. Chaque déclencheur possède une mémoire à court terme et peut donc s'habituer aux stimuli. Les neurones qui concernent les émotions sont non seulement influencés par leurs déclencheurs mais prennent également en compte des signaux provenant des autres neurones émotionnels ainsi qu'un facteur de décroissance temporelle pour déterminer leurs activations. Cette propriété valide le point 1 de la définition de référence. L'apprentissage des déclencheurs acquis se fait par une loi de Hebb modifiée.

Dans cette approche, le tempérament est modélisé par les différents paramètres des neurones émotionnels, notamment les seuils des déclencheurs, les poids de leurs signaux ainsi que la fonction de décroissance. Ce système a été utilisé pour contrôler le visage d'un enfant virtuel, et, plus récemment, Yuppy [46], un robot de compagnie du MIT AI Lab. Ce dernier possède dix-neuf comportements essentiellement orientés vers la satisfaction de ses besoins et vers l'interaction avec des humains. Une caractéristique intéressante de l'implémentation est que le sous-système responsable des motifs du robot intervient sur les comportements via les émotions et non en modifiant les ordres moteurs directement comme c'est le cas dans les travaux de Ogata et Sugano [36]. En effet, ici, les émotions sont la principale motivation dans les choix de comportements, comme c'est souvent le cas chez les humains. Les émotions sont donc utilisées par le module motivationnel pour influencer les comportements mais ne sont pas déterminées par les buts ou l'avancée d'une tâche en cours. Ceci

⁷Traduction française du mot anglais *releasers* selon l'Office Québécois de la Langue Française.

vérifie le point 2 de la définition de référence. Comme dans Breazeal [6], le robot n'a pas de tâche à effectuer en particulier, le point 6 ne s'applique donc pas. Les différentes influences entre le module émotionnel et les autres modules valident les points 3, 4 et 5. Le point 7 n'est satisfait qu'en partie étant donné que la communication des émotions ne se fait que du système vers l'extérieure et non l'inverse. Toutefois, il apparaît que cette approche est la plus aboutie parmi celles qui utilisent le concept d'émotion à l'heure actuelle.

3.3 Émotions pour l'apprentissage

Le but premier des travaux de Foliot et Michel [15] est de montrer que des processus inspirés du fonctionnement des émotions peuvent servir de base à l'émergence d'une forme de cognition en amorçant l'apprentissage. Ils se positionnent par rapport aux autres approches en affirmant qu'à l'inverse de celles-ci ils ne considèrent pas pertinent d'utiliser des étiquettes émotionnelles : d'une part elles sont controversées, et d'autre part l'accès à ces étiquettes provient des capacités de conscience et d'introspection de l'humain. Ils affirment également que les émotions doivent servir à faire face à toutes les situations et non pas uniquement aux situations particulières. Ils posent comme hypothèse de travail que les émotions sont à la base de la cognition car elles fournissent un mode de fonctionnement par défaut. Dans le modèle proposé, il n'y a pas de mention explicite des émotions : ce sont des processus qui leur sont attribués par les théories cognitivistes qui sont reproduits. Ainsi, tout le système est influencé par un processus d'évaluation (*appraisal*) que les théories cognitivistes considèrent comme étant à la fois à l'origine des émotions et ce qui les définit. Par exemple, les buts courants du système sont déterminés à partir des résultats d'un processus d'évaluation de la situation inspiré du modèle SEC⁸ de Scherer [43]. Une validation du modèle a été faite dans deux expériences visant à apprendre un évitement d'obstacle à un robot simulé dans l'environnement Webots⁹. Dans la première, l'apprentissage se fait par remplissage d'une matrice associative qui contient une entrée pour chaque situation sensorielle possible. Les phases d'apprentissage se déclenchent à chaque fois qu'une situation désagréable (ici une collision) est rencontrée : les entrées correspondantes à la situation ayant précédé la situation désagréable sont remplies avec les ordres moteurs qui ont permis de sortir de cette situation. Pour la seconde expérience, le processus d'apprentissage est beaucoup moins bien décrit. Il semblerait que la détection d'une valeur de déplaisir forte dans l'état global déclenche le début d'un processus de création d'un schéma

⁸*Stimulus Evaluation Checks.*

⁹Voir <http://www.cyberbotics.com/products/webots/index.html>.

d'action. Ce schéma associe les stimuli désagréables et les actions qui ont permis de revenir dans un état convenable. L'état global est déterminé par l'appréciation de la situation selon le modèle SEC de Scherer [43] vu à la section 2.1. Ici, un stimulus est tout d'abord évalué selon son degré de nouveauté ; en second lieu, son caractère plaisant ou non est évalué en comparant ce degré de nouveauté aux penchants du système ; ensuite, une mesure de pertinence du stimulus par rapport aux buts est ajoutée ; enfin, les valeurs obtenues servent à déterminer si une adaptation ou une réaction est possible. Les points 1 et 4 sont donc satisfaits. Bien que cela ne soit pas clairement présenté, il semble que l'appréciation se fasse non seulement au niveau des senseurs mais aussi, dans un second temps, par une observation subjective de l'état interne. Ce type d'observation est intéressant car il correspond à un aspect important des émotions humaines : le ressenti. Les positions de départ de ces travaux sont intéressantes au niveau scientifique car elles soulèvent la question du lien entre émotion et conscience. Dans le cadre plus restreint du présent projet, il n'est fait aucune mention de l'aspect expressif des émotions : l'approche ne correspond donc pas au point 7. La deuxième implémentation présentée répond aux points 3 et 5 de la même façon que l'approche de Breazeal : les émotions modifient le module d'attention. En revanche, les émotions n'influencent pas les capacités d'action du système, propriété qui correspond au point 2 de la définition de référence. Comme les buts influencent peu la séquence d'évaluation, le point 6 est en partie vérifié.

Dans leurs travaux, Gadanho et Hallam [18] [17] utilisent les émotions pour améliorer les performances d'un algorithme d'apprentissage par renforcement. Cet algorithme sert à apprendre la coordination des différents comportements élémentaires dont dispose un robot simulé. Leur modèle se compose de quatre émotions : *bonheur/joye*, *tristesse*, *peur* et *colère*. Les intensités des émotions sont déterminées par des combinaisons linéaires des sentiments du robot. Ces sentiments sont obtenus en tenant compte des perceptions brutes, internes et externes du robot, ainsi que par les taux de différentes hormones. Ces taux dépendent de l'activation des émotions. Il existe donc une boucle d'interaction entre les émotions, les sentiments et les hormones. Cette boucle permet d'instaurer une compétition entre les émotions pour le contrôle de l'état émotionnel. Ce modèle de génération correspond aux points 1 et 6 de la définition de référence. Le point 4 est également vérifié car les sentiments peuvent être considérés comme étant issus d'un traitement cognitif et que les sentiments influencent les émotions. De plus, les émotions influencent les perceptions via le système hormonal, ce qui satisfait le point 5. Par ailleurs, les émotions servent aussi à déterminer les moments où un changement de comportement est nécessaire. En effet, les changements de situations suffisamment importants pour nécessiter un changement dans le comportement du robot se reflètent

dans les changements d'état émotionnel. Dans cette optique, les fortes variations dans l'intensité de l'émotion dominante ou les transitions entre états émotionnels dominants servent à itérer le processus d'apprentissage. L'état émotionnel dominant sert également de fonction de renforcement pour l'algorithme d'apprentissage. Ainsi, l'intensité et la valence de l'émotion dominante servent respectivement de valeur et de signe à la variable de renforcement. Les émotions influencent donc les capacités cognitives du système et l'approche vérifie le point 3 de la définition de référence. Cependant, les émotions n'ont aucune influence sur les capacités motrices du système, et elles ne sont pas non plus utilisées pour la communication. Les points 2 et 7 ne sont donc pas satisfaits.

De nombreux tests ont été faits pour comparer les performances du système avec et sans les influences des émotions sur les autres modules. La comparaison avec leur travaux précédents [19] indique que les émotions fournissent une bonne fonction de renforcement uniquement si le module responsable du choix des actions travaille avec des échelles de temps relativement longue. En effet, un module qui doit choisir une action par cycle de temps est pénalisé par le fait que les émotions synthétisent la situation actuelle et le passé proche. Il en résulte que l'utilisation des émotions pour fournir une évaluation de la situation est plus pertinente si le système utilise des comportements plutôt que des actions élémentaires comme unité de commande motrice. La différence de performance la plus importante entre les systèmes ayant ou non des émotions se révèle être au niveau du déclenchement des étapes d'apprentissage. Ainsi, le caractère synthétique de l'appréciation de la situation fournie par les émotions permet de diminuer drastiquement le nombre d'étapes d'apprentissage en ne déclenchant ces étapes que lorsque la situation est significative, évitant ainsi de noyer les données pertinentes dans une masse d'information.

3.4 Émotions pour un groupe de robots

Il existe encore peu de travaux présentant des approches concernant la robotique collective basées sur les émotions. Les trois qui ont été recensées sont présentées suivant l'importance des émotions dans le système.

Comme dans beaucoup d'approches en robotique collective, l'objectif des travaux de Shibata et *coll.* [44] est de fournir à un groupe de robots la possibilité de se répartir une tâche. La principale hypothèse faite ici est que la tâche à accomplir peut être décomposée en sous-tâches indépendantes. Le problème pour les robots se réduit donc à choisir, parmi les sous-tâches à réaliser, celle qui est la plus avantageuse. Les robots apprennent à faire ce choix à l'aide d'un algorithme d'apprentissage

par renforcement (*Q-learning*). Cependant, contrairement aux travaux de Gadanho [18], la seule information prise en compte ici pour évaluer la valeur de renforcement des comportements est la tâche choisie par les autres. De plus, cette fonction est déterminée empiriquement et fixée à la conception à partir de la tâche à effectuer. Ainsi, si deux robots doivent se partager une tâche, ils vont apprendre à ne pas choisir une tâche qu'un autre robot effectue déjà et qu'ils ne peuvent réaliser en même temps. Inversement, ils vont apprendre à choisir la tâche pour laquelle il y a conflit potentiel si aucun robot ne l'a choisie. Cependant, cela est très dépendant de la fonction d'évaluation déterminée à la conception et donc de la tâche à effectuer. L'aspect émotionnel de ce travail réside dans l'introduction d'une valeur de frustration dont la fonction est de prendre en compte la situation dans le choix du comportement. Si un comportement choisi ne s'exécute pas, la frustration du robot augmente ; si la frustration atteint un certain seuil, le comportement avec la seconde meilleure évaluation remplace le précédent. Ainsi, le robot adapte spontanément son comportement si celui-ci ne correspond pas à la situation. Toutefois, la méthode pour déterminer si une tâche progresse n'est pas précisée alors que ce problème est loin d'être trivial. L'approche a été validée en simulation sur une tâche équivalente à du butinage (*foraging*) avec deux robots.

L'aspect émotionnel de cette approche étant réduit à une variable dépendante du temps, il n'est pas judicieux de la comparer aux autres approches. Elle ne sera donc pas évaluée en fonction de la définition de référence.

Les travaux de Parker [37] [38] [39] posent la même hypothèse quant à la division possible de la tâche à réaliser en différentes sous-tâches indépendantes. Cependant, la comparaison s'arrête là car l'approche de Parker et son modèle ALLIANCE sont beaucoup plus développés. En effet, le choix du comportement à effectuer n'est pas uniquement basé sur l'évaluation qui en est faite. Le comportement qui sera effectivement mis en œuvre dépend des perceptions du robot mais aussi de sa motivation et des interactions entre les différents modules comportementaux. ALLIANCE est basée sur le mécanisme de Subsumption présenté par Brooks [9]. L'apport principal de Parker est l'introduction de groupes de comportements ainsi que de modules motivationnels qui leurs sont associés. Comme le montre la figure 5, ce sont les modules motivationnels qui déterminent si un groupe comportemental va participer ou non au processus de Subsumption. Chaque groupe de comportements est associé statiquement à une tâche particulière. Par extension, chaque motivation concerne donc une tâche particulière et l'ampleur de la motivation est déterminée par l'avancée de cette tâche. Bien qu'il n'en soit pas fait explicitement mention, les notions d'impatience et de

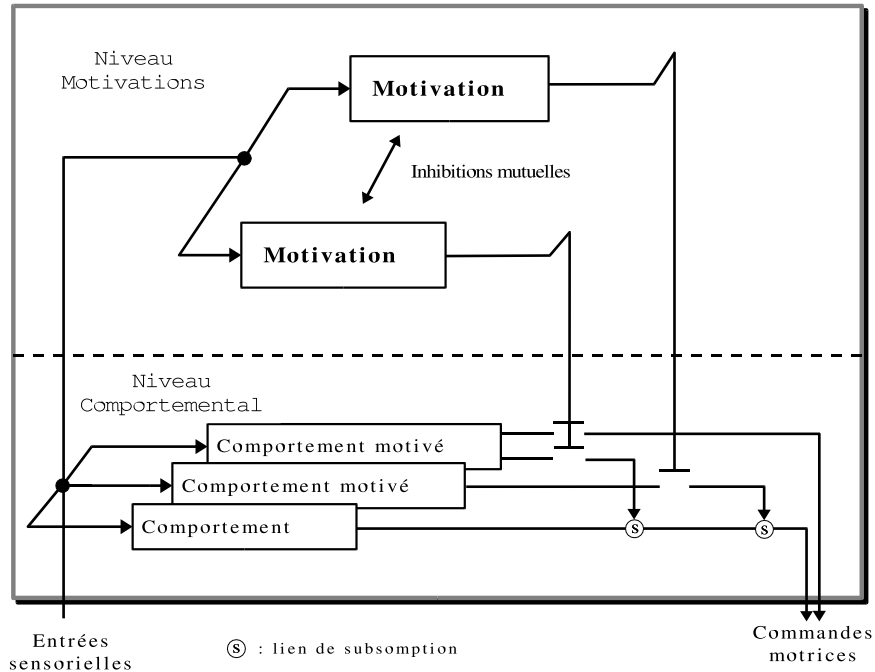


Figure 5 – Représentation schématique de l'architecture ALLIANCE mise au point par Parker.

résignation introduites par Parker peuvent être interprétées comme une appréciation affective du comportement des autres robots. En effet, lorsque un robot met trop de temps à réaliser une tâche, les autres robots finissent par s'atteler à celle-ci, exhibant ainsi un comportement impatient vis-à-vis du premier robot. Inversement, le robot qui voit un autre robot commencer la tâche qu'il est en train d'effectuer va finir par se résigner et abandonner cette tâche pour en essayer une autre dans laquelle il sera peut-être plus performant. Dans ces travaux, le problème de la reconnaissance des actions des autres est résolu par une communication dispersée, par tous les robots, de la tâche qu'ils sont en train d'effectuer. La manière dont les robots évaluent l'avancée d'une tâche n'est pas clairement expliquée. Il semblerait que cette évaluation ne dépende que du temps. L'aspect émotionnel de cette approche sert donc principalement à améliorer la robustesse du groupe en permettant une tolérance plus grande au dysfonctionnement d'un de ses membres. La coopération entre les membres qui apparaît dans [39] ne fait cependant pas intervenir ces notions : elle émerge du fait que la communication dispersée des actions de chacun influence les motivations des robots. Les valeurs d'impatience et de résignation sont déterminées par une mesure de la l'avancée de la tâche. L'approche est donc en contradiction avec les points 4 et 6 de la définition de référence et ne satisfait que partiellement le point 1. Le point 7 n'est pas non plus satisfait car ces valeurs ne sont

pas utilisées dans la communication inter-robots. De plus, les perceptions du système ne sont pas du tout influencées par la frustration ou l'impatience courante, ce qui ne permet pas à l'approche de répondre au point 5. En revanche, elle répond bien aux points 2 et 3 car ces valeurs influencent les motivations et par ce biais le choix des comportements.

L'équipe de Murphy est la seule à mentionner explicitement l'utilisation d'émotions dans des travaux avec un groupe de robots. L'architecture proposée [34] comporte idéalement trois niveaux : un niveau sensori-moteur, un niveau structurant et un niveau conceptuel. Ce modèle est basé sur la théorie développée par Leventhal et Scherer : *multilevel process theory of emotions* [26]. D'après l'article, seuls les deux premiers niveaux du modèle ont été implémentés pour l'instant. La figure 6 représente ces deux niveaux et les modules qui les constituent. Le niveau sensori-moteur, comme son nom l'indique, est composé des modules représentant les divers comportements dont est capable le robot et des modules sensoriels qui servent à détecter l'apparition de conditions ou d'événements particuliers. Le niveau structurant est responsable de regrouper les comportements dans des schémas correspondant à des aptitudes. Ce dernier niveau est implémenté par deux machines à états finis : un générateur d'état comportemental et un générateur d'état émotionnel. Les émotions sont donc présentes dans ce modèle sous la forme d'étiquettes d'états dans une machine à états finis. Les deux générateurs reçoivent de l'information d'un module de mesure de l'avancée de la tâche. L'état émotionnel du système est donc uniquement déterminé par l'avancée de la tâche en cours. Cela contredit les points 1, 4 et 6 de la définition de référence. Considérant la machine à états finis générant les états comportementaux comme une capacité cognitive, l'approche répond alors partiellement au point 3. De plus, la figure 6 montre que les émotions n'ont pas d'influence sur le module responsable des perceptions. Le point 5 n'est donc pas vérifié non plus. Le fait que les émotions influencent à la fois la machine à états finis comportementale et les paramètres des comportements fait correspondre l'approche au point 2. Les paramètres des communications entre robots sont influencés par l'état émotionnel courant, ce qui répond en partie au point 7.

La machine responsable de l'état émotionnel peut influencer l'autre machine à états d'une part et la couche sensori-motrice d'autre part en modifiant ses paramètres. L'avancée de la tâche est mesurée en tenant compte de trois sources d'information : les motifs particuliers reconnus par les processus sensoriels, certains comportements dont la fin ou une étape intermédiaire déclenche d'autres comportements, et la communication de commandes ou de données par les autres robots. L'application de validation choisie a été la compétition «Hors D'Œuvre Anyone?», dans lequel un

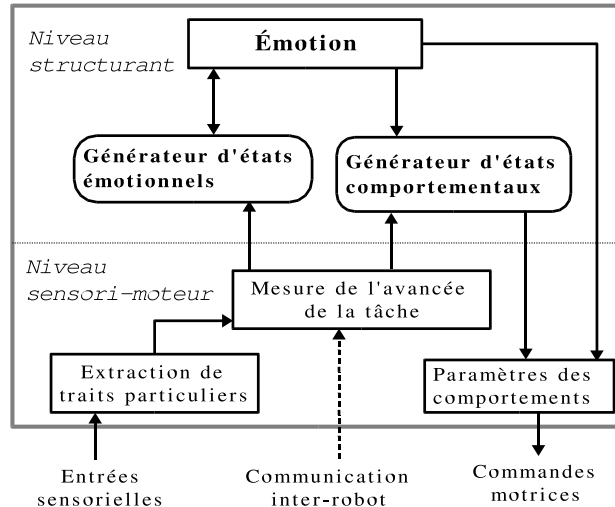


Figure 6 – Schéma de l'implémentation faite par l'équipe de Murphy.

robot doit distribuer des hors-d'œuvres dans une foule et un deuxième robot vient ravitailler le premier. Dans l'implémentation qui a été faite, la mesure de l'avancée de la tâche est très spécifique à cette tâche. Ainsi, le robot distributeur voit son état émotionnel changer en fonctions de durées estimées pour réaliser telle ou telle comportement, tandis que ce sont uniquement les commandes envoyées par le distributeur qui font varier l'état du ravitailleur. Comme dans les travaux de Shibata et coll. [44] une spécialisation à une tâche particulière est présente.

3.5 Sommaire

L'analyse du tableau 1 montre, de manière générale, que les travaux utilisant plusieurs robots pêchent par leurs modèles d'émotions d'une part et que, d'autre part, la fonction communicative des émotions est la moins utilisée dans les travaux étudiés. Par ailleurs, les résultats convaincants obtenus par les équipes de Breazeal, Cañamero et Velásquez poussent à envisager l'intégration des points que ces approches ont en commun. Dans ces travaux, les émotions sont considérées, comme le suggère Minsky, comme étant des agents dans une société d'agents interagissant. D'un point de vue plus technique, dans ces trois approches les émotions sont déclenchées ou influencées plus ou moins directement par des unités de calcul simples dont la fonction est de détecter des stimuli, internes ou externes, particuliers. Les performances obtenues par ces chercheurs encouragent l'utilisation du concept d'émotion dans le domaine de la robotique. L'approche qui fait l'objet du présent document fait donc partie d'un courant d'idée structuré et prometteur.

Les travaux de Gadanho et *coll.* [17] ont mis en évidence la fonction de signal des émotions qui permet, dans leurs expériences, de déclencher des étapes d'apprentissage aux moments opportuns. Cette fonction pourrait également déclencher des transitions entre différents modes de comportement comme le font les états motivationnels dans les travaux de Parker [39].

Pour résumer, il ressort de l'étude des travaux effectués dans le domaine des émotions artificielles appliquées à la robotique que la fonction de communication des émotions, dont l'importance a été mise en valeur dans la section 2.2, n'a été utilisée jusqu'à présent que pour améliorer l'observabilité d'un système par des humains ou pour augmenter sa crédibilité auprès d'un public. Les rares approches qui se réclament d'une approche basée sur les émotions et qui les utilisent pour des groupes de robots considèrent que leur fonctionnement se résume à une machine à état finis dont les transitions sont déclenchées par une mesure de l'avancée de la tâche en cours. Le fait de vouloir intégrer des approches plus évoluées des émotions et une communication de ces émotions entre robots en vue d'améliorer les capacités d'adaptation d'un groupe d'agents confère à la recherche présentée dans ce document un caractère novateur.

Approches	Points de la définition de référence						
	1	2	3	4	5	6	7
Breazeal	●	○	●	●	×	<i>s.o.</i>	●
Ogata et Sugano	●	○	<i>s.o.</i>	<i>s.o.</i>	×	●	×
Cañamero	●	●	<i>s.o.</i>	<i>s.o.</i>	●	○	×
Velásquez	●	●	●	●	●	×	○
Foliot et Michel	●	×	●	●	●	○	×
Gadanho et Hallam	●	×	●	●	●	●	×
Parker	○	●	●	×	×	×	×
Murphy	×	●	○	×	×	×	○

Légende :

- ● : L'approche satisfait complètement le point.
- ○ : L'approche ne correspond que partiellement au point.
- × : L'approche ne correspond pas du tout au point.
- *s.o.* : Le point ne s'applique pas à l'approche.

Tableau 1 – Tableau comparatif des approches robotiques utilisant la notion d'émotion artificielle.

tements ainsi que du module **Arbitration** qui permet de décider le ou les comportements qui prendront effectivement le contrôle du robot. Les modules comportementaux déterminent des commandes motrices en fonction des perceptions courantes. Le module **Arbitration** détermine comment les différents modules comportementaux vont influencer le comportement effectif de l'agent. L'émergence à ce niveau est assurée par le parallélisme entre les modules comportementaux.

Le niveau responsable des **Recommandations** se compose de quatre modules, trois qui génèrent des valeurs de désirabilité et de non-désirabilité au sujet des modules comportementaux, et un quatrième qui est chargé de faire en sorte que les comportements les plus *désirables* soient choisis pour être activés, et inversement. La principale fonction de ce dernier module, nommé **Sélection**, est de répercuter les recommandations faites par les trois autres modules de ce niveau sur le module **Arbitration**. Ces trois modules sont le module **Implicite**, le module **Égoïste** et le module **Rationnel**. Les recommandations du module **Implicite** concernent les choix comportementaux qui doivent être effectués par défaut ou issues des données sensorielles. Le module **Égoïste** recommande les modules comportementaux dont l'accomplissement satisfait les besoins ou favorise l'atteinte des buts propres à l'agent. Ces besoins ou buts sont influencés par le niveau responsables des motivations. Le module **Rationnel** utilise les connaissances dont l'agent dispose ou acquiert sur le monde pour recommander des comportements mais aussi pour éventuellement modifier les paramètres de ceux-ci. Les connaissances qu'il utilise peuvent être des données sur l'environnement, sur l'état de l'agent lui-même ou encore des méthodes de raisonnement utilisant ces informations.

Le niveau responsable des **Motivations** détermine, comme son nom l'indique, ce qui pousse l'agent à agir, ses buts et la façon dont il se comporte dans le monde. Les motivations subissent l'influence de l'environnement via les perceptions, les intentions du robot via l'observation des recommandations en cours ainsi que par les connaissances de l'agent sur le monde provenant du module **Rationnel**. Les motivations de l'agent sont utilisées pour recommander des comportements via le module **Égoïste**. Elles peuvent également être utilisées par le module **Rationnel** pour caractériser un état du monde ou mémoriser une association entre une situation et un état motivationnel pour une utilisation future. La figure 7 montre que le module **Arbitration** fournit de l'information concernant l'exploitation des comportements au module **Motivations**. Cette source d'information est très intéressante car elle permet au module **Motivations** de prendre en compte l'interaction du système avec son environnement de manière pertinente. En effet, savoir quel comportement est exploité, c'est-à-dire effectivement utilisé, permet de connaître à quelle décision a amené tout le

traitement de l'architecture en interaction avec le monde, ce qui est un reflet de l'émergence de fonctionnalités du système dans son environnement.

Les **émotions** sont considérées dans EMIB comme un arrière-plan global, c'est-à-dire que tous les éléments qui la composent sont susceptibles d'influencer et d'être influencés par le module responsable des émotions. Les spécifications des différents liens entre le module émotionnel et les autres modules font partie des objectifs du présent projet. La fonction précise de ce module reste également à spécifier. Une question se pose notamment : où se situe le traitement à l'origine d'une émotion dans l'architecture ?

Sur ce point, il est intéressant de considérer les deux visions traditionnellement opposées de la psychologie :

- Selon James [22] et Lange [24], une réaction physiologique intervient directement à partir du stimulus et déclenche le processus à l'origine de l'émotion. Dans cette optique, le module **Émotion** est à l'origine des modifications du système. D'un point de vue pratique, le module **Émotion** peut être soit centralisé et dissocié des autres modules soit réparti dans tous les modules et faire partie intégrante du système.
- À l'inverse, selon les cognitivistes, une évaluation cognitive du stimulus est à l'origine à la fois des modifications physiologiques et des changements dans les modes de traitement cognitif qui caractérisent un état émotionnel. Selon ce point de vue, les trois modules du niveau **Recommandations** seraient à l'origine des modifications du système.

Le principal choix à faire est donc celui qui concerne la présence de traitements émotifs ailleurs que dans les modules du niveau **Recommandations**. Afin de rester le plus général possible, il semble judicieux de répartir les traitements émotifs dans tous les modules du système. En effet, cela permet de combiner les deux approches et ainsi de ne pas trancher dans un débat qui est hors des objectifs de ce projet. De plus, cela permet de lier intimement le fonctionnement du système avec les traitements émotifs et donc de préserver les capacités d'émergence de l'architecture.

Cette problématique peut se rapprocher de la question de savoir si les émotions sont un élément dissocié du reste du système et influencent celui-ci, ou si elles font partie intégrante du fonctionnement du système, c'est-à-dire qu'elles en sont une caractéristique propre. Ce dernier point de vue étant celui défendu par les théories actuelles qui placent les émotions au centre du fonctionnement de l'esprit humain [14]. La section 5 présente les avantages et inconvénients de ces visions d'un point de vue pratique. En revanche, un des rôles clairement identifié du module émotionnel est la

détermination de l'état émotionnel courant, que celui-ci fasse partie intégrante du fonctionnement du système ou qu'il soit déduit d'une observation subjective.

5 Projet

Cette section présente les hypothèses sur lesquelles est basé le projet présenté dans ce document, ainsi que les objectifs qui découlent de la vérification de ces hypothèses. La méthodologie qui va être appliquée pour y parvenir est ensuite exposée.

5.1 Objectifs

La principale hypothèse de travail du projet se décompose en deux propositions :

- L'instauration d'une structure au sein d'un groupe de robots permet d'améliorer les performances de ce groupe.
- Le partage d'émotions entre les membres d'un groupe permet la structuration de ce groupe de manière dynamique et adaptative.

Ces deux propositions correspondent à deux grandes étapes dans la réalisation du projet.

L'objectif premier du projet est donc de vérifier les hypothèses contenues dans ces propositions.

Pour atteindre cet objectif il est nécessaire d'arriver à :

- mettre au point un modèle de génération d'émotions au sein d'un système robotique ;
- déterminer les influences des émotions sur le reste du système ;
- établir des règles de structuration d'un groupe à partir des émotions apparues dans les différents systèmes robotiques mis en jeu ;
- utiliser la structure ainsi obtenue pour améliorer les performances du groupe dans les différentes tâches choisies pour la validation.

Ces étapes constituent les sous-objectifs du projet.

Le fait de vouloir partager des émotions entre plusieurs entités impose certaines contraintes sur le modèle qui sera mis au point. En effet, pour que la communication d'émotions permette la structuration d'un groupe, il faut que l'information communiquée ait un sens pour les deux interlocuteurs. Il faut donc, d'une part, que ces émotions soient *consistantes* avec les types d'interactions, c'est-à-

dire qu'un même type d'interaction¹⁰ d'un des membres du groupe avec le monde résulte un même type d'émotion. Et, d'autre part, que ces émotions possèdent une suffisamment grande diversité afin de pouvoir refléter, au moins en partie, la richesse du monde.

La contrainte de consistance est très importante car elle est nécessaire pour permettre aux émotions d'être une abstraction de l'état interne du système et du type d'interaction de celui-ci avec le monde. La contrainte de consistance apporte un autre avantage au modèle qui la respecte : elle permet à des entités ne possédant pas les mêmes capacités de partager une vision du monde. Cette propriété permettra de travailler avec des groupes de robots hétérogènes, ce qui est presque inévitablement le cas étant donné les différences de réponse des capteurs et actionneurs utilisés en robotique à l'heure actuelle. Cependant, la vérification de la contrainte de consistance ne peut pas être assurée pour des entités trop différentes. Ainsi, un engin volant ne pourra jamais avoir la même réaction face à une situation où il ne touche plus le sol qu'un système uniquement muni de roues. Or, les différences de capacités, aussi bien motrices, perceptuelles que de traitement, entre un humain et un robot sont telles qu'il est prématuré de penser qu'une communication bidirectionnelle des émotions entre un système robotique et un humain soit pertinente [48]. Bien que l'expression, par un robot, d'un état interne s'apparentant à des émotions permette une meilleure observabilité de ce système par des humains [6], et que des systèmes informatique commencent à être capable de reconnaître des émotions sur des visages, rien n'indique que les robots et les humains doivent un jour partager la signification de leurs émotions respectives. C'est pourquoi le présent projet n'a pas pour but de faire interagir des humains et des robots. Un autre élément justifie ce choix : la mise au point d'un système de reconnaissance d'émotions nécessiterait à lui seul un projet entier en raison des limitations actuelles des robots en matière de perception et de traitement.

La conception du modèle devra donc prendre en compte les contraintes énoncées ci-dessus mais également se positionner par rapport aux choix fondamentaux inhérents au concept d'émotion. Ainsi, il va être nécessaire de déterminer la pertinence de l'intervention de grandeurs correspondant à des émotions dans le fonctionnement du système. En effet, le concepteur d'un modèle de génération d'émotion doit choisir la façon dont les émotions interviennent dans son modèle. La principale alternative se résume à la présence ou non de grandeurs correspondant aux différents types d'émotions jugés pertinents et en particulier à savoir si de telles variables participent au

¹⁰Ici interaction désigne l'influence que le système et l'environnement ont l'un sur l'autre pendant une période de temps raisonnable.

fonctionnement propre du modèle. La présence de telles grandeurs intervenant dans un modèle permet d'observer facilement l'évolution du système qui l'implémente, de justifier plus clairement le lien entre le modèle et le concept d'émotion ainsi que de déterminer aisément l'état émotionnel courant. Cependant, cela ne correspond pas aux données venues de la physiologie : aucune grandeur biologique ne traduit directement l'état émotionnel d'une personne. Choisir de correspondre à la physiologie humaine amène donc à concevoir un modèle où les émotions ne sont pas représentées directement par des grandeurs. Cependant, faire un tel choix pose un problème : comment déterminer l'état émotionnel qui sera communiqué ?

Là encore une alternative se présente. En se référant aux théories dans la lignée de celle de James-Lange [22][24], l'émotion est la perception des changements physiologiques qui interviennent dans le corps. L'état émotionnel est donc synthétisé par un processus cognitif à partir des perceptions internes. À l'opposé, les théories cognitives comme celle de Schachter [42] considèrent que les changements physiologiques sont non-spécifiques et la détermination de l'état émotionnel se fait par l'attribution cognitive d'une qualité émotionnelle à la situation courante à la suite d'un ressenti non spécifique. Cependant, Dantzer [14] présente des travaux plus récents de Levenson et *coll.* [25] ainsi que de Bloch et *coll.* [4] qui vont à l'encontre de cette vision radicale et suggèrent qu'au moins une partie de cette réponse est spécifique. Le concepteur du modèle devra donc choisir entre déduire un état émotionnel de l'observation des variables internes du système, ou de l'analyse du caractère émotionnel de la situation courante après réception d'un signal interne indiquant une situation inhabituelle. Ces deux méthodes ne sont cependant pas contradictoires et il est donc possible de les combiner pour tirer profit des deux.

Un autre problème pourrait bénéficier de deux approches à la fois : les changements dans les variables internes au système sont-ils des causes ou des conséquences de la modification du fonctionnement cognitif associée à une émotion ? En effet, établir une dynamique allant dans les deux sens ou impliquant une boucle de rétroaction comme dans les travaux de Gadanho et Hallam [18] permettrait de combiner les deux points de vue.

La question qui va se poser une fois un état émotionnel déterminé et communiqué est celle de savoir comment structurer le groupe à partir de cet état. Il va notamment falloir décider dans un premier temps si cette structure sera explicite et connue de tous les membres ou si elle sera émergente et uniquement issue de relations d'ordre entre les membres. Dans l'éventualité d'une structure explicite, il faudra décider quel type de structure sera mis en place, c'est-à-dire une

hiérarchie, stricte ou non, consistante ou non, ou un graphe éventuellement cyclique ou tout autre structure. Et là encore il faudra décider si cette structure sera issue d'une négociation entre tous les membres du groupe ou d'une interaction entre les robots deux à deux. Les théories de Plutchik [41] et en particulier les problèmes universels d'adaptation qu'il a défini, font le lien entre les émotions primaires et les questions que soulève la coexistence de plusieurs entités autonomes. Par exemple, il explique que le problème que constitue l'organisation hiérarchique d'une société est intimement lié aux émotions de colère et de peur.

5.2 Méthodologie

Avant d'exposer les différentes étapes du projet, il est important de préciser qu'un des soucis constant tout au long du processus est de conserver l'indépendance entre l'approche développée et une tâche en particulier car elle est nécessaire à la validation des hypothèses dans un cadre général. De plus cela rend l'approche réutilisable dans d'autres contextes et par d'autres personnes, ce qui est un des buts de tout travail scientifique. Dans une optique plus technique, un des soucis sera de conserver la plus grande modularité possible. En effet, cela peut permettre une validation progressive des différents éléments et rend chaque élément plus réutilisable.

La première étape du projet, qui devra être terminée quatre mois après l'examen général, consiste à concevoir un modèle de génération d'émotions. Ce modèle devra répondre à des contraintes et se positionner clairement par rapport à des alternatives inhérentes au concept d'émotion afin de résoudre les problèmes d'adaptation que rencontrent les robots chargés de travailler en groupe. Pour ce faire, il devra s'inspirer des théories des émotions vues à la section 2 ainsi que des approches vues dans la section 3. L'architecture de contrôle EMIB présentée à la section 4 servira de base à la conception du modèle. Il va donc falloir identifier les liens entre les différents modules de cette architecture et le module responsable des émotions qui est un arrière-plan global de EMIB. Un exemple de lien entre les modules pourrait être l'observation par le module émotionnel de la fréquence de changement de comportement au sein du module comportemental. En effet, cette fréquence reflète l'existence ou non de schémas de réaction adaptés à la situation présente, ce qui correspond à l'approche de Mandler [16] selon laquelle les émotions naissent de l'existence ou non de schémas de pensée correspondant à la situation courante.

La validation du modèle de génération d'émotions mis au point, et en particulier le fait qu'il vérifie les contraintes énoncées dans la section 5.1, constitue la deuxième étape du projet et devra être

terminée trois mois après la fin de la première étape. Une implémentation du modèle dans une tâche suffisamment complexe comme une partie de la compétition AAAI Challenge¹¹ ainsi que des expériences dans un simulateur feront l'objet de cette étape. La mise au point d'une interface permettant à un utilisateur de connaître l'état émotionnel résultant de l'interaction du modèle avec l'environnement devra également être faite. Cette étape fait partie d'une démarche itérative de conception, elle permet la validation du modèle avant de commencer les étapes suivantes.

La troisième étape va concerner la méthode de structuration du groupe. Elle aura pour but de déterminer quel type de structures seront mises en place ainsi que d'établir les règles de structuration du groupe. Il va notamment être nécessaire de choisir le type d'interactions entre les membres du groupe qui servira de prémisses à ces règles, c'est-à-dire si les règles établiront une structure à partir d'une négociation globale, locale, d'interactions deux à deux ou de tout autre type d'interaction. Ces choix seront influencés par des données venues de la biologie en générale et de l'éthologie comportementale en particulier. Cette étape permettra de vérifier la deuxième hypothèse de travail : le partage de leurs émotions par les membres d'un groupe permet la structuration de ce groupe. Deux mois sont consacrés à cette étape.

La mise à l'épreuve de la deuxième hypothèse selon laquelle une structure améliore les performances d'un groupe fera l'objet d'une quatrième étape dont la durée est de cinq mois. Cette validation se fera par la comparaison des résultats obtenus dans plusieurs tâches suffisamment différentes avec ceux obtenus dans ces mêmes tâches par des méthodes n'utilisant pas le concept d'émotion. Le choix de ne pas valider sur une seule tâche a été fait pour deux raisons : d'une part cela permet de comparer avec plusieurs autres approches n'utilisant pas les émotions et, d'autre part, cela permet de vérifier que tous les éléments mis en œuvre, que ce soit le modèle ou les règles de structuration, ne sont pas spécifiques à la tâche implémentée. Les tâches choisies sont le partage d'une station de recharge, la navigation en formation ainsi qu'éventuellement un problème d'assignation de tâches. Elles ont été choisies car elles ont été ou seront prochainement implémentées par des membres du laboratoire [32] [30], permettant ainsi d'obtenir des résultats quantitatifs dans des conditions suffisamment proches pour que ces résultats soient comparables.

Les six mois restant sont consacrés à la phase de la thèse.

¹¹<http://www.andrew.cmu.edu/~astroupe/AAAI03/>

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Argyle. *Social Interaction*. Methuen's Manuals of Modern Psychology, 1969.
- [2] R. C. Arkin. Moving up the food chain : Motivation and emotion in behavior-based robots. Dans J. Fellous et M. Arbib, éditeurs, *to appear in Who Needs Emotions : The Brain Meets the Robot*. Oxford University Press, 2003.
- [3] P. Bard. Emotion 1. The neurohumoral basis of emotional reactions. Dans C. Murchinson, éditeur, *Handbook of General Experimental Psychology*. Clark University Press, Worcester, MA, 1934.
- [4] S. Bloch, M. Lemeignan, et N. Aguilera-T. Specific respiratory patterns distinguish among human basic emotions. *International Journal of Psychophysiology*, 11 :141–154, 1991.
- [5] C. Breazeal. A motivational system for regulating human-robot interaction. Dans *Proceedings of American Association for Artificial Intelligence*, pages 54–61, 1998.
- [6] C. Breazeal. *Designing Sociable Robots*. The MIT Press, A Bradford Book Édition, 2002.
- [7] C. Breazeal et B. Scassellati. Infant-like social interactions between a robot and a human caretaker. *Adaptive Behavior, Special Issue on Simulation Models of Social Agents*, 1998.
- [8] C. Breazeal et B. Scassellati. A context-dependent attention system for a social robot. Dans *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Stockholm, Sweden, 1999.
- [9] R. A. Brooks. Intelligence without reason. Dans *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-91)*, 1991.
- [10] D. Cañamero. Modeling motivations and emotions as a basis for intelligent behavior. Dans W. Lewis Johnson et Barbara Hayes-Roth, éditeurs, *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents (Agents'97)*, pages 148–155, New York, 1997. ACM Press.
- [11] W. B. Cannon. The James-Lange theory of emotion : A critical examination and an alternative theory. *American Journal of Psychology*, 39 :106–124, 1927.
- [12] C.E. Izard. *The Face of Emotion*. Appeltion-Century-Crofts, New York, 1972.
- [13] A. R. Damasio. *Descartes' Error, Emotion, Reason, and the Human Brain*. A.Grosset/Putnam Books, 1994.
- [14] R. Dantzer. *Les Émotions*. Que sais-je ? n° 2380. Presse Universitaire de France, Paris, 2002.
- [15] G. Foliot et G. Michel. Learning object significance with an emotion based process. Dans *Workshop on Grounding Emotions in Adaptive Systems, Fifth International Conference of The Society for Adaptive Behavior (SAB'98)*, 1998.
- [16] N. H. Frijda. Les théories des émotions : un bilan. Dans *Les Émotions. B. Rimé et K. R. Scherer*, chapitre 1. Delachaux et Niestle, 1989.
- [17] S. C. Gadanho. Emotional and cognitive adaptation in real environments. Dans *Symposium ACE'2002 of the 16th European Meeting on Cybernetics and Systems Research*, Vienna, Austria, 2002.
- [18] S. C. Gadanho et John H. Robot learning driven by emotions. *Adaptive Behavior*, 2001.
- [19] S. C. Gadanho et J. Hallam. Emotion-driven learning for animat control. Dans *From Animals to Animats 5. Proceedings of the Fifth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB'98)*, pages 354–359. The MIT Press, 1998.

- [20] D. Goldberg et M. J. Matarić. Interference as a tool for designing and evaluating multi-robot controllers. Dans *Proceedings of American Association for Artificial Intelligence*, pages 637–642, 1997.
- [21] D. Goleman. *Emotional Intelligence*. Batam Books, 1995.
- [22] W. James. What is an emotion. *Mind*, 9 :188–205, 1884.
- [23] P. R. Kleinginna et A. M. Kleinginna. A categorized list of emotion definitions with suggestions for a consensual definition. *Motivation and Emotion*, 5 :345–379, 1981.
- [24] C.G. Lange. *The Emotions*. Williams & Wilkins, Baltimore, 1885. Traduction anglaise 1922.
- [25] R. W. Levenson, P. Ekman, et W. V. Friesen. Voluntary facial action generates emotion-specific autonomic nervous system activity. *Psychophysiology*, 27 :363–384, 1990.
- [26] H. Leventhal et K. R. Scherer. The relationship of emotion to cognition : A functional approach to a semantic controversy. *Cognition and Emotion*, 1(1) :3–28, 1987.
- [27] G. Mandler. *Mind and Body : Psychology of Emotion and Stress*. W. W. Norton, New York and London, 1984.
- [28] F. Michaud. Emotion and group robotics, Part I - Psychological foundations. Rapport interne. Department of Electrical Engineering and Computer Engineering. Université de Sherbrooke, August 1999.
- [29] F. Michaud. EMIB - Computational architecture based on emotion and motivation for intentional selection and configuration of behavior-producing modules. *Cognitive Science, Special Issue on Desires, Goals, Intentions and Values : Computational Architectures*, 3(4), 2002.
- [30] F. Michaud, D. Létourneau, M. Gilbert, et J-M. Valin. Dynamic robot formations using directional visual perception. Dans *Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2002.
- [31] F. Michaud, P. Pirjanian, J. Audet, et D. Létourneau. Artificial emotion and social robotics. Dans *Proceedings of Distributed Autonomous Robotic Systems*, pages 121–130, Knoxville Tennessee, 2000.
- [32] F. Michaud, E. Robichaud, et J. Audet. Using motives and artificial emotion for prolonged activity of a group of autonomous robots. Dans *Proceedings of Emotional and Intelligent II : The Tangled Knot of Social Cognition - AAAI Fall Symposium*, pages 85–90, Cape Cod Massachusetts, 2001.
- [33] M. Minsky. *The Society of Mind*. Simon and Schuster éditeurs, 1985.
- [34] R.R. Murphy, C.L. Lisetti, R. Tardif, L. Irish, et A.Gage. Emotion-based control of cooperating heterogeneous mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Autotomation*, 18(5) :744–757, 2002.
- [35] K. Oatley et P.N. Johnson-Laird. Towards a cognitive theory of emotions. *Cognition and Emotion*, 1(1) :29–50, 1987.
- [36] T. Ogata et S. Sugano. Emotional behavior adjustment system in robots. Dans *Proceedings of IEEE International Workshop on Human-Robot Communication*, 1997.
- [37] L. E. Parker. Adaptive action selection for cooperative agent teams. Dans J. A. Meyer, H. L. Roitblat, et S. W. Wilson, éditeurs, *Proceedings of Second International Conference on Simulation of Adaptive Behaviors (SAB'92)*. MIT Press, 1992.
- [38] L. E. Parker. Adaptive heterogeneous multi-robot teams. *Neurocomputing, Special Issue of NEURAP '98 : Neural Networks and Their Applications*, vol. 28 :75–92, 1999.

-
- [39] L. E. Parker. Distributed algorithms for multi-robot observation of multiple moving targets. *Autonomous Robots*, 3(12) :231–255, 2002.
- [40] R. Plutchik. *The emotions : Facts, theories, and a new model*. Random House, New York, 1962.
- [41] R. Plutchik. A general psychoevolutionary theory of emotion. Dans R. Plutchik et H. Kellermann, éditeurs, *Emotion ; Theory, Research and Experience. Vol. 1*, volume 1, chapitre 1, pages 3–33. Academic Press, 1980.
- [42] S. Schachter. The interaction of cognitive and physiological determinants of emotional state. *Advances in Experimental Social Psychology*, 1 :49–80, 1964.
- [43] K. R. Scherer. Studying the emotion-antecedent appraisal process : An expert system approach. *Cognition and Emotion*, 7(3) :325–355, 1993.
- [44] T. Shibata, K. Ohkawa, et K. Tanie. Spontaneous behavior of robots for cooperation. Dans *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2426–2431, Minneapolis, Minnesota, 1996.
- [45] K. T. Strongman. *The Psychology of Emotion, Third Edition*, chapitre 1. J. Wiley & Sons, 1987.
- [46] J.D. Velásquez. Modeling emotions and other motivation in synthetic agents. Dans *Proceedings of American Association for Artificial Intelligence*, 1997.
- [47] J.D. Velásquez. A computational framework for emotion-based control. Dans *Proceedings of Fifth International Conference on Simulation of Adaptive Behaviors (SAB'98)*, 1998.
- [48] T. Wehrle. Motivations behind modeling emotional agents : Whose emotion does your robot have. Dans D. Cañamero, C. Numaoka, et P. Petta, éditeurs, *Grounding Emotions in Adaptive Systems. Proceedings of the SAB'98 Workshop*, 1998.

