
Le paradigme MAUI pour des agents multimodaux d'interface homme-machine socialement intelligents

Christine Lætitia Lisetti

*Groupe Informatique Affective Social
Département Communications Multimedia
Institut Eurecom, Sophia Antipolis
lisetti@eurecom.fr*

RÉSUMÉ. Dans cet article, nous exposons notre programme de recherche ou paradigme en informatique bio-affective-sociale pour guider et participer au développement d'agents multimodaux socialement intelligents en termes de : (1) prise de décision et de (2) communication. Nous présentons certains de nos résultats traitant d'une partie des composants décrits dans ce paradigme que nous avons choisi d'explorer. En particulier, nous travaillons sur la reconnaissance des émotions à partir de signaux physiologiques, sur la construction de modèles des émotions de l'utilisateur basée entre autres sur la reconnaissance des émotions, l'élaboration d'architecture pour agents socialement intelligents capables d'utiliser le modèle des émotions de l'utilisateur pour interagir de façon plus intuitive avec cet utilisateur dans diverses applications et contextes.

ABSTRACT. In this article, we expose our research program in bio-affective-social computing aimed at guiding and participating to the development of multimodal socially intelligent agents in terms of: (1) decision-making and (2) communication. We present some of the results we obtained working on certain modules of the research paradigm which we chose to explore. In particular, we work on emotion recognition from sensed physiological signals, on the construction of emotion user-models from the emotion recognition module, on the design and implementation of an architecture for socially intelligent agents that enables them to use these user-models to interact with the user more intuitively in a variety of contexts.

MOTS-CLÉS : agents socialement intelligents, reconnaissance des émotions, modèle des émotions.

KEYWORDS: socially intelligent agents, emotion recognition, emotion modeling.

1. Introduction

Domaine interdisciplinaire qui émerge au début des années 1990, l'*informatique affective* connaît un développement rapide qui a pour but de donner aux ordinateurs les capacités de reconnaître, exprimer, synthétiser et modéliser les émotions. La construction d'interfaces multimodales affectives qui reconnaissent le rôle central des émotions dans la communication par leur reconnaissance et par leur expression deviendront importantes pour les technologies à venir. Dans le but de reconnaître les émotions, nous identifions celles qui sont générées et exprimées dans des contextes d'application comme la télémédecine, la sécurité des conducteurs (par exemple fatigue, stress) et le e-training.

En effet, l'attrait massif des ordinateurs personnels et les applications centrées sur Internet ont modifié notre perception de l'ordinateur numérique. Il ne peut plus être considéré comme une machine dont l'objet principal est de calculer mais plutôt comme une machine (avec ses périphériques et réseaux concomitants) qui offre de nouveaux modes d'interactions homme-machine (IHM) et de communications humain-humain gérés par l'ordinateur. D'ailleurs, les ordinateurs et les robots de service font leur entrée dans des aspects de notre vie qui impliquent généralement un contenu socio-émotionnel. En tant qu'outils de (télé)communication, les ordinateurs doivent avoir le sens de l'humain et s'adapter à l'homme et non l'inverse.

2. Le paradigme MAUI : interfaces multimodales affectives pour une nouvelle interaction homme-machine (IHM)

Notre approche est de prendre en compte la nature essentiellement multimodale des émotions, et de proposer un programme de recherche en *informatique bio-affective-sociale*, en utilisant des technologies multimédia (caméras, biocapteurs, microphones) pour recueillir les signaux multimodaux associés aux émotions déclenchées pendant des interactions hommes-machines (pendant des expériences en laboratoire, dans des environnements de réalité virtuelle) : les signaux physiologiques (comme la réponse galvanique de la peau, la tension, la température du corps) sont capturés par le biais de biocapteurs ou d'ordinateurs portés à même le corps, et les expressions faciales sont enregistrées par le biais d'appareils photos et vidéos. Ces signaux sont alors traités avec des algorithmes différents de la reconnaissance de schémas pour classer ces signaux selon l'émotion ressentie la plus probable.

L'approche inclut aussi la construction de modèles utilisateurs pour prédire des schémas de comportement et le développement d'une rétro-information multimodale adaptative en fonction du contexte de l'interaction homme-machine ou de la communication par le biais de l'ordinateur (par exemple, des avatars anthropomorphiques avec des capacités d'expression pour la télémédecine, des recommandations pour l'interface avec la voiture, des changements de rythme ou de style pédagogique dans les e-leçons).

Nos objectifs de recherche ont été de prendre en compte le *rôle des émotions* dans deux domaines complémentaires (qui vont se rejoindre aux cours de nos travaux de recherche, comme nous l'expliquerons au cours de cet article) :

1) dans la *communication* de façon à améliorer l'interaction homme-machine en l'enrichissant d'informations affectives par la reconnaissance de l'émotion, la construction de modèles utilisateurs et l'expression de l'émotion ; ¹

2) dans la *prise de décision* de façon à développer des agents artificiels intelligents (logiciels ou robotiques) en simulant et modélisant le rôle fonctionnel de l'émotion dans la cognition, prise de décision (et dans la communication de celle-ci). ²

Dans notre approche scientifique, une vision globale a guidé nos recherches, de telle façon que les deux domaines ci-dessus sont très liés. En effet, pour adhérer à notre vision d'ensemble, nous avons choisi de fonder nos travaux sur la théorie du processus multicomponentiel des émotions (Leventhal *et al.*, 1987) qui non seulement adresse les notions de génération des émotions, dont nous nous inspirons pour nos simulations de prise de décision (objectif 2 ci-dessus), mais qui prend aussi en compte les comportements associés aux émotions lorsque celles-ci sont générées, en particulier leur expression dans la communication que nous étudions pour la communication synthétique de l'émotion (objectif 1 ci-dessus).

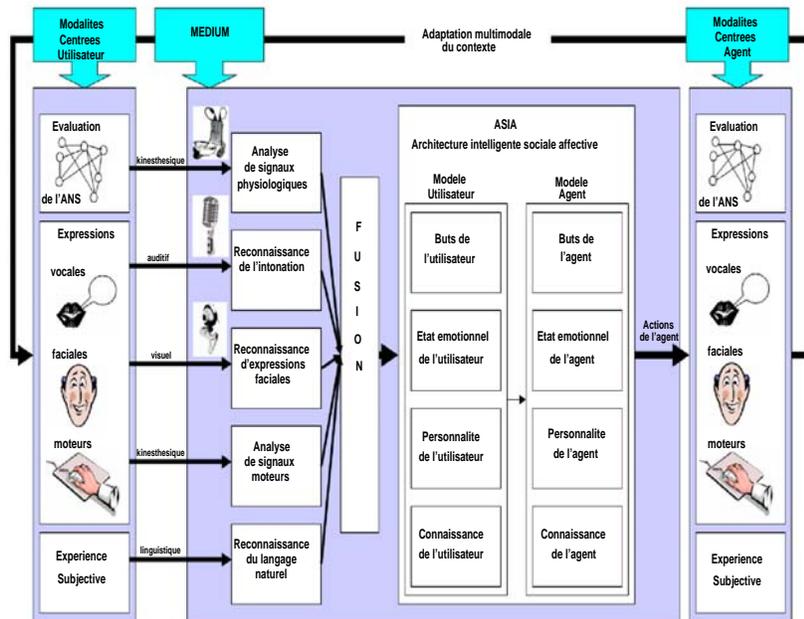


Figure 1. Le paradigme MAUI : Multimodal Affective User Interfaces

1. Ces recherches ont été subventionnées par des contrats avec *Intel Corporation*, la *US Army STRICOM*, et *ST Microelectronics*.

2. Ces recherches ont été subventionnées par un prix de recherche individuelle du *National Institute of Health*, un contrat avec la *NASA* et deux contrats avec le *US Office of Naval Research (ONR)* quand nous étions aux États-Unis.

Au cours de nos recherches interdisciplinaires entre l'informatique et les théories psychologiques sur les émotions, nous avons élaboré un modèle conceptuel pour le développement d'interfaces utilisateur multimodales affectives que nous avons intitulé le paradigme **MAUI** (*Multimodal Affective User Interfaces paradigm*), et représenté par la figure 1. Notre approche s'inscrit dans ce modèle, que nous avons exploré en spirale, en allant de la représentation et de la communication des émotions, à leur reconnaissance, à la construction de modèle de l'utilisateur, à la génération d'intelligence sociale et affective pour les agents d'interfaces adaptatifs, à leur prise de décision et leur comportement adapté au contexte donné, pouvant inclure l'expression multimodale d'émotion et de personnalité.

Le **paradigme MAUI** (voir figure 1), offre en effet un modèle pour la construction d'agents affectifs intelligents, chaque composant pouvant être développé sur des fondations psychologiques (en particulier sur la théorie de Scherer), comme nous l'expliquerons en détail à travers l'article et nous le décrivons succinctement ci-dessous (de gauche à droite) :

– **Modalité d'expressions de l'utilisateur – la représentation des émotions et les signaux associés aux émotions chez l'humain** : lorsque l'émotion est générée, comme beaucoup d'experts sur les émotions l'ont documenté (Izard, 1977; Frijda *et al.*, 1987; Scherer, 1988; Scherer, 2001; Leventhal *et al.*, 1987; Damasio, 1994; Roseman *et al.*, 1996), elle est associée à trois composants différents : l'activation du système nerveux autonome (ANS), l'expression multimodale (faciale, vocale, ou motrice), et la représentation subjective mentale de l'expérience émotionnelle ; ces composants peuvent cependant être activés de façon inégale (comme la suppression volontaire de l'expression de certaines émotions) ;

– **Médium – la perception automatique des signaux associés aux émotions** : les possibilités de capter ces signaux par le biais de multimédia : respectivement par rapport aux composants ci-dessus (sous la flèche Médium de haut en bas dans la figure 1), nous utilisons des biocapteurs pour les signaux du système nerveux autonome (ANS) (Lisetti *et al.*, 2004b; Nasoz *et al.*, 2003; Lisetti *et al.*, 2003), des microphones peuvent aussi être utilisés pour capter les signaux vocaux et leur prosodie ou intonation, des appareils photos ou des caméras pour les expressions faciales (Lisetti *et al.*, 2000; Bianchi-Berthouze *et al.*, 2002) (et les postures), des capteurs diverses pour l'expression motrice telles que des souris pouvant capter la pression, et des processus de traitement de texte pour l'expérience subjective de l'utilisateur qui peut être rendue accessible aux autres par le langage naturel ;

– **Traitement des signaux – la reconnaissance des signaux associés aux émotions** : différents algorithmes de traitement du signal sont en général en cours de développement pour chacun des signaux ci-dessus, et nous avons étudié en particulier les signaux du système autonome (ANS) et les expressions faciales ; une de nos études à venir consistera à étudier les possibilités de *fusion* des différents signaux multimodaux pour une interprétation plus précise de l'expression émotionnelle multimodale.

– **Modèle utilisateur – la construction de modèle de l'utilisateur (User Model)** : les signaux associés aux émotions peuvent varier d'une personne à l'autre. De façon à pouvoir les interpréter à leur juste valeur pour la personne en question, nous construisons des modèles de l'utilisateur prenant en compte leur personnalité, leurs expériences passées. Pour ceci, nous avons intégré dans nos interfaces un système de reconnaissance faciale pouvant identifier l'utilisateur et mémoriser certains paramètres le concernant (par exemple, sa personnalité, ses préférences, ses tendances

émotionnelles) (Bianchi-Berthouze *et al.*, 2002; Lisetti *et al.*, 2003). Pour permettre à des agents d'interface de s'adapter intelligemment à leur utilisateur, nous proposons aussi de modéliser la connaissance de l'utilisateur du domaine dans lequel l'interaction homme-machine se situe (par exemple quel est le niveau de l'élève pour l'apprentissage d'une langue naturelle ou d'un langage de programmation d'ordinateur), et ses buts dans ce contexte (par exemple, apprendre l'italien avec un logiciel ou bien se distraire avec un jeu). En télémédecine, par exemple, l'agent est-il un outil pour capter, mémoriser, et envoyer les signes vitaux aux médecins par communication électronique, ou constitue-t-il une interface multimodale avec le patient et anime-t-il l'interface par le biais d'agents conversationnels (ECAs, *Embodied Conversational Agents*, voir ci-dessous dans la section sur le composant expression). Les données à conserver dans le modèle utilisateur peuvent donc varier en fonction du contexte, les données émotionnelles pour la partie du modèle utilisateur de son profil émotionnel pouvant rester constantes à travers les différents contextes.

– **ASIA : agents socialement intelligents, une architecture** : les besoins et les formes d'intelligence sociale d'agents d'interface adaptatifs à l'état émotionnel de l'utilisateur diffèrent en effet en fonction du contexte ou de l'application choisie. En fonction du contexte, il est donc nécessaire d'équiper les agents avec des niveaux d'intelligence sociale plus ou moins sophistiquée.

Dans le domaine de la modélisation des émotions sur agents artificiels³, nous avons aussi conçu une architecture agissant sur trois niveaux différents de traitement de l'information basée sur la théorie des émotions avec un processus sur plusieurs niveaux (*Multi-Level Process Theory of Emotion* (Leventhal *et al.*, 1987; Scherer, 2001)) et dont nous avons implémenté plusieurs versions du premier niveau avec des techniques différentes (Scripts, Logique Floue, Hidden Markov Models) (Murphy *et al.*, 2002; Lisetti *et al.*, 2004a) :

1) le premier niveau *sensory-motor* correspond à un traitement très basique des stimuli perçus de l'environnement (le stimulus est positif, négatif, ou neutre), il donne lieu à des réponses simples (approcher le stimulus positif, éviter le stimulus négatif) et peut mémoriser la nature du dernier stimulus de façon à simuler la frustration quand une séquence de stimuli négatifs se succèdent ;

2) le deuxième niveau *schématique* prend en compte de façon beaucoup plus sophistiquée l'apprentissage et la mémoire des expériences émotionnelles associées à certaines situations, l'organisation et le rappel de la connaissance avec un système de représentation schématique (Rumelhart, 1980; Rumelhart *et al.*, 1986) (et dont nous avons implémenté deux prototypes (Murphy *et al.*, 2002; Lisetti *et al.*, 2006a) sur plateformes robotiques) ;

3) le troisième niveau *conceptuel* est le seul niveau où la réflexion consciente et volontaire intervient par rapport au stimulus (les deux niveaux précédents sont traités automatiquement de façon inconsciente), et où une réévaluation de la situation est possible pour permettre de changer d'état émotionnel (comme de passer de la colère à la compassion après réévaluation du stimulus). Ce niveau correspond à notre approche BDI-E (Gmytrasiewicz *et al.*, 2002; Murphy *et al.*, 2002). En effet, l'intelligence d'un agent rationnel d'interaction peut simplement être basée sur le modèle classique *BDI* – *Belief, Desires, Intentions* – pour planifier ses actions et prendre ses décisions. Par

3. À travers une étude subventionnée par deux agences fédérales aux États-Unis – le *Office of Naval Research* et la *NASA*.

contre, si nous voulons que l'agent soit capable de communiquer ses émotions (comme de la compassion pour l'étudiant perdu ou pour le client frustré par les robots vocaux proposant des menus sans fin) et de s'adapter à celles-ci, nous proposons le développement d'une intelligence plus sociale basée sur notre modèle BDI+E, soit le modèle BDI étendu à la prise en compte des émotions et de la personnalité, d'où notre modèle BDI-E pour agents *Rational*₁, que nous décrivons ci-dessous.

– **Modalité d'expression de l'agent – l'expression multimodale d'émotion par l'interface** : nous avons proposé que pour certaines applications et certains contextes, l'expression d'émotion par l'interface elle-même est désirable – voire nécessaire – pour assurer une interface non seulement naturelle mais aussi efficace (Carberry *et al.*, 2002) comme l'a suggéré la communauté des *Embodied Conversational Agents (ECAs)* (voir (Laurel, 1997; Cassell *et al.*, 2000; Pasquariello *et al.*, 2001; Pelachaud *et al.*, 2002; Paiva, 2000; de Rosis *et al.*, 2003)). Nous avons commencé cette étude avec des avatars graphiques faciaux animés, capables de parole synchronisée avec les mouvements du visage, sur une interface homme-robot (Lisetti *et al.*, 2004a). Une évaluation portant sur l'acceptance de ces avatars par les utilisateurs a donné des résultats très encourageants. Nous continuons nos études de génération d'expressions faciales sur ce même type d'avatars en nous basant encore une fois sur la théorie psychologique de Scherer (2001) de façon à explorer les principes de communication anthropomorphique avec ces avatars (Lisetti *et al.*, 2006b; Paleari *et al.*, 2006). Nous avons également récemment exporté ces mêmes principes à l'animation d'un robot-jouet (Grizard *et al.*, 2006) dont les résultats sont aussi convaincants ⁴.

Le paradigme MAUI présente donc les composants nécessaires pour développer des agents socialement intelligents, et bien que nous ne traitons pas chacun des composants du paradigme, nous prenons une approche en spirale dans laquelle, plutôt que de se focaliser sur un composant horizontal (voir dans la figure 1, la reconnaissance de la modalité d'expression de l'utilisateur, ou l'architecture, ou la modalité d'expression de l'agent), nous travaillons en spirale sur plusieurs composants verticaux (voir dans la figure 1, comme par exemple, la reconnaissance de signaux physiologiques et l'expression de cette reconnaissance sur l'expression de l'agent pour en tester et en évaluer l'impact (Lisetti *et al.*, 2006b).

Nous expliquons maintenant notre contribution dans chacun des composants de MAUI que nous avons choisis d'explorer.

3. La perception et la reconnaissance des émotions

En ce qui concerne la reconnaissance automatique des signaux du système autonome, nous utilisons des *wireless wearable computers*, ou biocapteurs portés à même la peau sans fils (voir figure 2) pour récolter les signaux de la réponse galvanique de la peau humaine, de la vitesse des battements du cœur, et de la température du corps. Nous avons documenté une étude générale interdisciplinaire sur la correspondance entre certains de ces signaux physiologiques et la génération d'états émotionnels (Lisetti *et al.*, 2004b). En effet, on sait déjà que certaines combinaisons de signaux sont associés à certaines émotions. D'autre part, la spécificité des émotions par rapport

4. Étude qui a été subventionnée par l'*Office of Naval Research*, par la *NASA*, et par la *US Army* sous des approches différentes, et que nous continuons à Sophia-Antipolis, France.

au fonctionnement de certains neurotransmetteurs et leurs signaux associés (température du corps, etc.) est suspectée être encore plus précise et sera très certainement découverte avec les nouveaux progrès en neurosciences (Levenson, 1992).



Figure 2. Biocapteur (i.e. température du corps, conductance cutanée)

Notre approche, décrite en détail dans (Lisetti *et al.*, 2004b), est donc de développer des scénarii d'expériences contrôlées pour susciter certaines émotions (séparées par des périodes de relaxation) à l'aide de films (pour des émotions telles que la tristesse, la colère, ou la surprise), à l'aide de problèmes mathématiques truqués à résoudre de façon à éliciter la frustration, ou encore à l'aide d'un environnement virtuel (en particulier à UCF, nous avons accès à un simulateur VR de conduite). Nous récoltons les signaux physiologiques dans des matrices que nous analysons ensuite pour classifier ces signaux par catégories correspondant aux émotions élicitées. Chaque matrice est normalisée de façon à, d'une part minimaliser les différences individuelles entre participants, et d'autre part, de façon à calculer l'amplitude des changements entre les émotions élicitées et la période de relaxation.

Nous utilisons plusieurs algorithmes d'apprentissage machine dont l'analyse de fonction discriminante (DFA), les K plus proches voisins (KNN), et la propagation arrière avec la modification de Marquardt-Levenberg (MBP). Nous comparons les performances relatives de chacun des algorithmes pour les ajuster en conséquence. Nos résultats démontrent que l'algorithme le plus performant pour nos classifications est le MBP qui nous permet de classifier les signaux autonomiques associés à la tristesse avec 92 % de succès, la colère avec 88 %, la surprise avec 70 %, la peur avec 87 %, et la frustration avec 82 % (voir figure 3).

Plus récemment, nous développons une approche de reconnaissance des émotions à partir des signaux physiologiques qui aspire à prendre davantage en compte des données connues en physiologie sur la spécificité des signaux, et d'inclure ces connaissances dans la construction du modèle utilisateur (Villon *et al.*, 2006).

Les applications de nos recherches sur la reconnaissance des émotions se trouvent dans plusieurs domaines. En particulier nous étudions comment ils peuvent bénéficier de la télémédecine, où les patients sont soignés à distance grâce à la télécommunication. Bien que les channels de télécommunication sont efficaces pour la plupart des maux, nous trouvons que la communication cruciale le long du channel affectif entre le patient et le médecin est appauvrie par de tels échanges. Les recherches dans ce domaine démontrent aussi que les émotions ressenties ne sont pas toujours celles

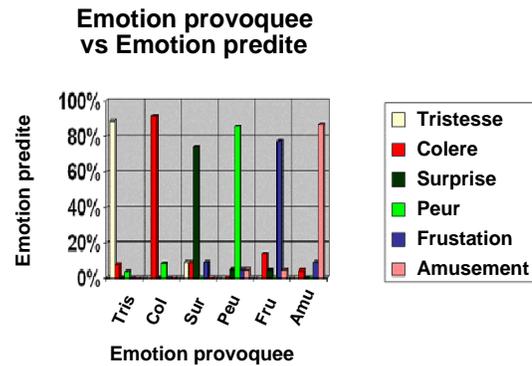


Figure 3. Résultats de la classification des émotions avec MBP

identifiées consciemment par le sujet et nos résultats basés sur les signaux physiologiques pourraient être utilisés pour assister le médecin à l'autre bout de la ligne de télécommunication pour savoir comment le patient se sent vraiment.

4. La taxonomie pour la représentation de la connaissance affective

Nous avons créé la taxonomie pour la représentation de la connaissance affective (*AKR Affective Knowledge Representation Taxonomy*) représentée dans la figure 4 pour permettre d'inclure dans la conception d'agents artificiels autonomes et rationnels des capacités d'intelligence «sociale» avec la possibilité de se représenter l'état émotionnel de leur(s) utilisateur(s) avec le plus de précision possible mais aussi, pour certains de ces agents, d'avoir eux-mêmes des représentations d'états similaires à ceux représentés pour l'utilisateur et associés à une dynamique d'intelligence émotionnelle leur permettant de développer leur propre intelligence sociale.

En effet, la Commission européenne a récemment placé la recherche sur les *Systèmes Cognitifs* parmi ses priorités pour 2003-2008 dans le work programme fp6, décrit sur : <http://www.cordis.lu/ist/workprogramme>.

Les objectifs du programme FP6 *Systèmes Cognitifs* sont de donner plus de «cognition» aux systèmes informatiques et de construire des systèmes instanciés ou incorporés physiquement qui peuvent percevoir, comprendre, mettre à profit les expériences vécues et se développer à partir d'interactions sociales ou individuelles avec leur environnement.⁵

L'autre thème voisin de nos recherches (que nous avons déjà évoqué dans l'introduction) qui a pour but de modéliser les émotions dans leur interaction avec la cognition, est donc directement lié à l'initiative de la Commission européenne sur les

5. Il est intéressant de noter que la nouvelle initiative de DARPA sur les Systèmes Cognitifs a des priorités similaires.

systèmes cognitifs. La modélisation des phénomènes affectifs (émotions, personnalité) pour les systèmes cognitifs et leurs agents intelligents nous paraissent tout à fait nécessaires pour permettre de telles interactions avec des systèmes cognitifs et nous avons proposé un modèle implémentable (et implémenté partiellement à ce stade de nos recherches) dont l'architecture et les structures représentées soient compatibles avec nos deux centres d'intérêts et nos deux objectifs : la *communication* de l'émotion d'une part, et la modélisation des phénomènes affectifs de l'autre (personnalité, humeurs, émotions, etc.).

Le résultat de nos études nous a permis d'adapter la théorie de composants dynamiques des émotions (*Component Process Theory of Emotions (CPT)*) (Scherer, 2001) pour représenter les états émotionnels – théorie compatible avec la *Multilevel Process Theory of Emotions* (Leventhal *et al.*, 1987) dont nous nous inspirons pour modéliser la dynamique de génération et la simulation d'états émotionnels.

En bref, comme représentés dans la figure 4, les phénomènes affectifs sont organisés de façon hiérarchique avec la *personnalité* qui (pour les personnes normales) est stable et dont les traits identifiables ne changent pas au cours de la vie (par exemple introverti, ouvert, généreux, ambitieux), pouvant influencer des tendances vers des *humeurs* de durée pouvant s'étaler sur plusieurs jours et peu focalisées sur une cause précise, contrairement aux *émotions* qui peuvent ne durer que des (fractions de) secondes et qui sont des états ayant accès à beaucoup plus d'informations, comme nous l'expliquons dans la section suivante.

Bien que nous n'ayons pas anticipé cet usage quand nous avons développé AKR, il a été intéressant pour nous de découvrir que notre taxonomie AKR a été choisie par la *Jabber Software Foundation* sponsorisée par *Hewlett Packard* dans leurs standards du *Instant Messaging and Presence Service* pour représenter les humeurs et les émotions, et encore plus récemment par le "SIMPLE" standard développé à la Columbia University pour assurer le sens de présence dans les messages instantanés, voir : <http://www.cs.columbia.edu/sip/draft/rpid/draft-ietf-simple-rpid-04.html> et <http://www.jabber.org/jeps/jep-0107.html>.

5. La représentation des composants avec structures probabilistiques

De façon à adresser les difficultés des approches computationnelles précédentes de la modélisation des émotions qui ne permettent pas la représentation de paramètres physiologiques ni subjectifs, dans notre structure de représentation, nous ne séparons pas l'émotion de la cognition, mais plutôt nous permettons de les fusionner dans une structure qui englobe simultanément les trois phénomènes qui accompagnent la génération de l'émotion (dont nous avons déjà parlé voir figure 1) :

- 1) l'activité du système autonome nerveux (ANS), qui signale l'intensité et la valence de l'émotion (qui peut être perçue par les biocapteurs) ;
- 2) l'expression, pour l'instant nous n'incluons que l'expression faciale que nous connaissons mieux, mais qui peut aussi inclure l'intonation de la voix, et autres modalités ;
- 3) l'expérience subjective, qui inclut des composants d'évaluation cognitive tels que les critères, les standards, les croyances, etc.

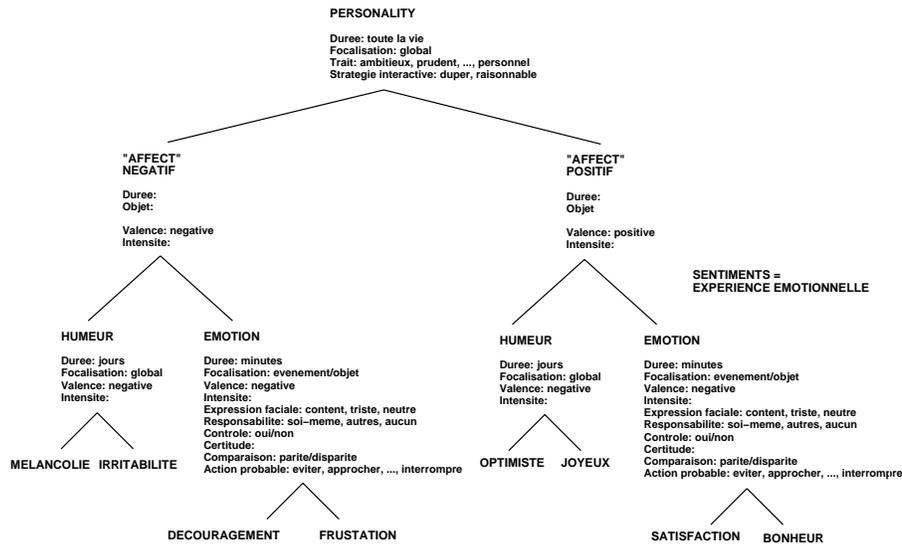


Figure 4. La taxonomie AKR affective knowledge representation

Nous avons donc proposé de représenter ces divers composants dans une même structure probabilistique (voir tableau 1). Pour chaque émotion possible, elle inclut donc des données physiologiques et les composants cognitifs *Stimulus Evaluation Checks (SECs)* (Scherer, 1992) : l'*intensité*, la *valence* (positive, négative), l'*objet* (ou *focalité*), l'*agence* ou la personne/chose responsable pour cette émotion (la personne contre qui on est en colère, soi-même ou la nature), la *nouveauté*, l'*intention* (si l'agence intervient de façon délibérée ou pas), la *modifiabilité* (le jugement que l'on porte sur si le cours des événements est capable de changer), la *certitude* (l'anticipation d'effets à venir et la certitude subjective que le sujet a sur les conséquences de la situation), la *légitimité* (si l'émotion ressentie est perçue comme légitime), les *normes sociales* (si l'événement stimulus est conforme aux normes culturelles), les *standards internes* (si le stimulus est en accord avec les standards que le sujet possède personnellement).

Nous utilisons les structures basées sur la représentation probabilistique proposée par (Koller, 1998) qui intègrent la représentation de structures classiques (Minsky, 1975) (limitées par leur manque de prise en compte du concept d'incertitude) et les réseaux bayésiens (limité dans leur fonctionnement dans des domaines complexes). Cette nouvelle approche préserve les avantages des deux approches précédentes et ajoute la possibilité (1) d'avoir des incertitudes sur les entités présentes dans le modèle, et (2) d'avoir des incertitudes sur les relations entre ces entités.

Chaque émotion est donc représentée par une de ces structures, avec un composant par *slot* ou emplacement, chacun pouvant avoir une *valeur indéfinie*. Un emplacement représente une relation binaire sur les structures : si cette valeur indéfinie de l'emplacement A dans la structure X est Y, alors la relation A(X,Y) existe. Les emplacements

FRUSTRATION Schema
Emotion Components :
Simple slot : Emotion Label = <i>frustration</i> Facet : type string
Multivalued Complex Slot : Facial Expression Facet : type {Happy, Sad, Suprised, Disgusted, Fearful, Angry, Neutral, Unspecified} Facet : distribution {0.0, 0.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.6, 0.1, 0.1}
Simple slot : Valence = <i>negative</i> Facet : type Positive, Negative, Unspec
Multivalued Slot : Intensity Facet : type {Very high, High, Medium, Low, Very low, none, unspecified} Facet distribution {0.15, 0.15, 0.15, 0.15, 0.15, 0.1, 0.15}
Simple slot : Duration = <i>minutes</i> Facet : type {Minutes, Days, Lifetime}
Multivalued complex slot Focality Facet : type {Event, Object, Global, Unspecified} Facet : distribution {0.1, 0.9, 0.0, 0.0}
Multivalued complex slot : Agency Facet : type {Self, Other, Nature, Unspecified} Facet : distribution {0.0, 1, 0.0, 0.0}
Multivalued complex slot : Novelty Facet : type {Match, Mismatch, Unspecified} Facet : distribution {0.45, 0.45, 0.1}
Multivalued complex slot : Controllability Facet : type {High, Medium, Low, None Unspecified} Facet : distribution {0.1, 0.1, 0.3, 0.4, 0.0}
Multivalued complex slot : Modifiability Facet : type {High, Medium, Low, None Unspecified} Facet : distribution {0.1, 0.1, 0.4, 0.3, 0.1}
Multivalued complex slot Certainty Facet : type {Certain, Uncertain, Non-Uncertain} Facet : distribution {0.4, 0.43, 0.3}
Simple slot External Norm = <i>Unspecified</i> Facet : type {Compatible, Incompatible, Unspecified}
Multivalued slot : Internal Standard Facet : type {Compatible, Incompatible, Unspecified} Facet : distribution {0.6, 0.25, 0.15}

Tableau 1. Structure probabilistique pour la FRUSTRATION

peuvent avoir une seule valeur ou plusieurs. Chaque emplacement est associé avec une *facette*. Une facette est une relation à trois entrées : si la facette F sur l'emplacement A dans la structure X est Y, alors la relation F(X, A, Y) existe. On peut imposer des restrictions sur les valeurs d'un emplacement.

L'avantage de cette représentation dont un exemple est donné dans le tableau 1 est qu'elle permet pour tous les composants émotionnels d'être représentés et associés avec des valeurs probabilistiques nécessaires étant donnée la nature incertaine de certains d'entre eux. Par exemple, un agent peut être plutôt certain de la responsabilité de l'agent qui a causé sa frustration, et dans ce cas l'emplacement *agency* ou l'«agence»

est associé avec la valeur *other* ou «autre» avec une probabilité de 1.0 (c'est à dire, certitude). L'agent peut cependant être plutôt incertain s'il a oui ou non le contrôle de la situation, et cela est possible d'être représenté par notre approche avec une distribution de probabilités pour la *certainty* ou «certitude» (voir l'emplacement certitude dans le tableau 1).

Grâce à cette représentation, un agent peut donc représenter l'état de son utilisateur en fonction de la performance de son système perceptif (reconnaissance d'expressions faciales, d'intensité de l'intonation, de prosodie, de signaux physiologiques du système autonome (voir ci-dessus)), faire des prédictions par rapport à ce qu'il se rappelle de son utilisateur (combien de fois a-t'il été frustré en utilisant ce logiciel ?, a-t-il tendance à être de plus en plus triste chez lui (voir dépressif ?), et s'adapter à cet état en ayant lui-même des capacités d'intelligence sociale et une représentation d'états «émotionnels» lui permettant de changer sa propre intonation, son expression faciale, etc.

En particulier, nos agents MAUI sont programmés avec la représentation de la connaissance affective AKR dans le but de leur donner la capacité de :

- représenter et stocker les mesures et l'interprétation de l'état émotionnel d'autres agents (naturels ou artificiels) (voir figure 1) ;
- d'être guidé par cette intelligence émotionnelle sociale de façon similaire aux humains (par exemple si l'agent perçoit que l'autre est frustré ou en colère dans une interaction, et que son but est d'aider l'autre, il adapte son comportement en conséquence et en fonction du contexte) ;
- d'exprimer des émotions grâce aux paramètres ajustés dynamiquement et utilisés pour représenter l'émotion.

6. Architecture cognitive-affective à 3 niveaux pour agents intelligents

Pour continuer dans le domaine de la simulation, nous avons développé une architecture hybride cognitive-affective qui combine l'architecture réactive (conditionnement-réponse) à l'architecture délibérative de planification basée sur le modèle BDI (soit la modélisation de la cognition en fonction de croyances, désirs et intentions) par l'intermédiaire d'un troisième niveau de traitement. En travaillant sur le développement de cette architecture cognitive-affective complète, la boucle entre agents et leur environnement peut être fermée en instanciant physiquement (des portions de) l'architecture sur des agents robotiques, et répondant ainsi aux objectifs du nouveau programme de recherche de la Commission européenne sur les *Systèmes Cognitifs* (mentionnés plus haut).

Notre recherche sur la modélisation du rôle des émotions sur la prise de décisions traite de la formalisation de la théorie à trois niveaux des émotions (Leventhal *et al.*, 1987; Scherer, 2001). Cette théorie postule que les émotions adultes sont des processus complexes du comportement qui émergent de l'activité d'un système émotionnel hiérarchique à trois niveaux et qui communiquent entre eux : le niveau sensori-moteur, le niveau schématique, et le niveau conceptuel :

- 1) Le *niveau sensori-moteur* est actif automatiquement sans processus de planification délibérée, et activé par une variété de stimuli externes et par des changements

internes. Les réactions émotionnelles à ce niveau sont de durée courte, comme des réflexes *hard-wired*, et peuvent modifier le comportement du système moteur avec des réactions très simples (tourner la tête, rougir, pâlir, sourire, etc.).

2) Le *niveau schématique* intègre les processus sensori-moteur avec des prototypes mémorisés de situations émotionnelles, ou *schemata*, et ces réactions sont actives aussi de façon automatique. Les réactions à ce niveau sont des émotions complexes, ressenties et exprimées non seulement au niveau sensori-moteur mais aussi subjectivement. Elles peuvent aussi être inconscientes.

3) Le *niveau conceptuel*, au contraire, est délibéré et implique le raisonnement par rapport au passé, ou l'anticipation par rapport au futur pour éviter la répétition d'états émotionnels négatifs ou bien pour la recherche d'états positifs. Les réactions à ce niveau (développé après l'enfance) nécessitent des concepts élaborés comme la notion de soi-même, les normes sociales et culturelles, les standards personnels internes et moraux du comportement (voir tableau 1).

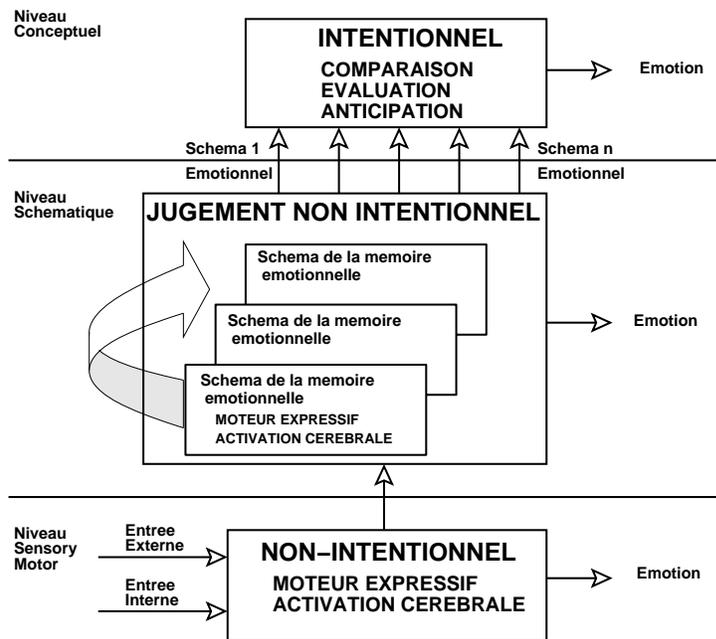


Figure 5. Architecture computationnelle sur 3 niveaux

Nous approchons la formalisation de cette théorie pour donner aux agents artificiels, robotiques ou logiciels, la capacité à prendre des décisions plus semblable à celle des humains. En effet, d'une part nous voulons que nos agents artificiels soient plus efficaces dans des environnements imprévisibles et des situations non déterminées à l'avance (à reconnaître des dangers, à s'adapter aux changements de l'environnement, ou aux changements de croyance par rapport à l'environnement, etc.).

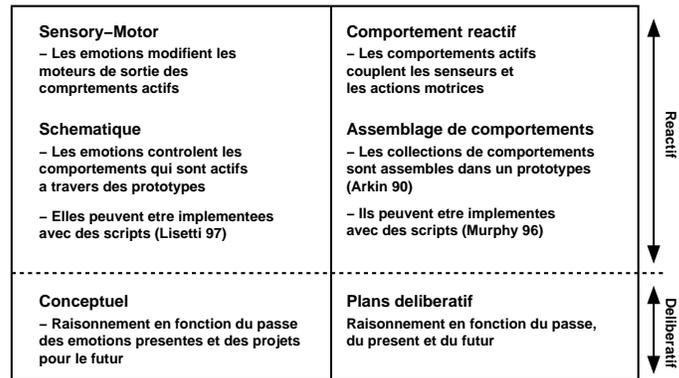


Figure 6. Relation entre la théorie processus multiniveaux des émotions et l'organisation des architectures hybrides délibératives/réactives.

D'autre part, nous voulons aussi que nos agents, s'ils coopèrent avec des humains, soient capables d'agir, de réagir et de s'exprimer (par rapport à leurs progrès et leurs états internes) de façon intuitive pour la compréhension des humains autour d'eux. Finalement, nous voulons pouvoir modéliser la prise de décisions humaine qui inclut l'influence des émotions, pour aider à comprendre et à anticiper dans des simulations comment d'autres humains vont réagir à certaines situations.

Étant donnée la difficulté du sujet, nous avons donc séparé la formalisation de la théorie des émotions en plusieurs sous-projets.

7. Implémentation de l'architecture à trois niveaux sur agents autonomes robotiques pour la robotique cognitive et sociale

Nous avons commencé par établir une correspondance entre les trois niveaux du système émotionnel (voir ci-dessus) avec les trois niveaux implémentés dans les architectures hybrides réactives/délibératives en robotique dont nos robots sont équipés (Murphy *et al.*, 2002). En effet, comme détaillé dans la figure 6, les architectures hybrides d'agents (robotiques dans notre cas) sont elles aussi agencées sur trois niveaux correspondants parfaitement à notre théorie des émotions : le premier niveau est le comportement réactif, le deuxième est l'assemblage des comportements dans des prototypes schématiques, et le troisième est le niveau délibératif de planification.

Pour notre conceptualisation et implémentation en robotique, nous nous concentrons sur les deux premiers niveaux : comportement réactif, et assemblage des comportements. Le niveau conceptuel pour l'instant est traité sur une autre plateforme de développement, théorique et logicielle seulement, comme nous l'avons expliqué (voir figure 8).

Notre application robotique est celle de réapprovisionnement et notre implémentation utilise des scripts logiciels qui guident les actions de nos robots hétérogènes (ayant des buts et des algorithmes différents). Chaque script consiste en une collec-

tion de comportements (par exemple servir, attendre, échanger, intercepter, retourner). Chaque script contient aussi des moniteurs qui évaluent le progrès du robot par rapport à son but, en percevant les changements dans l'environnement (via sonar, caméra, et laser) pour calculer certaines mesures de succès (le robot approche à bonne allure de celui qui a demandé des provisions supplémentaires, ou les provisions sont en train de diminuer dangereusement, etc.). L'évaluation du progrès entraîne des ajustements de comportement au niveau schématique (retourner à la station d'approvisionnement plutôt que de continuer à réapprovisionner), et aussi au niveau sensori-moteur (augmenter la vitesse pour se dépêcher, tourner la caméra plus rapidement pour localiser plus de visages de personnes en besoin de réapprovisionnement, etc.).

Nos résultats, obtenus sur deux robots hétérogènes en coopération l'un avec l'autre qui ont gagné le *AAAI Nils Nillson Award* à la *AAAI Mobile Robot Competition*, indiquent que l'architecture hybride avec "émotions" que nous avons développée – basée sur la formalisation du système émotionnel à trois niveaux (sensori-moteur, schématique, et conceptuel) – peut modifier les comportements actifs au niveau sensori-moteur, et peut aussi changer l'ensemble des comportements actifs au niveau schématique. Nos résultats montrent aussi que ce modèle des émotions permet d'éliminer des dépendances cycliques, sans planification centrale, avec communication minimale, et permet aux robots d'achever leurs buts respectifs plus rapidement (Murphy *et al.*, 2002).

8. L'expression de l'émotion dans les interfaces multimodales affectives

En ce qui concerne l'expression de l'émotion dans les interfaces multimodales affectives, nous étudions l'usage d'avatars graphiques anthropomorphiques animés. Nos expériences avec des sujets qui utilisent nos systèmes montrent que ces avatars capables d'expressions faciales facilitent considérablement la compréhension humaine et l'acceptation de nouvelles technologies de l'information, par rapport aux technologies sans interface anthropomorphique (Lisetti *et al.*, 2004a). Nous avons développé des interfaces multimédia pour des robots de service, avec capacité de parole et d'expressions faciales. Ces robots peuvent également communiquer des descriptions sémantiques correspondant à leurs états émotionnels internes.

Nous sommes intéressés ici par le développement de robots avec des capacités sociales (même simples) définies en termes de :

- a. motivation interne par rapport au but de l'agent et,
- b. comportement de communication externe.

Alors que notre approche (expliquée ci-dessus) de simulation des émotions par rapport à la prise de décision et du but de l'agent traite de (a), nous travaillons aussi en parallèle sur (b), la communication avec l'humain. Nous développons en effet des robots qui doivent pouvoir assister les humains sans expertise technique dans des relations de service : par exemple, assistant robotique pour les personnes âgées chez elles qui soit capable d'accomplir des tâches simples, assistant robotique dans les bureaux pour distribuer des documents ou autre matériel (Lisetti *et al.*, 2004a).

Nos résultats indiquent que la capacité de nos interfaces à communiquer avec les humains de façon multimodale est considérablement améliorée grâce au fait qu'elles exploitent la capacité humaine d'interprétation des expressions du visage, ainsi que



Figure 7. *Expressions faciales sur avatars*

(bien évidemment) la compréhension humaine de la communication parlée. Nos résultats montrent aussi que ces interfaces gagnent à être adaptées en fonction de l'expertise technique, de l'âge, du sexe, et de la culture des individus qui utilisent le système, ainsi qu'en fonction de l'application.

Alors que les informaticiens qui développent nos systèmes informatiques peuvent parler la langue technique pour communiquer avec les systèmes qu'ils développent, la plupart des personnes qui utilisent ces systèmes sont sans formation technique, et donc souvent intimidés ou frustrés par leur besoin forcé de s'adapter aux technologies disponibles. Notre approche est inverse : étudier et trouver des moyens de communiquer avec nos nouvelles technologies qui s'adaptent aux capacités humaines naturelles, plutôt que de forcer l'utilisateur à s'adapter à la machine.

9. *Rational*₁ Agents : des agents rationnels plus efficaces dans leur prise de décision avec l'influence des émotions

Nous revenons à nos objectifs : donner plus de *cognition* aux systèmes informatiques et construire des systèmes instanciés ou incorporés physiquement qui peuvent percevoir, comprendre, mettre à profit les expériences vécues et se développer à partir d'interactions sociales ou individuelles avec leur environnement.

Avec cette motivation, nous avons élaboré (après une invitation au *Santa Fe Institute* pour un workshop où nous avons été invités par des économistes désireux de trouver des alternatives à leur théories néo-classiques de l'économie), une théorie de la décision inspirée de la théorie de la décision rationaliste, en y incluant des mécanismes pour la modélisation explicite du rôle des émotions sur les décisions. Notre approche explique comment la définition cartésienne de la "rationalité", datant de plus de trois siècles avec Descartes, impose une séparation artificielle entre la pensée (ou le raisonnement) et le corps (et les sensations) (voir (Damasio, 1994) pour une bonne couverture de l'erreur de Descartes).

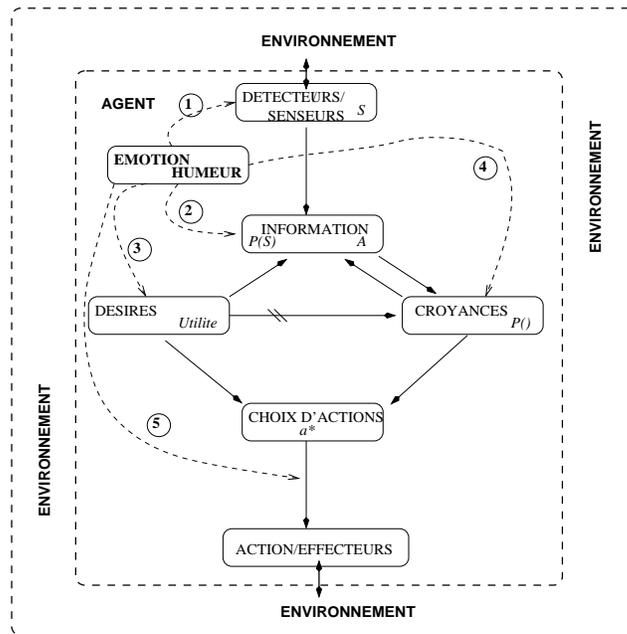


Figure 8. *Modèle BDI + E : Beliefs-Desires-Intentions + Emotions*

Pour assurer que notre contribution à la modélisation d'agents rationnels soit bien comprise, nous commençons par définir un nouveau terme *Rational*₁ pour dénommer des agents rationnels qui raisonnent de façon à accomplir leur but et qui n'inclut donc pas le rôle fondamental des émotions dans le processus, par contraste avec le terme classique rationnel ou *rational* – qui dénote le sens d'agent qui raisonne d'une façon conforme à un système normatif supposé adéquat et qui, comme Descartes l'avait imaginé, sépare l'influence des émotions du processus cognitif.

Nous proposons donc un formalisme mathématique inspiré de la théorie de la décision et le modèle connu sous le nom de *modèle BDI Belief-Intentions-Desires* (ou croyances, intentions et desirs), déjà utilisé pour modéliser des agents rationnels artificiels. Nous proposons le BDI-E modèle – donc BDI avec émotions (ou avec affect) – qui décrit spécifiquement le rôle des émotions sur la prise des décisions avec des *transformations émotionnelles*. Le schéma de notre modèle BDI-E de la figure 8 est basé sur le BDI, auquel nous avons rajouté le composant AFFECT avec ses 5 influences (les 5 flèches) et dont nous documenterons les transformations ci-dessous (Lisetti *et al.*, 2002).

Pour cela, nous rappelons donc les axiomes de la théorie néo-classique de la décision.

1) A chaque instant, un agent est dans un état *state of the world* $s \in S$, où S est l'ensemble de tous ces états possibles du monde (voir les Sensors/Percepts dans la figure 8).

2) Parce que le monde entier n'est pas toujours connu ni observable, chaque état du monde est associé avec des *distributions probabilistiques sur ces états du monde*, $\mathbf{P}(S)$, qui quantifient la probabilité de chacun de ces états (voir l'information dans la figure 8).

3) Une de ces distributions, disons $P_c(S) (\in \mathbf{P})$, spécifie lesquels de ces états sont possibles à l'instant et leur probabilité. Donc $P_c(S)$ décrit l'information que l'agent a sur l'état présent du monde (ou son environnement).

4) Chaque action est le résultat d'un *choix*.

5) Pour choisir, un agent doit :

- décider parmi un ensemble fini d'actions disponibles, l'*espace d'action* A , contenant toutes les actions possibles distinctes a_i que l'agent peut faire au temps t

- associer les *conséquences avec chaque action potentielle* $a_i \in A$:

- pour chaque action, identifier tout les *états résultants* possibles ;

- projeter la *probabilité de chaque état résultant possible* en utilisant une fonction,

$Proj : \mathbf{P}(S) \times A \rightarrow \mathbf{P}(S)$, qui résulte sur une autre distribution probabilistique $P_i(S) (\in \mathbf{P})$, also over S .

6) La *rationalité* de l'agent est assurée en présumant que l'agent doit choisir une action dépendante d'une valeur prédéterminée des conséquences associées à l'action calculée avec la *fonction utilité* $U : S \rightarrow R$, de telle manière qu'il choisit l'action a^* , qui *maximise* l'utilité ou la valeur attendue du résultat :

$$a^* = ArgMax_{a_i \in A} \sum_{s \in S} p_i^j U(s^j), \quad [1]$$

où la p_i^j est la probabilité que la distribution projetée $P_i(S)$ assigne à l'état $s^j \in S$.

Avec les éléments définis ci-dessus, nous pouvons formaliser une *situation de prise de décision rationnelle* de l'agent

Situation de prise de décision rationnelle

On peut donc représenter une situation de prise de décision rationnelle avec un quadruple $D = \langle P_c(S), A, Proj, U \rangle$,

où $S, P_c(S), A, Proj$ and U sont définis comme ci-dessus.

Dans une situation de prise de décision rationnelle, un agent peut donc calculer sa meilleure action rationnelle, a^* , comme spécifié dans l'équation 2. Ce calcul est cependant plutôt complexe et certainement très coûteux en traitement computationnel ! C'est pourquoi nous proposons des transformations émotionnelles qui peuvent, tout comme chez l'humain, aider à la prise de décision ou réduire le temps de la prise de décision.

10. Transformations émotionnelles pour modéliser un agent *Rational*₁

Nous présumons que les transformations émotionnelles elles-mêmes sont générées par des stimuli (ou inputs), IN , que l'agent perçoit, qui peuvent être externes (*i.e.* la vue d'un visage) ou internes (la réalisation qu'une émotion ressentie était bien justifiée).

Nous dénotons par \mathbf{D} l'ensemble de toutes les situations de décision D , définies plus haut ; nous postulons que chaque $D \in \mathbf{D}$ correspond à une transformation émotionnelle. De plus, laissons \mathbf{IN} être l'ensemble de tous les stimuli possibles.

Définition d'une transformation émotionnelle : une *transformation émotionnelle* est une fonction

$$EmotTrans : \mathbf{D} \times \mathbf{IN}^* \rightarrow \mathbf{D}.$$

Une *transformation émotionnelle* associe donc un état émotionnel avec une situation de prise de décision, qui change la situation où l'agent se trouve dans un certain état émotionnel pour un autre.

Étant donné un état émotionnel initial, D , et l'historique des stimuli IN (pouvant être vide), la valeur de la fonction *EmotTrans* est $EmotTrans(D, IN) = D'$, où D' est le nouvel état émotionnel de l'agent. D' peut différer de D de plusieurs façons.

Les émotions influencent l'attention : transformations de l'ensemble des états du monde S

La neuroscience nous a montré comment les émotions influencent les processus d'attention (Derryberry, 1992 ; Damasio 1994), notion illustrée dans la figure 8 avec la flèche 1 de l'Affect aux 'Sensors/Percepts' ou les perceptions.

Formellement, ces transformations $EmotTrans(D, IN) = D'$ sont telles que :

$$D = \langle P_c(\mathbf{S}), A, Proj, U \rangle, \text{ and } D' = \langle P_c(\mathbf{S}'), A, Proj, U \rangle.$$

Une telle transformation émotionnelle implémente la réduction perceptive des états possibles du monde où $S' \subset S$.

Par exemple, les effets de l'anxiété sur l'attention (et ceux de la dépression sur le souvenir) ont été étudiés en profondeur (Williams, 1996). L'anxiété peut faire augmenter les perceptions négatives de l'information, alors que la dépression peut favoriser le souvenir d'informations négatives. Donc l'anxiété et la dépression biaisent le traitement de l'information vers des aspects négatifs de soi-même et de l'environnement.

Quand un agent passe de l'état de tristesse à celui d'anxiété, l'agent réduit ainsi l'ensemble des états du monde à $S' \subset S$, où S' contient seulement les états associés principalement à une valence négative.

Inversement, l'enthousiasme est associé avec des évaluations optimistes de l'environnement et une plus grande créativité. Donc quand un agent passe d'un état émotionnel de neutre à la joie par exemple, il réduit l'ensemble des états du monde

$S' \subset S$, où S' contient surtout des possibilités positives.

Les émotions permettent de choisir : transformations de l'espace d'action A

Ces transformations de l'espace d'actions A , peuvent par exemple restreindre l'ensemble d'alternatives d'actions considérées pour en considérer seulement un sous-ensemble de celles-ci. Cela constitue la tendance à une certaine action lorsque dans un certain état émotionnel ou l'*action tendency* que nous utilisons dans notre implémentation sur agents robotiques (voir section ci-dessous).

Formellement, ces transformations $EmotTrans(D, IN) = D'$ sont telles que :

$$D = \langle P_c(S), \mathbf{A}, Proj, U \rangle, \text{ and } D' = \langle P_c(S), \mathbf{A}', Proj, U \rangle.$$

Une transformation émotionnelle qui implémente une tendance à l'action (*action tendency*) est une transformation pour laquelle $A' \subset A$.

Par exemple, un agent devenant en colère aura tendance à ne considérer que les actions agressives de son sous-ensemble d'alternatives. A l'extrême, réduire l'ensemble A à une seule action implémente la règle comportementale de conditionnement-réponse, similaire à des états affectifs très basiques (comme de rechercher le plaisir, ou d'éviter la douleur). Une telle transformation est obtenue quand A' est un ensemble singleton contenant une seule action.

Une autre façon d'interpréter un telle transformation est que lorsque l'agent est pris par le temps ou qu'il panique, il délibère sur le court terme. Formellement, nous avons : $\forall a'_i \in A' : t_{a'_i} \leq t_{a_i}$, et donc l'horizon du temps de plans alternatifs a été réduit.

Les émotions pour trancher : transformations des états des probabilités

L'idée derrière cette transformation est que simplifier les probabilités peut être utile et faire gagner du temps quand il manque.

Formellement, ces transformations $EmotTrans(D, IN) = D'$ sont telles que

$$D = \langle \mathbf{P}_c(\mathbf{S}), A, \mathbf{Proj}, U \rangle, D' = \langle \mathbf{P}'_c(\mathbf{S}), A, \mathbf{Proj}', U \rangle.$$

La simplification la plus radicale est une simplification qui rend l'état le plus probable le seul état ou résultat possible. Ceci revient à considérer seulement le plus probable des résultats de l'action et à négliger tous les autres, une stratégie de décision qui est souvent observée chez certaines personnes.

Rationalité : transformations de la fonction d'utilité U

L'intuition derrière cette transformation est que les émotions peuvent permettre le calcul de la valeur U , ainsi que la modifier.

Les humains évaluent la désirabilité d'un état s'ils ont des émotions positives ou négatives à leur sujet (voir la flèche 3 dans la figure 8).

Formellement ces transformations $EmotTrans(D, IN) = D'$ sont telles que :

$$D = \langle P_c(S), A, Proj, \mathbf{U} \rangle, \text{ and } D' = \langle P_c(S), A, Proj, \mathbf{U}' \rangle.$$

On peut aussi utiliser le formalisme pour modéliser des agents qui valorisent leur bien-être en utilisant des multi-attributs :

$$U(s) = \sum_{X_l \in Attributes} W_{X_l} U(X_l(s)), \quad [2]$$

où W_{X_l} est le poids ou la désirabilité de l'attribut X_l .

Bien que notre modèle BDI-E proposé soit encore incomplet, notre approche a été très bien reçue par la communauté des chercheurs en modélisation d'agents rationnels, ainsi que par des psycho-sociologues.

Les modèles de Markov pour la dynamique émotionnelle

Nous avons proposé d'utiliser les *Hidden Markov Model* (HMM) pour permettre la modélisation de la dynamique émotionnelle comme le montre la figure 9 qui nous intéresse pour modéliser les conducteurs. Nous donnons juste un exemple de l'utilisation des HMMs pour assigner non seulement des séries d'états, mais aussi pour pouvoir donner des distributions de probabilités pour les *outputs* possibles. Par exemple, la probabilité qu'un patient déprimé passe d'un état de dépression à un état de bonheur intense est très basse. Par contre, on peut s'attendre à ce qu'un conducteur de véhicule quelque peu frustré et stressé devienne de plus en plus en colère s'il conduit dans les rues de New-York à l'heure des encombrements.

Notre approche d'associer une dynamique probabilistique avec les représentations multimodales et probabilistiques décrites dans les sections précédentes – qui incluent des composants résultant de l'interprétation perceptive des émotions de l'utilisateur, mais aussi de ses croyances, désirs, et intentions – a pour but de rendre possible la modélisation de l'utilisateur et peut-être de permettre aussi la prédiction de certains états dans un contexte donné, en tenant compte de sa personnalité (ou tendance de comportement affectif et émotionnel). Comme nous allons l'expliquer, cette approche est aussi compatible pour la simulation d'états émotionnels pour l'agent lui-même, utile par exemple pour pouvoir concevoir des agents capables d'exprimer une émotion spécifique (la compassion par exemple) et correspondant à des états "émotionnels" internes lui permettant de raisonner et d'agir de façon plus proche du raisonnement humain, qui comme nous l'avons documenté, est *Rational*₁ et inclut la notion d'émotions.

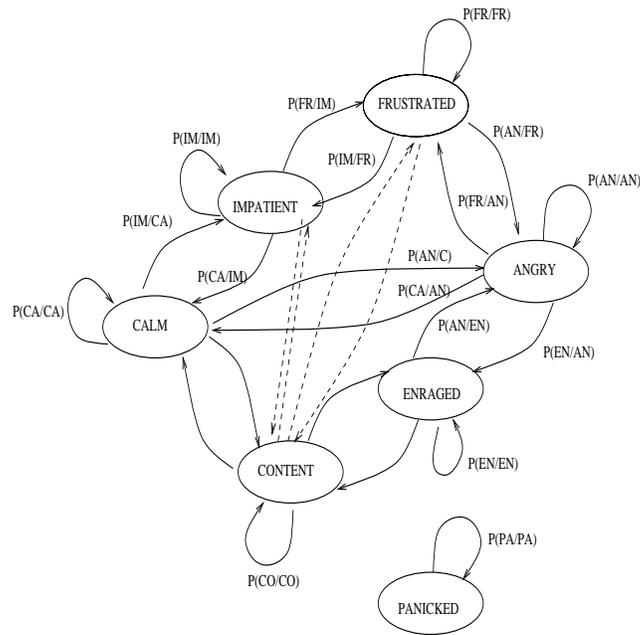


Figure 9. *Modèle de Markov d'un conducteur*

11. Conclusion

Comme nous l'avons expliqué dans les sections précédentes, nous nous intéressons principalement aux rôles des émotions dans l'intelligence humaine, tant au niveau de la communication et de l'expression que de la prise de décisions. Notre programme de recherche comprend donc les grandes lignes suivantes :

- un travail complémentaire avec des équipes de recherche spécialisées dans les biocapteurs et les multimédias pour continuer et améliorer la reconnaissance des émotions à partir de signaux physiologiques en temps réel ;
- le traitement de ces interprétations de l'état émotionnel de l'utilisateur dans des modèles de l'utilisateur formalisés de façon à avoir une compréhension plus complète des états affectifs de l'utilisateur, de sa personnalité, et de ses préférences (ou peut-être aussi de ses habitudes) ;
- la conception et le développement d'interfaces multimodales affectives adaptatives basées sur les sous-composants ci-dessus et adaptables au contexte donné ;
- l'étude en parallèle des usages de ces nouvelles technologies en même temps que leur conception et l'implémentation de prototypes de façon à être guidé par ces études pour leur développement.

Ce programme de recherche est vaste et passionnant. En effet, l'informatique bio-affective-sociale n'existait pas il y a quinze ans. En nous penchant sur la totalité du sujet comme dans une spirale (des signaux physiologiques émotionnels, aux états affectifs mentaux, à la modélisation formelle de ces états de façon multimodale, à la simulation de tels états pour des agents artificiels, à l'expression multimodale d'émotions par ces agents), nous avons contribué à faire avancer l'état de l'art dans cette nouvelle discipline de façon à donner des axes de recherche aux équipes intéressées par le développement des systèmes cognitifs du futur pour qu'ils soient le plus utiles et agréables à l'humain.

12. Bibliographie

- Bianchi-Berthouze N., Lisetti C., « Modeling Multimodal Expression of User's Affective Subjective Experience », *User Modeling and User-Adapted Interaction, International Journal (Special Issue on User Modeling and Adaptation in Affective Computing)*, 2002.
- Carberry S., Conati C., de Rosis F., Gmytrasiewicz P., Hudlicka E., Lisetti C., Ortony A., Prindiger H., Revelle W., « *(Invited) Panel Discussion from User-Modeling 2001. », vol. 16, Taylor & Francis, p. 643-670, 2002.
- Cassell J., Sullivan J., Prevost S., Churchill E., *Embodied Conversational Agents*, 2000.
- Damasio A., *Descartes' Error*, Avon Books, 1994.
- de Rosis F., Pelachaud C., Poggi I., Carofiglio V., De Carolis N., « From Greta's Mind to her Face : Modeling the Dynamics of Affective States in a Conversational Embodied Agent », *The International Journal of Human-Computer Studies - Special Issue on Applications of Affective Computing in Human-Computer Interaction*, 2003.
- Frijda N., Swagerman J., « Can Computers feel ? Theory and Design of an Emotional System », *Cognition and Emotion*, vol. 1, n° 3, p. 235-257, 1987.
- Gmytrasiewicz P., Lisetti C., « Emotions and Personality in Agent Design and Modeling », in M. Parsons, S. Woolridge, P. Gmytrasiewicz (eds), *Game Theoretic and Decision Theoretic Agents*, Dordrecht, Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 2002.
- Grizard A., Lisetti C. L., « Generation of facial emotional expressions based on psychological theory », *Proceedings of the 1st Workshop on Emotion and Computing at KI 2006, 29th Annual Conference on Artificial Intelligence*, Bremen, Germany, June, 2006.
- Izard C. E., *Human Emotions*, New York, Plenum Press, 1977.
- Laurel B., « Interface Agents : Metaphors with Characters », in J. Bradshaw (ed.), *Software Agents*, Menlo Park, CA : AAAI Press/The MIT Press, 1997.
- Levenson R., « Autonomic Nervous System Differences Among Emotions », *Psychological Science*, vol. 3, n° 1, p. 23-27, 1992.
- Leventhal H., Scherer K., « The Relationship of Emotion to Cognition : A Functional Approach to a Semantic Controversy », *Cognition and Emotion*, vol. 1, n° 1, p. 3-28, 1987.
- Lisetti C., Brown S., Alvarez K., Marpaung A., « A Social Informatics Approach to Human-Robot Interaction with an Office Service Robot », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Special Issue on Human Robot Interaction*, vol. 34, n° 2, p. 195-209, 2004a.
- Lisetti C., Gmytrasiewicz P., « Can a Rational Agent Afford to be Affectless ? A Formal Approach », vol. 16, Taylor & Francis, p. 577-609, 2002.
- Lisetti C. L., Marpaung A., « Affective Cognitive Modeling or Autonomous Agents Based on Scherer's Emotion Theory », *Proceedings of the 1st Workshop of Emotions and Computing of the 29th Annual German Conference on Artificial Intelligence (KI2006)*, Bremen, Germany., Amsterdam, The Netherlands, June, 2006a.

- Lisetti C. L., Nasoz F., Lerouge C., Ozyer O., K. Alvarez K., « Developing Multimodal Intelligent Affective Interfaces for Tele-Home Health Care », *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 59, n° (1-2), p. 245-255, 2003.
- Lisetti C., Nasoz F., « Using Noninvasive Wearable Computers to Recognize Human Emotions from Physiological Signals », *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 11, p. 1672-1687, 2004b.
- Lisetti C., Nasoz F., « MAUI avatars : Mirroring the user's sensed emotions via Expressive Multi-Ethnic Facial Avatars », *Journal of Visual Languages and Computing*, 2006b.
- Lisetti C., Schiano D., « Automatic Facial Expression Interpretation : Where Human-Computer Interaction, Artificial Intelligence, and Cognitive Science Intersect », *Pragmatics and Cognition (Special Issue on Facial Information Processing : A Multidisciplinary Perspective)*, vol. 8, n° 1, p. 185-235, 2000.
- Murphy R., Lisetti C., Tardif R., Irish L., Gage A., « Emotion-Based Control of Cooperating Heterogeneous Mobile Robots », *IEEE Transactions on Robotics and Automation for the Special Issue on Multi-Robot Systems*, 2002.
- Nasoz F., Lisetti C. L., « Emotion Recognition from Physiological Signals for Presence Technologies », *International Journal of Cognition, Technology, and Work - Special Issue on Presence*, 2003.
- Paiva A. (ed.), *Affect in Interactions*, Springer, 2000.
- Paleari M., Lisetti C. L., « Psychologically Grounded Avatar Expressions », *Proceedings of the 1st Workshop of Emotions and Computing of the 29th Annual German Conference on Artificial Intelligence (KI2006), Bremen, Germany.*, Amsterdam, The Netherlands, June, 2006.
- Pasquariello S., Pelachaud C., « Greta : A Simple Facial Animation Engine », *Proceedings of the 6th Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications, Session on Soft Computing for Intelligent 3D Agents*, 2001.
- Pelachaud C., Poggi I., « Subtleties of Facial Expressions in Embodied Agents », *Journal of Visualization and Computer Animation*, vol. 13, p. 301-312, 2002.
- Roseman A., Antoniou A., Jose P., « Appraisal Determinants of Emotions : Constructing a More Accurate and Comprehensive Theory », *Cognition and Emotion*, vol. 10(3), p. 241-277, 1996.
- Rumelhart D. E., « Schemata : The Building Blocks of Cognition », in R. J. Spiro, B. C. Bruce, W. F. Brewer (eds), *Theoretical Issues in Reading Comprehension*, Hillsdale, NJ : Erlbaum, 1980.
- Rumelhart D. E., Smolensky P., McClelland J. L., Hinton G. E., « Schemata and Sequential Thought Processes in PDP Models », in J. McClelland, D. Rumelhart (eds), *Parallel Distributed Processing : Explorations in the Microstructures of Cognition Volume 2 : Psychological and Biological Models*, Cambridge : MIT Press A Bradford Book, 1986.
- Scherer K., « Criteria for Emotion-Antecedent Appraisal : A Review », in H. et al. (ed.), *Cognitive Perspectives on Emotion and Motivation*, Kluwer Academic Publishers, p. 89-126, 1988.
- Scherer K., « Appraisal Considered as a Process of Multilevel Sequential Checking », *Appraisal Processes in Emotion Theory, Methods, and Research*, 2001.
- Villon O., Lisetti C., « Toward Building Adaptive User's Psycho-Physiological Maps of Emotions using Bio-Sensors », in D. Reichardt, P. Levi, J.-J. C. Meyer (eds), *In Proceedings of the 1st Workshop on Emotion and Computing at the 29th Annual German Conference on Artificial Intelligence (KI2006)*, p. 35-38, June, 2006.