

---

# Les émotions : une métaphore pour la résolution de problèmes dynamiques distribués

**Pierre De Loor — Cyril Septseault — Pierre Chevaillier**

*Laboratoire d'Ingénierie Informatique  
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest  
CS 73 862  
F-29238 Brest Cedex  
{deloor ; septseault ; chevaille}@enib.fr*

---

*RÉSUMÉ. Nous proposons un modèle de résolution multi-agents de problèmes utilisant une métaphore émotionnelle. Elle s'inspire du comportement de groupes d'humains possédant une susceptibilité personnelle et une susceptibilité collective. Les concepts importants reposent sur la notion "d'auto-perception" de soi en tant que générateur, la notion "d'ambiance collective", de "stress" et de "crise". Bien que rappelant d'autres méthodes telles que l'éco-résolution, l'article montre en quoi elle s'en distingue. De plus, l'approche est bien adaptée à la problématique du passage à l'échelle car elle élimine tout mécanisme d'acquiescement et de connaissance mutuelle globale des agents entre-eux. L'article présente les algorithmes d'évolution des agents émotionnels ainsi que la vue statique de leur implémentation. L'approche a été appliquée au problème de résolution des emplois du temps et comparé à certains algorithmes distribués de résolution de contraintes. Elle offre l'avantage d'être robuste, dynamique et adaptative par essence aboutissant à modélisation simple.*

*ABSTRACT. This paper presents a method and its implementation for solving distributed and dynamic constraints satisfaction problem. In order to improve adaptability and performance, our algorithm is based on agents with autonomous behavior guided by metaphoric assumptions. Our approach can be distinguished by the following points: The metaphor turns on sociological and emotional criteria without negotiation and memorisation. It tries to imitate collective and affective human's behavior when groups make complex decision. The agent's model includes the notions of affective power, intruder and public mood perception. We have applied this method successfully to the timetabling problem.*

*MOTS-CLÉS : résolution distribuée de problèmes, métaphore, émotion, intelligence artificielle distribuée, système multi-agents*

*KEYWORDS: distributed solving problem, metaphor, emotion, distributed artificial intelligence, multi-agent system*

---

## 1. Contexte

Cette approche s'inscrit dans le cadre de la résolution distribuée et adaptative de problèmes dynamiques. Une solution adaptative est en perpétuelle remise en cause car elle *accepte* toute modification des contraintes sans ré-initialiser la recherche, mais en adaptant la solution en cours de résolution. Parmi les approches abordant ce type de problème, on peut distinguer les algorithmes issus de la résolution de contraintes centralisée des méthodes "orientées agents", distribuées par essence :

- Les algorithmes distribués de résolution de contraintes (DCSP) [DUR 94], [FRI 01], [YOK 01] sont généralement caractérisés par une communication entre des variables proposant des valeurs. Ces valeurs peuvent être refusées par d'autres variables en fonction des contraintes qui les relient (retour-arrière asynchrone); généralement une mémorisation exhaustive des échecs est effectuée au niveau des variables. Parmi eux, l' "*Asynchronous Weak-Commitment*" est réputé pour être un des plus efficace [HIR 00]. Il existe différents enrichissements concernant l'analyse préalable des contraintes, leur regroupement ou la résolution de systèmes sur-contraints [MOD 01], [MIL 01]. Néanmoins, cette classe de technique de résolution présente plusieurs inconvénients : elle nécessite une modélisation mathématique du problème global qui est ensuite distribué. Ceci est d'autant plus difficile que les interdépendances entre les variables et leur nombre croissent. De plus, ceci rend la dynamique et l'adaptivité complexes à mettre en œuvre. Enfin, ces algorithmes procèdent souvent à une recherche exhaustive très coûteuse en temps et en mémoire ou utilisent des heuristiques basées sur des critères mathématiques qui ne peuvent être sémantiquement liés au problème.

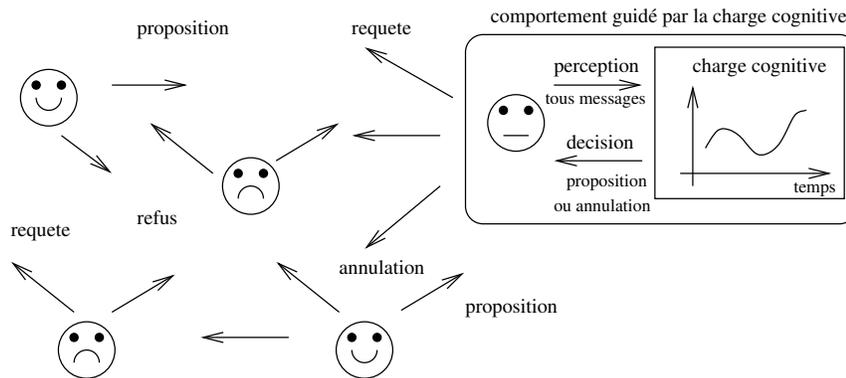
- Les méthodes "orientées agents" abordent le problème sous un angle différent [FER 95]. Ce dernier n'est pas modélisé globalement mais défini localement par le biais d'entités significatives et identifiables. La phase de modélisation du problème consiste donc à définir les agents et leur comportement. Souvent, des métaphores, évitant une recherche exhaustive, associées à des mécanismes de négociation [SMI 81]) sont utilisés pour mettre en œuvre une solution. Dans [WAL 01] et [MAT 02], l'attribution de tâches se fait par le biais d'une négociation, de type *vente aux enchères*, entre agents. Un autre principe éprouvé est celui de l'éco-résolution [DRO 91] basée sur la notion d'agresseur, de fuite et de dépendance. Enfin, dans [GLE 99] une méthodologie basée sur l'identification de situation non coopératives est définie pour spécifier le système multi-agents. Généralement, la recherche d'une solution optimale n'est pas l'objectif de ces approches (surtout si le problème est dynamique). Le problème peut d'ailleurs être non solvable. L'objectif est de trouver une solution *acceptable*, voire d'évaluer des facteurs permettant d'orienter la modification du problème pour que celui-ci devienne solvable.

L'approche que nous proposons est basée sur l'utilisation d'agents, associée à une métaphore comportementale émotionnelle. Celle-ci se justifie par le constat qu'un groupe d'humains est capable de résoudre certains problèmes de façon pragmatique, mais non triviale ni systématique. Ainsi, comme préconisé par [DOR 99], nous utilisons des critères psychologiques (simplifiés) pour contribuer à l'amélioration de la

résolution de problèmes en intelligence artificielle. Il ne s'agit pas ici de tenter de reconstituer le plus complètement possible les différents facteurs identifiés par des psychologues comme c'est le but en "calcul affectif" [PIC 95]. L'approche introduit juste la notion de charge cognitive (ou stress), de susceptibilité personnelle et collective ainsi que celle de colère. Elle intègre un mécanisme de remise en question partielle comparable au retour-arrière local des algorithmes DCSP mais leur déclenchement est issu de la dynamique liée à la métaphore. On y retrouve également des mécanismes similaires à ceux proposés en planification dynamique dans [MAE 89], où une solution émerge par le biais de poids activant des modules comportementaux en fonction des buts à atteindre, de l'état courant de l'environnement et du poids des autres modules. La notion de gêneur de l'éco-résolution y est également présente, mais ici, ce sont les agents eux-mêmes qui se perçoivent comme étant généurs, de plus ils ne sont pas localisés et ne se connaissent pas (ce qui rend l'approche très dynamique). Nous cherchons à obtenir une solution dont la mise en œuvre limite les mécanismes d'acquiescement ou de synchronisation. Nous privilégions la diffusion générale et l'absence d'acquiescement. En effet, la complexité des algorithmes de négociation est souvent liée à la nécessité d'acquiescement qui provoque une synchronisation de la résolution, une mémorisation, une connaissance mutuelle de l'état des différents agents et parfois une centralisation de l'information par un agent particulier. Sans acquiescement, les algorithmes locaux des agents sont simplifiés, la parallélisation est améliorée (symétrie de comportement) et le système est plus robuste et adaptatif. En contrepartie, il faut mettre en place un mécanisme de régulation des émissions des requêtes. Ici, ce mécanisme est propre à chaque agent et calculé en fonction de critères émotionnels individuels.

## 2. Principe de résolution

Le comportement d'un *agent émotionnel* s'appuie sur la notion de *charge cognitive* (ou stress). La *charge cognitive* dépend de la perception des agents et de leurs actions. Ici, la perception correspond à la réception de messages et les actions sont la recherche d'une solution à un but requis par les autres agents. Par conséquent, les agents possèdent des buts (ou *problèmes*) personnels et des *compétences* relatives à ces buts. Ils peuvent envoyer et recevoir des requêtes relatives à ces buts. Lorsqu'un agent perçoit une requête concernant un but dont il a la compétence, cette requête devient pour lui un *but requis*. S'il peut l'atteindre, il diffusera une proposition (broadcast). Les contraintes correspondent à des conflits possibles entre les *buts personnels* et les *buts requis*. Il est tout à fait possible qu'aucune réponse ne soit faite à une requête. En fait ceci permet d'éviter un mécanisme d'acquiescement qui peut être complexe et rigide car nominatif et impliquant l'utilisation de synchronisations temporelles. C'est la dynamique de la *charge cognitive* qui permet à un agent "insatisfait" de rediffuser une requête régulièrement, ou plutôt lorsque cela semble nécessaire. Si la *charge cognitive* d'un agent dépasse le *seuil de tolérance*, celui-ci provoque une *crise*. Elle correspond à une remise en cause des engagements pris par l'agent. Pour ce faire, l'agent diffuse des messages d'annulation de tous ses engagements.



**Figure 1.** Agents émotionnels : charge cognitive, diffusion et perception des messages

La crise, induite par la métaphore, correspond à un retour-arrière qui sera associé à l'agent le plus *gêneur* et seulement à lui. Pour favoriser la recherche de solutions dans le cas où plusieurs agents seraient gêneurs, voire où la situation relative de chacun d'eux provoquerait un (ou des) inter-blocage(s), deux facteurs importants sont intégrés dans le mécanisme de crise :

- la *perception de la charge cognitive globale (i.e : collective)* : Les messages émis par les agents sont diffusés et perçus par l'ensemble des autres agents. La perception d'un message de requête ou de refus augmente la charge cognitive, cette charge est d'autant plus accrue que l'agent est concerné par le message et qu'il ne peut y répondre.

- la *relaxation de la charge cognitive locale (i.e : individuelle)* : lors d'une crise, la charge cognitive de l'agent concerné est annulée. Ceci laisse la possibilité, en cas de blocage fort, que d'autres agents passent leur propre seuil de tolérance et entrent en crise à leur tour. Cette relaxation introduit une *hiérarchie dynamique des gêneurs* orientant le retour-arrière de la recherche.

Une solution est une affectation de valeurs aux différentes variables du problème. Définissons la notion de proximité d'une solution comme une fonction décroissante du nombre des affectations réussies (respectant les différentes contraintes). Le mécanisme utilisé introduit une forte corrélation entre proximité et charge cognitive globale du système multi-agent : Lorsqu'une solution existe et qu'elle est trouvée, les charges cognitives des différents agents atteignent leur minimum. Lorsqu'il n'existe pas de solution, un résultat partiel est tout de même obtenu et correspond à la recherche d'une diminution de la charge cognitive globale. Lorsqu'un agent ou de nouveaux buts sont introduits, les *charges cognitives* évoluent en conséquence et la résolution s'y adapte dynamiquement, y compris quand une solution a déjà été trouvée. Ainsi l'algorithme propose des propriétés rappelant celles des approches "*anytime*" mais en plus, il est toujours potentiellement actif et en perpétuelle adaptation.

### *Dynamique de la charge cognitive*

La charge cognitive dépend de la perception et des actions de l'agent. Perception et actions sont décomposées selon deux types d'information (figure 1) :

1) les informations positives qui diminuent la charge cognitive d'un agent :

- le *succès personnel* : l'agent a réussi à résoudre un (ou des) but(s), personnel ou requis.

- la *décharge de responsabilité* : l'agent fait une requête car il ne peut résoudre un but personnel. Dans ce cas, il se repose sur la communauté. Précisons que contrairement à certains protocoles de type *contract net protocol*, l'agent n'opère cette décharge que pour ses buts personnels et non sur des buts requis.

- le *succès coopératif* : un agent lui a fait une proposition qui permet de résoudre un de ses buts personnels.

- la *crise* : l'agent annule toutes les solutions qu'il avait auparavant proposées. La crise est un événement particulier qui va provoquer la remise à zéro de la charge cognitive de l'agent et une remise en question de la solution en cours de recherche. Son comportement n'est pas pour autant "arrêté". Ainsi, s'il reçoit à nouveau des messages, sa charge cognitive va progresser, mais le fait que cette dernière reparte de zéro implique qu'il faudra un "certain temps" avant qu'une nouvelle crise puisse avoir lieu.

2) les informations négatives qui augmentent la charge cognitive d'un agent :

- les *requêtes* : toute requête est un signe que "quelque chose n'est pas résolu au sein du système multi-agents" et va augmenter la charge cognitive. Si l'agent peut répondre à cette requête, le *succès personnel* consécutif (voir les informations positives) diminue la charge cognitive. S'il n'est pas compétent pour répondre à cette requête, il ne fait rien. S'il est compétent mais qu'il ne peut résoudre le problème lié à la requête, il en résulte un *échec personnel*.

- les *échecs personnels* : l'agent est incapable de résoudre un problème, qu'il lui soit propre ou posé par un autre agent.

- les *refus* : l'agent perçoit les refus diffusés par les autres agents. Il distingue les refus le concernant directement (annulant une proposition qu'il a faite) et qui accroissent davantage sa charge cognitive que les refus ne le concernant pas. Cependant le fait qu'elle croisse dans les deux cas reflète la perception de la "mauvaise ambiance" générale au sein du système (ou de la communauté d'agents). Cette proposition part de la constatation que la communication indirecte peut être un mécanisme fondamental lors de la résolution de problèmes [DUG 00].

La figure 2 représente un exemple d'évolution type de la charge cognitive d'un agent émotionnel durant la résolution d'un problème. On peut voir au temps 300 qu'une crise est déclenchée. Deux autres pics dépassant le seuil de crise apparaissent sans qu'il n'y ait de crise. Ceci est simplement dû à l'asynchronisme existant entre le calcul de la charge cognitive (consécutif à la perception de message) et le calcul du

comportement de l'agent (ici, la charge cognitive est redescendue avant que l'agent ne s'en aperçoive).

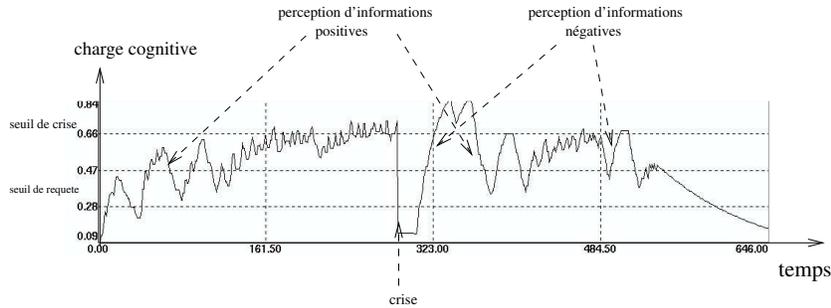


Figure 2. Exemple d'évolution de la charge cognitive d'un agent

### 3. L'algorithme distribué

L'algorithme de résolution est distribué au sein de chaque agent sous la forme d'une boucle perception-décision-action telle que celle représentée en figure 3. Un traitement particulier est dédié à chaque type de message reçu. La charge cognitive est modifiée en fonction de ces traitements et du comportement par défaut de l'agent. La description de l'algorithme distribué correspondant nécessite une formalisation du modèle que nous proposons ci dessous.

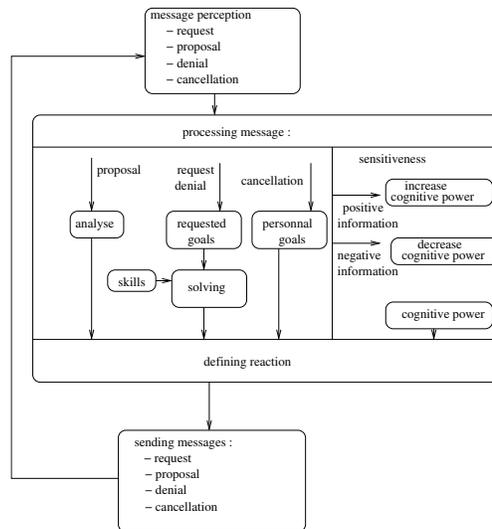


Figure 3. Boucle comportementale d'un agent émotionnel

### 3.1. Modèle d'un agent émotionnel

- Un agent émotionnel  $A$  est formalisé par un 9-uplet :  
 $\langle \psi^A, \alpha_s^A, \alpha_c^A, \rho^A, \gamma^A, S_s^A, R_g^A, P_g^A \rangle, M^A$ 
  - $\psi^A \in [0,1]$  est un réel caractérisant la *charge cognitive*.
  - $\alpha_s^A \in ]0,1[$  est un réel représentant la *taux de sensibilité personnelle*.
  - $\alpha_c^A \in ]0,1[$  est un réel représentant la *taux de sensibilité collective*.
  - $\rho^A \in ]0,1[$  représente le *seuil de requête*.
  - $\gamma^A \in ]0,1[$  représente le *seuil de crise* ( $\gamma^A > \rho^A$ ).
  - $S_s^A$  est l'*ensemble de compétences*. (informations symboliques).
  - $R_g^A$  est l'*ensemble des buts requis*.
  - $P_g^A$  est l'*ensemble des buts personnels*.
  - $M^A$  est la boîte des messages reçus.
- Un but  $g$  est un 4-uplet  $\langle P^g, S^g, A^g, V^g \rangle$  :
  - $P^g$  est un prédicat du premier ordre exprimant le but. Cette expression symbolique dépend du problème.
  - $S^g$  est la compétence requise pour atteindre ou *améliorer* le but (résoudre  $P^g$ ).
  - $A^g$  est la solution totale ou partielle permettant d'atteindre le but. Cette solution sera initialement vide et sera progressivement enrichie par les différents intervenants capables de contribuer à la résolution du but.
  - $V^g$  est un booléen correspondant à la valeur de  $P^g$ .
- Un message  $M$  est un 3-uplet  $\langle T^M, E^M, G^M \rangle$  :
  - $T^M \in \{ 'request', 'proposal', 'cancellation', 'refusal' \}$  est le type de message.
  - $E^M$  est l'agent émetteur du message.
  - $G^M$  est un but (le sujet du message) .

### 3.2. Boucle Comportementale

Le comportement par défaut d'un agent émotionnel  $A$  est exécuté tant qu'aucun message n'est reçu :

$$\begin{aligned}
 & \forall \text{ goal } g \in P_g^A \\
 & \text{if } (V^g == \text{false}) \\
 & \quad \psi^A \leftarrow \psi^A + \alpha_s^A * (1 - \psi^A) \qquad [1] \\
 & \text{if } (\psi^A > \rho^A) \text{ (requête)} \\
 & \quad \forall \text{ goal } g \in P_g^A
 \end{aligned}$$

$$\text{if } (V^g == \text{false}) \quad [2]$$

$$(\forall A_j, A_j \neq A : M^{A_j} \leftarrow M^{A_j} \cup \langle 'request', A, g \rangle) \quad [2]$$

$$\psi^A \leftarrow \psi^A - (\alpha_s^A * \psi^A) \quad [3]$$

$$\text{if } (\psi^A > \gamma^A) \text{ (crisis)}$$

$$\forall \text{goal } g \in R_g^A$$

$$(\forall A_j, A_j \neq A : M^{A_j} \leftarrow M^{A_j} \cup \langle 'cancellation', A, g \rangle) \quad [4]$$

$$R_g^A \leftarrow \phi$$

$$\psi^A \leftarrow 0 \quad [5]$$

$$\psi^A \leftarrow \psi^A - f(\alpha_s^A, \psi^A) \text{ (relaxation par défaut)} \quad [6]$$

Chaque but personnel non atteint accroît la *charge cognitive* d'un agent proportionnellement à sa *sensibilité personnelle*  $\alpha_s^A$  (eq 1). Si elle dépasse le *seuil de requête*, des requêtes relatives aux buts personnels non atteints sont envoyées (eq 2) et la *charge cognitive* diminue (eq 3). Quand la *charge cognitive* dépasse le *seuil de crise*, l'agent annule tous ses engagements envers les autres. Pour cela, il diffuse un message d'annulation relatif aux buts inclus dans l'ensemble de ses *buts requis* (eq 4) et annule sa charge cognitive (eq 5). Suivant la métaphore, l'agent a "piqué sa crise" et évacué son stress. Il lui faudra du temps avant d'entrer à nouveau en crise. Enfin, la charge cognitive est diminuée d'une faible valeur (eq 6) définie par la fonction d'apaisement  $f$  reflétant la tendance naturelle à l'apaisement, sa valeur est donc fonction de  $\alpha_s^A$  et  $\psi^A$ , de façon à être sans commune mesure avec ces valeurs (par exemple  $f = 0.1 * \alpha_s^A * \psi^A$ ). Ainsi lorsqu'il n'y a pas de problème particulier, la *charge cognitive* de tous les agents décroît, ceci permet de détecter l'apparition d'une solution.

### 3.3. Traitements des messages

– traitement d'un message  $\langle 'request', A', g \rangle$  : Si l'agent  $A$  en a la compétence, il tente de résoudre le but grâce à une méthode abstraite *solving* dépendante du problème. Le succès de cette méthode retourne une solution symbolique telle que définie dans le modèle des buts (voir 3.1 et l'exemple de l'emploi du temps en 4.1).

$$\text{if } (A \neq A') \wedge (S^g \notin S_s^A)$$

$$\psi^A \leftarrow \psi^A + \alpha_c^A * (1 - \psi^A) \text{ (le climat social se dégrade)}$$

else

$$\text{solving}(P^g)$$

if  $P^g$  is soluble with a solution  $s$

$$A^g \leftarrow s$$

$$V^g \leftarrow \text{true}$$

$$R_g^A \leftarrow R_g^A \cup g$$

$(\forall A_j, A_j \neq A : M^{A_j} \leftarrow M^{A_j} \cup \langle 'proposal', A, g \rangle)$  (diffusion d'une proposition)

$\psi^A \leftarrow \psi^A - (\alpha_s^A * \psi^A)$  (l'agent est satisfait de sa proposition)

else  $\psi^A \leftarrow \psi^A + \alpha_s^A * (1 - \psi^A)$  (susceptibilité personnelle à l'échec)

– traitement d'un message  $\langle 'proposal', A', g \rangle$  : Un agent  $A$  est concerné par une proposition si celle-ci résulte d'une de ses requêtes. Cependant, la *charge cognitive* d'un agent est décrémentée même s'il n'est pas concerné par cette proposition. Ceci reflète sa perception du *climat social*. Avant d'accepter une proposition, l'agent doit analyser celle-ci par le biais d'une méthode abstraite dépendante du problème.

```

if ( $A \neq A'$ )  $\wedge$  ( $\exists g' \in P_g^A | P^g == P^{g'}$ )
  analyse( $A^{g'}$ )
  if ( $A^{g'}$  is acceptable)
     $A^g \leftarrow A^{g'}$ 
     $V^{g'} \leftarrow true$ 
     $\psi^A \leftarrow \psi^A - (\alpha_s^A * \psi^A)$  (satisfaction personnelle)
  else
    ( $\forall A_j, A_j \neq A : M^{A_j} \leftarrow M^{A_j} \cup \langle 'refusal', A, g \rangle$ ) (diffusion du refus)
else
   $\psi^A \leftarrow \psi^A - (\alpha_c^A * \psi^A)$  (l'ambiance collective s'améliore)

```

– traitement d'un message  $\langle 'refusal', A, g \rangle$  : Un refus augmente la charge cognitive d'un agent de façon différente selon qu'il est directement concerné ou non par celui-ci.

```

if ( $A \neq A'$ )  $\wedge$  ( $\exists g' \in R_g^A | P^g == P^{g'}$ )
   $\psi^A \leftarrow \psi^A + (\alpha_s^A * \psi^A)$ 
   $R_g^A \leftarrow R_g^A - g'$ 
else
   $\psi^A \leftarrow \psi^A + (\alpha_c^A * \psi^A)$  (l'ambiance collective se dégrade)

```

– traitement d'un message  $\langle 'cancellation', A, g \rangle$  : L'annulation augmente la charge cognitive des agents différemment selon qu'ils sont directement concernés par celui-ci ou non.

```

if ( $\exists g' \in P_g^A | P^g == P^{g'}$ )
   $\psi^A \leftarrow \psi^A + (\alpha_s^A * \psi^A)$ 
   $V_g' \leftarrow false$ 
else
   $\psi^A \leftarrow \psi^A + (\alpha_c^A * \psi^A)$  (l'ambiance collective se dégrade)

```

#### 4. Implémentation

Nous avons procédé à une implémentation des agents émotionnels grâce à la plateforme **oRis** et avons instancié cette implémentation au problème des emplois du temps. **oRis** est un langage interprété intégrant un simulateur et permettant la spécification rapide d'objets actifs communicants. Il est particulièrement adapté à l'implémentation d'architectures d'agents et renvoyons le lecteur à [HAR 02] pour plus de précision à son sujet. La figure 4 représente le diagramme de classe des agents émotionnels. On y retrouve les différents éléments mentionnés dans la formalisation précédente.

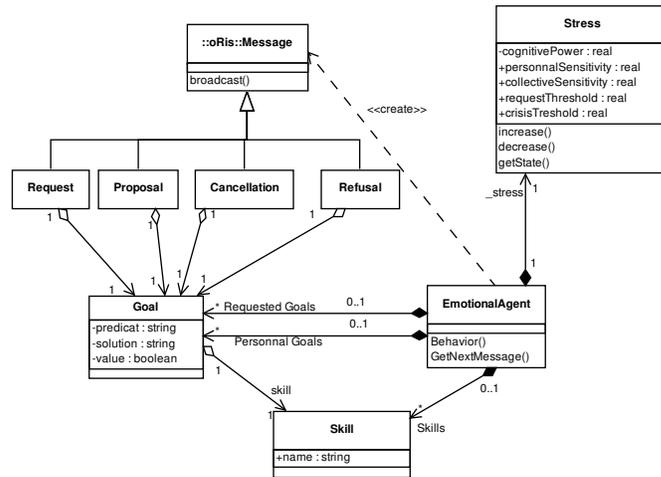


Figure 4. Diagramme de classe des agents émotionnels

#### 4.1. Application au problème de l'emploi du temps distribué

Le problème de l'emploi du temps a été utilisé pour tester cette approche. Ce problème, proposé par le groupe de recherche *Approches par Sociétés d'Agents* (ASA), a fait l'objet de différentes études non distribuées et statiques [KAY 97], [MAR 98] et est traité au sein du groupe ASA, dans un cadre dynamique et distribué. Il s'agit de définir un emploi du temps concernant des groupes d'élèves devant suivre une série de cours de différentes matières. Chaque professeur enseigne une matière et possède des créneaux horaires durant lesquels il est disponible. Ce problème est réputé difficile car de complexité non polynomiale. Contrairement aux approches de type DCSP, nous évitons une formalisation mathématique complexe puisque les contraintes sont implicites et localisées à chaque agent. Les classes de la figure 4 ont été spécialisées de la façon suivante :

- Les élèves et les professeurs sont des agents émotionnels. Seuls les élèves possèdent des *buts personnels* qui correspondent à la recherche d'un professeur et d'un horaire pour une liste de cours à suivre.
- Les professeurs possèdent la compétence (spécialisation de la classe *Skill*) d'atteindre les *buts personnels* requis par les élèves, si la matière à enseigner correspond à la leur.
- Une méthode *Solving* (section 3.3) est définie pour les professeurs et leur permet de trouver un créneau parmi leurs disponibilités.
- Une méthode *Acceptable* (section 3.3) est définie pour les élèves afin d'évaluer la recevabilité des propositions.

Le mécanisme générique présenté au paragraphe 3.1 est ensuite utilisé pour la recherche d'une solution.

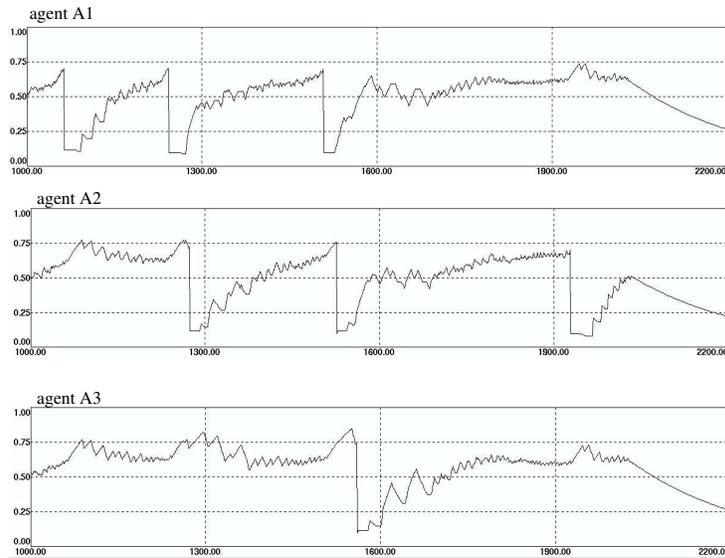
## 4.2. Résultats

### 4.2.1. Comportement de l'algorithme

Nous avons testé l'algorithme pour différents cas reflétant des *niveaux* de difficultés particuliers. En fait, la définition de la complexité d'un tel problème n'est pas triviale. Elle dépend certes du nombre de variables (cours à faire, nombre de professeurs ...), mais essentiellement du rapport entre la taille de l'espace de recherche et le nombre de solutions acceptables dans cet espace. En d'autres termes, le nombre de cours ou le nombre d'élèves accroissent la difficulté du problème, mais le nombre de professeurs la décroît et surtout leur disponibilité commune (créneaux horaires disponibles commun à chaque professeurs) l'accroît. De même, si la résolution du problème implique que tous les créneaux disponibles de tous les professeurs sont pris, le problème est plus difficile que s'ils leur restent un nombre de créneaux disponibles à la fin de la résolution. La figure 5 montre l'évolution des charges cognitives de trois agents professeurs à la fin de la résolution d'un de ces problèmes : placement de 80 cours, concernant 3 groupes d'élèves et 3 professeurs. Les temps indiqués en abscisses sont des temps logiques (nombre de cycle de vie de chaque agent), sur un ordinateur de performance moyenne, cette résolution prend entre 30 secondes et 2 minutes. On peut observer le phénomène de hiérarchisation des généurs qui provoque des *crises en cascade* : A partir de l'instant 1000 l'agent A1 pique des crises à priori sans effet (les créneaux horaires dont il dispose sont apparemment systématiquement rejeté) et les agents A2 et A3 n'ont pas leurs *charges cognitives* qui décroissent significativement. L'agent A2 entre alors en crise au temps 1250 (si l'on utilise la métaphore, il remet en question ses engagements car il perçoit que les colères de l'agent A1 sont inutiles). Un phénomène similaire à lieu pour l'agent A3 relativement à A1 et A2 au temps 1570. Enfin, vers le temps 2000, toutes les *charges cognitives* diminuent : le problème est résolu (un emploi du temps est trouvé pour tous les agents professeurs et élèves). L'algorithme ne s'arrête pas pour autant et permet l'introduction dynamique d'autres contraintes (nouveaux cours à faire, nouveaux élèves ...) qui ne remettent en cause la solution trouvée que partiellement et si nécessaire.

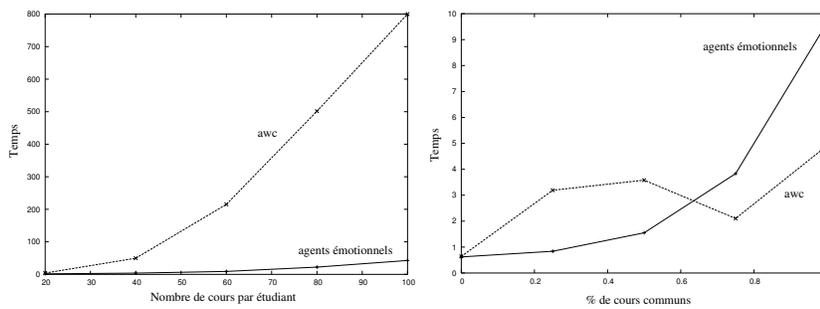
### 4.2.2. Comparaison de performances

Par souci d'évaluation de performance et de comparaison avec l'algorithme AWC [HIR 00], nous avons implémenté les deux approches à l'aide d'une version d'oRis compilée (C++). Les agents émotionnels peuvent alors placer 140 cours en quelques secondes sur un problème très difficile (relativement à la définition donnée précédemment). La comparaison avec l'AWC est délicate car la notion de difficulté n'est pas la même pour chacune des approches. Par exemple, dans le cas d'un problème où l'on préserve une part de créneaux de travail non commune à tous les professeurs, que l'on augmente le nombre de cours, d'élèves et de professeurs, l'AWC augmente le nombre



**Figure 5.** Visualisation du phénomène de “crises en cascades”

de variables et de messages échangés et ses performances s’écroule (voir figure 6 gauche). Par contre, si c’est le nombre de créneaux horaire disponibles communs aux professeurs qui augmente pour un problème donné, l’incomplétude de l’algorithme des agents émotionnels induit un ralentissement de la recherche (voir la figure 6 droite, chaque point des courbes correspond à un temps moyen calculé sur 100 expériences).



**Figure 6.** Comparaison de performances entre l’AWC et les Agents émotionnels

## 5. Conclusion et travaux futurs

Nous avons proposé une approche métaphorique pour la résolution distribuée de problèmes qui présente des caractéristiques intéressantes d'un point de vue robustesse, dynamique, modélisation et performance. Nous l'avons éprouvé par le biais du problème des emplois du temps distribué. Nous obtenons des performances équivalentes voire meilleures qu'avec un des meilleurs algorithmes de résolution distribuée classiques (AWC). Nous expliquons ce résultat par le fait que l'AWC est un algorithme de recherche systématique, optimisé à l'aide de critères purement quantitatifs n'apportant aucune sémantique particulière aux contraintes et aux agents du problème. Cette expérience montre la pertinence de la métaphore utilisée. Les principaux avantages de cette approche sont plus particulièrement liés à la modélisation naturelle du problème et appropriée à une résolution dynamique. Au contraire dans une approche de type AWC, la recherche des variables et des contraintes est une étape complexe : le problème est d'abord vu globalement avant d'être distribué, ce qui implique qu'une modification dynamique nécessite souvent une redéfinition du problème global.

Actuellement, nous travaillons sur la modélisation et l'implémentation, au travers de cette métaphore, d'une auto-relaxation des contraintes par les agents lorsqu'aucune solution ne semble émerger. Nous tentons également de limiter les cycles *inutiles* inhérents à l'approche et dus à l'absence de mémorisation des situations bloquantes (les *noogoods* des algorithmes classiques). Cependant, nous tenons à une absence, tout au moins partielle, de mémorisation. En effet, celle-ci rapprocherait cet algorithme des algorithmes classiques et de leurs inconvénients (adaptation dynamique et explosion mémoire). Enfin, nous projetons d'utiliser cet algorithme pour d'autres problèmes réputés difficiles.

## 6. Bibliographie

- [DOR 99] DORTIER J., « Espoirs et réalités de l'intelligence artificielle », HUMAINES S., Ed., *Le cerveau et la pensée, La révolution des sciences cognitives*, p. 69–77, Lavoisier, 1999.
- [DRO 91] DROGOUL A., FERBER J., JACOPIN E., « Pengi : Applying Eco-Problem-Solving for Behavior Modelling in an Abstract Eco-System », *Modelling and Simulation : Proceedings of ESM'91, Simulation Councils*, 1991, p. 337-342.
- [DUG 00] DUGALE J. PAVARD B., SOUBIE J., « A Pragmatic Development of a Computer Simulation of an Emergency Call Centre », ET AL. R. D., Ed., *Designing Cooperative Systems, Frontiers in Artificial Intelligence*, IOS Press, 2000.
- [DUR 94] DURFEE E. H., ROSENSCHEIN J., « Distributed problem solving and multiagent systems : Comparisons and examples », KLEIN M., Ed., *Proceedings of the 13th International Workshop on DAI*, Lake Quinalt, WA, USA, 1994, p. 94–104.
- [FER 95] FERBER J., *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*, InterEditions, 1995.
- [FRI 01] FRIGIONI, « Dynamic Algorithms for classes of constraint satisfactions problems », *Theoretical computer science*, vol. 259, 2001, p. 287–305.

- [GLE 99] GLEIZE M., CAMPS V., GLIZE P., « A theory of emergent computation based on cooperative self-organization for adaptive artificial systems », *Proceedings of the Fourth European Congress on Systemic*, Valence, 1999.
- [HAR 02] HARROUET F., TISSEAU J., REIGNIER P., CHEVAILLIER P., « oRis : un environnement de simulation interactive multi-agents », *Revue des sciences et technologie de l'information, série Technique et science informatiques (RSTI-TSI)*, vol. 21, n° 4, 2002, p. 499–524.
- [HIR 00] HIRAYAMA K., YOKOO M., « An approach to overconstrained distributed constraint satisfaction problems : Distributed hierarchical constraint satisfaction », 2000.
- [KAY 97] KAY ANKE R. S., DILGER W., « Producing and Improving Time Tables by Means of Constraint and Multi-agent Systems », *The AAI-97 Workshop on Constraints and Agents*, 1997.
- [MAE 89] MAES P., « The dynamics of action selection », *Proceedings of the international Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI'89*, 1989.
- [MAR 98] MARÍN H. T., « Combinations of GAs and CSP Strategies for Solving the Examination Timetabling Problem », 1998.
- [MAT 02] MATHIEU P., VERRONS M., « A Generic Model for Contract Negotiation », *Artificial Intelligence in Virtual Market, AISB'2002, Symposium on Adaptive Agents and Multi-Agent Systems*, London, England, 2002.
- [MIL 01] MILIND H. J., « Towards Argumentation as Distributed Constraint Satisfaction », 2001.
- [MOD 01] MODI P. J., JUNG H., TAMBE M., SHEN W.-M., KULKARNI S., « A Dynamic Distributed Constraint Satisfaction Approach to Resource Allocation », *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2239, 2001, p. 685–690.
- [PIC 95] PICARD R., « Affective computing », 1995.
- [SMI 81] SMITH R. G., DAVID R., « Frameworks for Cooperation in Distributed Problem solving », *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 11, n° 1, 1981, p. 61–70.
- [WAL 01] WALSH W. E., YOKOO M., HIRAYAMA K., WELLMAN M. P., « On Market-Inspired Approaches to Propositional Satisfiability », *IJCAI*, 2001, p. 1152–1160.
- [YOK 01] YOKOO M., *Distributed Constraint Satisfaction*, Springer, 2001.