
Dynamiques émotionnelles d'une population d'agents incarnés

Julien Saunier^{1,2}, Hazaël Jones³

1. LITIS, INSA-Rouen, Normandie Université,
Avenue de l'Université - BP 8, 76800 Saint-Étienne-du-Rouvray
julien.saunier@insa-rouen.fr

2. Université Paris Est, LEPSiS, Ifsttar,
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, 77440 Champs sur Marne

3. LIP6 - Université Pierre et Marie Curie,
4 place Jussieu, 75005 Paris, France
hazael.jones@lip6.fr

ABSTRACT. Affective computing is the study and development of systems and devices that can recognize, interpret, process, and simulate human affects. In this context, computational modelling of emotion is a major challenge in order to design believable virtual humans. The phenomenon of emotional contagion plays a role in individual and collective behaviour (emergence of groups).

In this article, we propose the MA/SDEC (Mixed Agent/Social Dynamics for Emotion Computation) architecture in order to manage the set of emotional dynamics. Emotions evolve in function of three influences: punctual events, temporal dynamics and external influences. In an embodied agent approach, the first is the responsibility of the agent's mind, the second of the agent's body, and the third of the environment. We show how contagion can be calculated when social relations between agents are unknown. Several experiments allow us to validate the model, analyze its properties, calibrate its parameters and evaluate its performance.

RÉSUMÉ. L'informatique affective est l'étude et le développement de systèmes qui peuvent reconnaître, interpréter, traiter et simuler des émotions humaines. Dans ce contexte, la modélisation computationnelle des émotions est un défi important permettant de créer des humains virtuels crédibles. Le phénomène de contagion émotionnelle joue un rôle au niveau des comportements individuels et collectifs (émergence de groupes).

Dans cet article, nous présentons l'architecture MA/SDEC (Architecture Mixte Agent/Sociale pour le Calcul des Émotions) pour la gestion de l'ensemble des dynamiques émotionnelles. Une émotion évolue grâce à trois influences: la perception d'événements, la dynamique temporelle et la contagion émotionnelle. Dans une approche d'agent incarné, la première influence est sous la responsabilité de l'esprit de l'agent, la seconde sous celle de son corps, et la troisième sous celle de l'environnement. Nous montrons comment la contagion peut-être calculée lorsque les

relations sociales des agents sont inconnues. Des expérimentations nous permettent de valider le modèle, d'analyser ses propriétés, de le calibrer et d'évaluer ses performances.

KEYWORDS: Architecture, Environment, Emotional contagion, Embodied agent, Multi-agent.

MOTS-CLÉS : Architecture, Environnement, Contagion émotionnelle, Agent incarné, Multi-agent.

1. Introduction

Pour reproduire fidèlement la réalité, la simulation de comportements humains et animaux nécessite la prise en compte des émotions au sein du modèle de décision (?; ?; ?). Les émotions ont un impact sur l'ensemble du cycle de l'agent: perception, décision et action sont orientées par l'état émotionnel de l'agent. Dans cet article, nous nous intéressons au calcul des émotions des agents, et plus précisément aux différentes influences générant leur état émotionnel.

Récemment, la thématique de la contagion émotionnelle a émergé pour expliquer un certain nombre de phénomènes collectifs, tels que les comportements de foule (?; ?) ou l'efficacité de groupes dans la réalisation de tâches (?; ?). Le comportement collectif n'est pas un simple agrégat de comportements individuels indépendants (?; ?), en particulier à cause de la capacité humaine à synchroniser son état émotionnel avec celui de ses congénères. Ce phénomène prend place grâce à deux mécanismes: l'empathie (?; ?) et la contagion émotionnelle (?; ?). L'empathie est un phénomène cognitif, la "faculté intuitive de se mettre à la place d'autrui, de percevoir ce qu'il ressent"¹. A l'inverse, la contagion émotionnelle est un phénomène réactif désignant "un processus par lequel une personne ou un groupe de personnes influence les émotions ou le comportement d'une autre personne ou d'un autre groupe par l'induction consciente ou inconsciente d'états émotionnels et d'attitudes comportementales" (?; ?).

Si l'évaluation de l'état émotionnel d'un agent en fonction de sa perception a été étudié de façon extensive dans la littérature (voir par exemple (?; ?) et (?; ?)), la contagion émotionnelle a été moins étudiée. On peut tout de même citer (?; ?; ?; ?). La contagion émotionnelle laisse cependant un certain nombre de questions ouvertes: (i) Quelle architecture multi-agents pour mettre en place des simulations d'agents émotionnels, (ii) comment simuler des foules désorganisées (par opposition à des groupes dans lesquels les relations sont connues), et (iii) comment équilibrer les dynamiques émotionnelles internes et externes?

Concernant le point (i), les travaux sur la simulation de contagion émotionnelle au sein d'un groupe n'explicitent pas quelle(s) partie(s) du système gère(nt) les différentes influences. Nous proposons une architecture hybride dans laquelle une partie des dynamiques émotionnelles est déléguée à l'environnement multi-agents, en respectant les mécanismes réels sous-jacents.

Sur le point (ii), les travaux antérieurs s'appuient sur une hypothèse forte: les membres d'un groupe et leurs relations sociales sont connues. Cependant, dans des foules désorganisées ou dans des situations où les participants ne se connaissent pas, les groupes et les relations sociales ne pré-existent pas et émergent des interactions entre agents. Dans ce cas, nous proposons d'utiliser la topologie physique, dérivée

1. Dictionnaire Larousse.

de travaux sur les interactions indirectes, pour permettre la formation de groupes en levant les autres pré-requis.

Enfin, concernant la calibration des dynamiques des émotions (iii), les agents possèdent aussi une dynamique interne des émotions. Cette dynamique est fondée sur l'évaluation des événements perçus et un facteur temporel de stabilisation. Il est donc nécessaire d'équilibrer ces effets et ceux de la contagion émotionnelle pour que les trois dynamiques puissent s'exprimer.

L'approche incarnée (*embodiment*) a, depuis les années 80, apporté une nouvelle façon de concevoir l'Intelligence Artificielle, en contrepoint de l'approche cognitive traditionnelle. Quand cette dernière conçoit l'intelligence du système comme celle de son unité de contrôle, l'incarnation démontre la possibilité de simplifier le contrôle par une utilisation des capacités du corps, des lois de l'environnement et de l'interaction entre ces trois éléments (esprit, corps, environnement). Les systèmes multi-agents s'inscrivent principalement dans l'approche cognitive, par leur nature même de systèmes logiciels. Les agents situés, interagissant avec leur environnement, ont mis à profit de façon limitée des notions appartenant à l'approche incarnée, par exemple les algorithmes ou simulations à bases de fourmis. Cependant, si l'environnement est mis en exergue, la différenciation corps/esprit reste limitée.

En section 2, nous approfondissons les motivations de notre architecture de gestion des dynamiques émotionnelles. En section 3, nous introduisons l'architecture, MA/SDEC, ainsi que nos formules de calcul de l'émotion. En section 4, nous donnons les résultats d'expérimentations pour valider notre modèle à l'échelle d'un groupe, puis nous montrons ses propriétés en section 5 et nous le calibrons pour des simulations de plus grande taille. En section 6, nous évaluons l'architecture proposée en terme de temps de calcul. Enfin nous discutons notre approche et proposons quelques perspectives en section 7.

2. Émotion, environnement et agents incarnés

Les émotions évoluent en fonction de trois influences (?, ?) : les événements ponctuels, la dynamique temporelle et la contagion émotionnelle. Traditionnellement en modélisation agent, l'ensemble des processus est intégré dans l'architecture de l'agent, voir par exemple (?, ?; ?). Si l'évaluation cognitive de l'impact des événements ponctuels fait nécessairement partie du processus de l'agent, nous proposons de décentraliser les autres processus dans le corps logiciel de l'agent et dans l'environnement.

L'évaluation des émotions générées par un percept est le résultat d'un double processus intuitif et cognitif (?, ?). Le premier est semi-automatique, il représente le changement affectif immédiat résultant d'un percept et concerne les émotions dites primaires (telles que le plaisir et la peur). Le second est une évaluation cognitive, qui dérive de la cohérence entre les croyances, les buts et les percepts de l'agent et les émotions qu'il ressent, il concerne les émotions à la fois primaires et secondaires

(telles que le soulagement et la colère). Les émotions secondaires se produisent après les émotions primaires, elles peuvent être la conséquence d'émotions primaires ou le résultat d'une évaluation cognitive interne plus complexe.

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, l'empathie et la propagation émotionnelle sont nécessaires pour l'apparition de comportements collectifs cohérents. Si l'empathie et plus généralement la conscience des autres (*mutual awareness*) (? , ?) nécessitent une représentation symbolique de l'autre et de ses activités, Hatfield *et al.* (? , ?) ont montré que la contagion émotionnelle se déroulait à un niveau de conscience significativement plus bas que l'empathie, via des processus automatiques non contrôlés.

De façon à proposer une architecture adéquate pour la contagion émotionnelle et la gestion des dynamiques internes de l'agent, nous fondons notre approche sur deux concepts: la séparation corps/esprit et l'environnement actif.

La notion d'environnement explicite a longtemps été associée au paradigme des agents réactifs, mais des travaux (? , ?) ont montré les avantages de l'exploitation de cette abstraction dans le cadre général des SMA. Ces travaux mettent en exergue la délégation d'un certain nombre de responsabilités des agents vers l'environnement. En particulier, celui-ci peut être en charge de médiatiser une partie de l'état de l'agent.

Dans la même logique, on peut considérer que l'agent est constitué de deux parties: son esprit et son corps (lequel peut éventuellement être un corps logiciel, *i.e.* non physique mais fonctionnellement séparé de l'agent) (? , ?). Il s'agit alors d'agents incarnés. L'esprit contient le processus décisionnel de l'agent et est autonome. Le corps est influencé par l'esprit, mais régulé par l'environnement. Cela correspond au fonctionnement humain: les capacités corporelles limitent les possibilités d'action et la qualité de la réalisation de ces actions. En pratique, cela signifie que l'accès à l'état du corps de l'agent est régulé par l'environnement, y compris pour l'agent lui-même.

Pour le calcul des émotions, nous proposons ainsi que la perception émotionnelle des événements soit sous la responsabilité de l'esprit de l'agent, la dynamique temporelle sous celle de son corps et la contagion émotionnelle sous celle de l'environnement.

Un certain nombre de membres de la communauté multi-agents considère qu'une telle modélisation enfreint le principe d'autonomie de l'agent. Nous pensons au contraire qu'elle permet de séparer clairement ce qui est du ressort de chaque élément du système, en se fondant sur les mécanismes intervenant dans le monde réel. L'agent (ou l'humain) étant toujours situé dans un environnement (logiciel, réel ou simulé), il n'en est jamais indépendant au sens strict.

Pour évaluer l'autonomie des agents dans le cadre de notre proposition, nous reprenons la définition de l'autonomie de Castelfranchi (? , ?), qui considère l'autonomie comme l'état de dépendance d'un agent vis-à-vis des autres éléments du système en fonction d'un but, d'une fonction ou d'une action.

Concernant l'*autonomie non-sociale*, *i.e.* vis-à-vis de l'environnement, l'agent est autonome en terme de gestion et génération de ses états internes et de ses buts.

Il est également autonome dans le sens où il peut diriger son attention au sein de l'environnement. En revanche, il est dépendant de l'environnement pour une partie inconsciente/automatique de son processus émotionnel, et pour l'état de son corps logiciel. En effet, dans la mesure où l'être humain ne possède qu'un contrôle limité sur ses propres émotions du fait de leur aspect automatique (?), nous considérons que l'environnement régule les accès à l'état émotionnel de l'agent de la même façon que le corps maintient automatiquement une dynamique temporelle et des réponses physiologiques à l'état des autres agents. L'agent est également dépendant de l'environnement pour la réalisation des actions qu'il tente d'effectuer. Cette notion est classique pour les agents situés (?): l'agent influence son environnement, mais ce dernier décide si et dans quelle mesure cette action est réussie en fonction d'un ensemble de règles de fonctionnement.

Concernant l'*Autonomie sociale*, i.e. l'autonomie de l'agent vis-à-vis des autres agents, l'agent conserve son autonomie pleine.

3. L'architecture MA/SDEC

Le modèle d'architecture MA/SDEC définit les mécanismes globaux pour le calcul des émotions et de leurs dépendances. MA/SDEC décrit les dynamiques et responsabilités de chaque composant du système multi-agent, mais ne repose pas sur une représentation particulière des émotions et de la personnalité.

Comme nous l'avons vu en section précédente, les émotions évoluent en fonction de trois influences: les événements ponctuels, la dynamique temporelle et la contagion émotionnelle, lesquelles sont respectivement sous la responsabilité de l'esprit de l'agent, de son corps et de l'environnement.

3.1. Contagion émotionnelle

La contagion émotionnelle représente l'impact de l'état émotionnel des agents sur celui des autres agents. Une proximité spatiale ou psychologique et un canal sont donc nécessaires pour qu'un tel phénomène apparaisse.

Une illustration basique est donnée en figure 1. Au début, a_1 est malheureux, a_2 et a_4 sont heureux et a_3 est neutre. Dans cette situation, a_1 influence et est influencé par a_2 et a_3 . De manière similaire, a_3 influence et est influencé par a_1 et a_4 . Il en résulte que a_2 devient malheureux, partageant l'émotion de a_1 . Quant à lui, l'état de a_3 n'est pas modifié puisqu'il est sujet à l'influence d'émotions contraires de la part de a_1 et a_4 .

Notons que l'ordre de calcul des effets de la contagion émotionnelle modifie le résultat obtenu. Dans l'exemple, calculer le nouvel état d' a_1 avant le nouvel état d' a_2 amène a_1 à devenir heureux, modifiant ainsi la chaîne de calculs. En pratique, cela implique de mettre à jour simultanément tous les états en fonction de l'état antérieur pour ne pas biaiser le résultat.

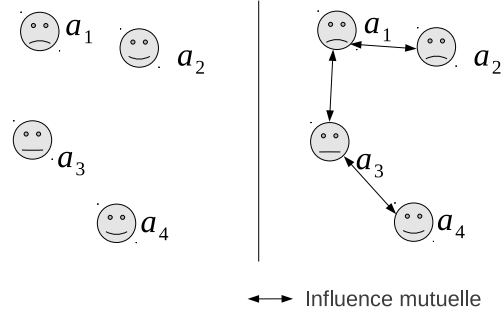


Figure 1. Gauche: États initiaux. Droite: Nouveaux états.

Nous choisissons de représenter les émotions dans un intervalle $[-1, 1]$. Pour chaque émotion e , la formule de mise à jour est composée de trois termes indépendants représentant les trois façons dont l'émotion peut évoluer :

$$e_{t+1} = e_t + \Psi(b, i, p, e) + \Phi(p, e) + \Omega(p, e)$$

avec

- b, i, p : croyances, intentions et personnalité de l'agent,
- $\Psi(b, i, p, e)$ la dynamique liée à la perception des événements : les émotions évoluent en fonction des stimuli et de l'état interne de l'agent,
- $\Phi(p, e)$ la dynamique temporelle : les émotions ont tendance à décroître vers un équilibre en fonction des traits de personnalité de l'agent,
- $\Omega(p, e)$ la contagion émotionnelle: les émotions varient en fonction des autres agents et de la sensibilité de l'agent.

Dans la figure 2, nous donnons une vue d'ensemble de l'architecture et la façon dont elle est liée au modèle associé. Dans le modèle, l'agent virtuel comprend l'esprit (1) et le corps (2). Les émotions sont stockées dans le corps des agents. La dynamique liée aux événements ponctuels Ψ est une influence de l'esprit sur le corps. La dynamique temporelle Φ est gérée par le corps lui-même. La contagion émotionnelle Ω est gérée par l'environnement (3). Dans le système multi-agents, les agents sont utilisés pour implémenter seulement la partie "esprit" (1) des humains simulés, tandis que leurs corps (2) et l'environnement virtuels (3) sont tous deux gérés par l'environnement du SMA.

Dans cet article, nous nous focalisons sur la dynamique temporelle et la contagion émotionnelle, et ne détaillons la dynamique interne qu'en ce qu'elle participe à l'architecture générale.

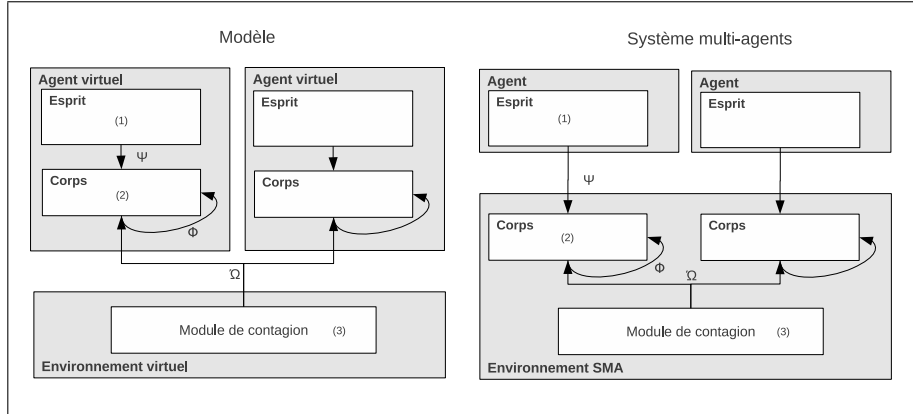


Figure 2. Architecture générale: modèle (gauche) et système multi-agents (droite)

3.2. Esprit de l'agent : dynamiques liées aux événements

La figure 3 représente l'architecture agent gérant les émotions que nous proposons. Deux exemples d'architectures compatibles peuvent être trouvées dans (? , ?) et (? , ?).

Dans cette architecture, l'agent obtient de nouvelles informations (perception, messages) de l'environnement. Ces nouvelles informations génèrent immédiatement des émotions, gérées par le corps de l'agent, à partir d'une première fonction de mise à jour. Ensuite, l'agent change ses croyances en fonction de ses émotions. La sélection des désirs et des intentions est similaire au modèle BDI, mis à part la prise en compte de l'influence des émotions. Une fois que les intentions sont sélectionnées, l'agent met à jour ses émotions grâce à une seconde fonction de mise à jour. Si cette mise à jour modifie son état émotionnel, l'agent remet à jour ses croyances, ses désirs et ses intentions en conséquence. Enfin, il planifie ses actions et exécute son nouveau plan.

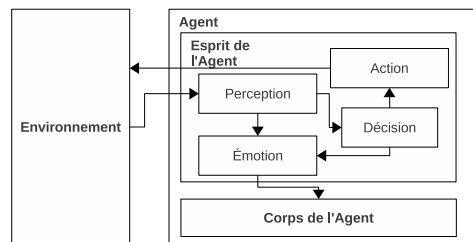


Figure 3. Architecture agent

La fonction de mise à jour des émotions est définie ainsi :

$$\Psi : B \times I \times P \times E \rightarrow E$$

avec B l'ensemble des croyances, I l'ensemble des intentions, P l'ensemble des personnalités et E l'ensemble des émotions.

Nous avons proposé une implémentation d'agent cognitif utilisant des règles floues pour la perception des événements (?). Dans ce travail Ψ résulte d'un mécanisme de mise à jour des émotions. Le module de perception permet de déterminer la probabilité d'occurrence d'un événement. Ensuite, selon la désirabilité de cet événement, les émotions de l'agent sont calculées .

3.3. Corps de l'agent : dynamiques internes

Les dynamiques temporelles internes (Figure 4) sont impulsées par l'agent lui-même ou par l'environnement. Elles représentent la tendance des émotions à se stabiliser dans le temps. Le calcul se déroulant au sein du corps de l'agent, il est réalisé dans notre modélisation par l'environnement pour conserver la cohérence des règles du système pour tous les agents.

Un second module se trouve au sein du corps, qui permet de contrôler la temporalité de la dynamique des émotions. Il s'agit de limiter les variations des émotions pour fluidifier les modifications d'état de l'agent, en évitant ainsi le risque d'oscillation à chaque cycle de calcul liées à des stimuli contraires.

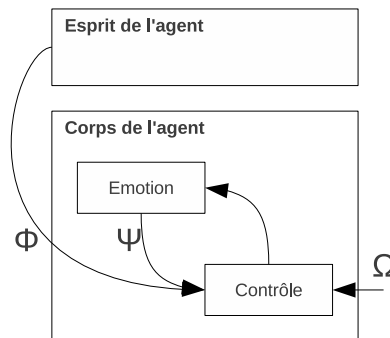


Figure 4. Dynamique temporelle

Plusieurs auteurs ont observé que l'intensité des émotions tend à décroître dans le temps, soit vers un état neutre (?), soit vers un niveau émotionnel de base (?; ?) qui dépend de la personnalité de l'agent. Puisque cette dynamique dépend du modèle de représentation des émotions, elle a rarement été explicitée dans la littérature. Par exemple, dans (?), les émotions sont tri-modales $\{-1, 0, 1\}$ et le paramètre

de décroissance de l'émotion correspond au nombre de pas nécessaires à un retour à l'état neutre si aucun événement ne se produit. Pour les émotions représentées dans l'intervalle $[-1, 1]$, nous proposons la formule suivante :

$$\begin{aligned}\Phi & : P \times E \rightarrow E \\ \Phi(p, e) & = (1 - \alpha_e)e_{base} + (\alpha_e - 1)e_t\end{aligned}$$

avec e_{base} le niveau émotionnel de base dépendant de la personnalité, e_t le niveau de l'émotion et α_e la vitesse de décroissance de l'émotion e . La même formule gère les dynamiques de toutes les émotions paramétrées pour chaque agent grâce à sa personnalité.

Le module de contrôle a pour fonction de limiter les variations émotionnelles d'un pas à l'autre. Il sert donc à stabiliser les émotions et lisser les transitions. La fonction Γ correspondante est:

$$\begin{aligned}\Gamma & : E \rightarrow E \\ \Gamma(\delta_e) & = \begin{cases} \delta_e & \text{si } |\delta_e| < \sigma \\ \frac{\delta_e}{|\delta_e|}\sigma & \text{sinon} \end{cases}\end{aligned}$$

Si la modification de l'état émotionnel $\delta_e = e_{t+1} - e_t$ est supérieure en valeur absolue à un paramètre σ , alors la variation est limitée à σ ou $-\sigma$ selon le signe de la variation de l'état émotionnel. Le paramètre σ dépend de la personnalité de l'agent et de l'émotion étudiée.

3.4. Environnement : dynamiques externes

La propagation des émotions permet aux agents d'être influencés par les états d'autres agents. La proximité spatiale et/ou psychologique est nécessaire pour que la propagation de l'émotion se produise. La proximité psychologique dépend des relations sociales des agents alors que la proximité spatiale ne se base que sur la distance physique entre deux agents.

Les dynamiques externes sont gérées à partir de la fonction de gestion de la perception de l'environnement multi-agent (\mathcal{P} , \mathcal{C}), afin de donner la bonne information aux bons agents.

Le module de gestion de la propagation des émotions est dans l'environnement multi-agent (Figure 5). Il met à jour cycliquement les états des corps des agents. Il obtient (1) l'état courant de l'agent, ici a_1 . Il met à jour (2) cet état dans le monde. L'état du monde contient les propriétés du corps de tous les agents. Ensuite, le module de gestion de la propagation des émotions calcule les effets de l'émotion sur les agents voisins en fonction des états précédents et de leur réceptivité. Enfin, l'environnement multi-agent propage (3) ces informations dans le corps des agents concernés, a_2 dans notre exemple.

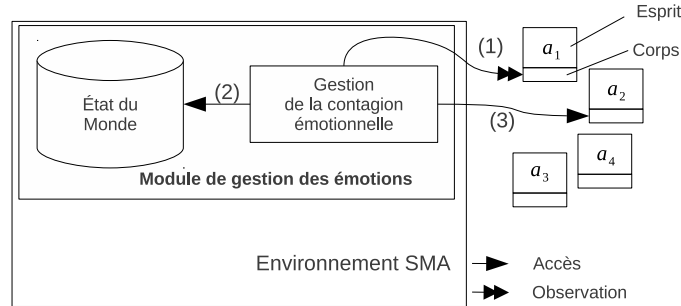


Figure 5. Module de propagation de la contagion émotionnelle de l'environnement et interaction avec les agents.

Le calcul de la contagion des émotions est inspiré de plusieurs travaux dans la modélisation des influences entre agents. Il y a un consensus sur les facteurs qui impactent la force de la contagion (δ , γ ; δ ; γ) : le niveau d'émotion de l'émetteur, la force d'expression de l'émetteur, la réceptivité du récepteur à l'égard d'une émotion (trait de personnalité) et la force de la relation entre le receveur et l'émetteur. Ces travaux sont tous basés sur le modèle de Barsade (δ , γ), chercheuse en psychologie. Cependant, dans cette étude de psychologie sociale, Barsade ne trouve pas de liens significatifs entre la force d'expression de l'expéditeur et la contagion, ce qui nous incite à ne pas inclure ce paramètre.

Tous ces travaux considèrent une contagion des émotions dans des groupes, mais ne considèrent pas la création de ces groupes, ou comment le mécanisme fonctionne quand de tels groupes ne préexistent pas. De même, la force de la relation entre deux agents dépend de leurs relations sociales, supposées connues.

Pour lever cette hypothèse, nous proposons d'utiliser la distance physique pour qualifier la force de la contagion de l'émotion :

$$\Omega : P \times E \rightarrow E$$

$$\Omega(p, e) = \delta_R \times \gamma_R$$

avec δ_R la réceptivité de l'agent et γ_r l'influence des autres agents sur l'agent R . Il a été montré que la réceptivité de l'agent peut être dérivée à partir de traits de personnalité (Agréabilité, Ouverture et Extraversion) exprimés via le modèle OCEAN (δ , γ). Dans le cadre de nos travaux, nous considérons que la réceptivité est un paramètre de l'agent.

γ_R est défini comme inversement proportionnel à la distance entre les agents :

$$\gamma_R = \sum_{\forall A \neq R | \text{dist}(A,R) < \tau} (e_A - e_R) \times \frac{\beta}{\text{dist}(A, R)}$$

avec e_A le niveau émotionnel de l'agent A et $\text{dist}(A, R)$ la distance euclidienne entre A et R . τ et β sont des paramètres utilisés respectivement pour définir la distance maximale de perception d'une émotion et la force des influences externes.

Nous notons qu'en cas de calcul séquentiel des effets de la contagion émotionnelle, l'ordre de calcul modifie le résultat obtenu. En pratique, cela implique de mettre à jour simultanément tous les états en fonction de l'état antérieur pour ne pas biaiser le résultat.

4. Validation

A notre connaissance, les seuls travaux ayant proposé une validation quantitative de la contagion émotionnelle l'évaluent au sein d'une simulation de déplacement en situation de panique (?; ?; ?; ?; ?). Les auteurs valident leurs modèles par une comparaison entre des données de suivi des individus (issues de vidéos) et les mouvements observés dans la simulation. Cette méthode teste l'hypothèse selon laquelle un simulateur sans contagion émotionnelle n'est pas capable de reproduire une scène réelle de façon aussi précise qu'avec contagion émotionnelle. Il s'agit d'une validation indirecte de la contagion émotionnelle s'appuyant sur une calibration automatique des paramètres pour faire correspondre la simulation aux données réelles. Ainsi, il est impossible de séparer les deux modèles en jeu (déplacement et contagion émotionnelle). Si ces études démontrent l'intérêt de l'ajout du mécanisme, elles ne valident pas les mécanismes choisis.

Aussi, nos expérimentations se déroulent en deux phases: la première a pour but de valider le mécanisme lui-même avec les données publiées dans une étude de psychologie sociale sur des groupes de petite taille, et la seconde a pour but d'étudier les propriétés macroscopiques du modèle en terme d'apparition de groupes homogènes, d'évolution et de stabilité du phénomène simulé, et de donner des éléments de calibration pour des groupes de grande taille. Dans nos simulations, les agents ne se déplacent pas, afin d'étudier le phénomène de contagion émotionnelle sans interférence d'un modèle de déplacement. Toutes les expérimentations ont été réalisées sur la plate-forme MadKit² (?; ?), une plate-forme multi-agent générique.

4.1. Données de références et paramètres de simulation

La majorité des modèles computationnels de contagion émotionnelle sont fondés sur l'étude de Barsade (?; ?). Celui-ci a mené un ensemble d'expérimentations sur

2. <http://www.madkit.org>

des groupes de 3 à 5 étudiants ne se connaissant pas et devant réaliser une tâche semi-coopérative. L'un des étudiants était un acteur devant jouer de façon constante au cours de l'exercice un état émotionnel particulier (enjoué/énergique, enjoué/peu énergique, triste/énergique, et triste/peu énergique). L'état émotionnel des autres individus du groupe était ensuite noté de deux façons: grâce à un questionnaire rempli par les participants, et par l'analyse par des experts de leur comportement enregistré sur vidéos. Nous proposons de valider notre modèle à l'aide des informations qualitatives et des données quantitatives données par Barsade dans son article.

Dans l'expérience de Barsade, les étudiants ne se connaissent pas, et la distance n'entre pas en jeu. Nous initialisons donc la distance entre tous les agents à une constante (15). Les autres variables sont initialisées comme montré en table 1. Nous considérons que le niveau émotionnel de l'acteur ne varie pas au cours du temps.

Table 1. Paramètres de simulation

Paramètre	Domaine	Valeur par défaut
δ_R	$[0.75, 1.25]$	Aléatoire uniforme
e	$[-1, 1]$	Aléatoire uniforme
e_{base}	$[-1, 1]$	Aléatoire uniforme
α_e	$[0, 1[$	0.9
β	\mathbb{R}^+	1
σ	$[0, 1]$	1

4.2. Vérification

Dans cette première expérience, nous étudions la forme de l'évolution des émotions au cours du temps, avec l'acteur jouant le rôle d'attracteur par la création de stimuli constants.

La figure 6 illustre cette expérience pour un groupe de 5 agents. Le niveau émotionnel (qui correspond à l'état émotionnel du groupe), est normalisé sur une échelle de 1 à 9 (au lieu de $[-1,1]$) en conformité avec l'étude de Barsade. Nous observons que l'état émotionnel des agents trouve un état d'équilibre autour de l'état de l'acteur. Ce n'est pas une convergence parfaite, puisque les points de stabilisation des agents diffèrent en fonction de leur paramètre e_{base} , lequel est respectivement 5.8, 6.6, 1 et 1.8 pour les agents 1, 2, 3 et 4.

Par rapport à Bosse *et al.* (? , ?) et à Lhomme *et al.* (? , ?), nous obtenons le même type de courbe, hormis que dans ces travaux, la convergence se fait en un même point pour tous les agents percevant les émotions des autres. La stabilisation autour de ce point que nous observons, différenciée selon les agents, est liée à l'effet de la dynamique interne. Notons que pour $\alpha_e = 1$ (autrement dit, la dynamique temporelle interne est nulle), les courbes convergent vers l'état de l'acteur, et que plus α diminue, plus les points d'équilibre s'éloignent de cet état.

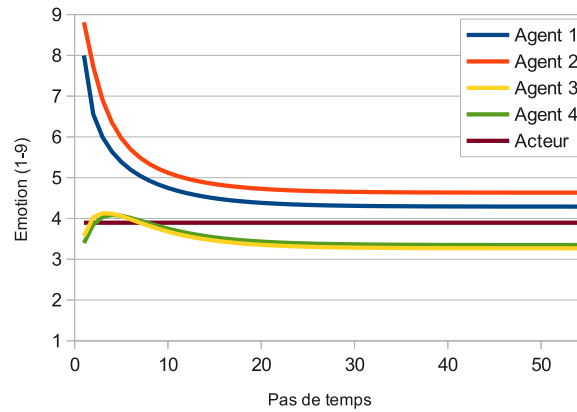


Figure 6. Convergence de l'état émotionnel dans un groupe de 5 agents.

Notre courbe est cohérente avec les résultats de Barsade, qui a trouvé à la fois une convergence émotionnelle et une assez forte disparité des états émotionnels individuels (l'écart-type des résultats de questionnaires est entre 0.99 et 1.16), qui se traduit dans notre modèle par l'équilibre des dynamiques externes et internes.

La figure 7 montre l'effet d'une variation de σ sur la même simulation que dans la figure 6. La fonction Γ , qui sert à limiter les variations de l'état émotionnel, provoque un allongement de la période de convergence, mais ne change pas la convergence finale des courbes.

Ceci permet de représenter des changements émotionnels qui, tout en prenant en compte la contagion émotionnelle, ne sont pas instantanés. Ce comportement, qui existe même si l'on retire la fonction Γ , est un phénomène d'hystérésis (?), autrement dit un retard de l'effet sur la cause.

Pour caractériser ce phénomène, nous avons réalisé une expérimentation lors de laquelle le stimulus n'est pas constant. Un agent change d'état entre deux modalités (-0.5 et 0.5) à un rythme de 0.05 par pas de temps, puis attend la stabilisation des autres agents avant de rechanger de modalité.

Les boucles d'hystérésis correspondantes sont tracées en figure 8. La relation de cause à effet étudiée est l'effet du gap (la différence entre l'état émotionnel de l'agent stimulant et l'état émotionnel de l'agent étudié) sur l'état émotionnel. Les deux états d'équilibres notés pour l'agent 3 sont les états stables, lorsque l'agent stimulant est respectivement à -0.5 (flèche de gauche) et 0.5 (flèche de droite).

Les parties de courbes ne faisant pas partie des boucles (sur la gauche de la figure) correspondent au moment où les agents rejoignent leur premier état stable depuis

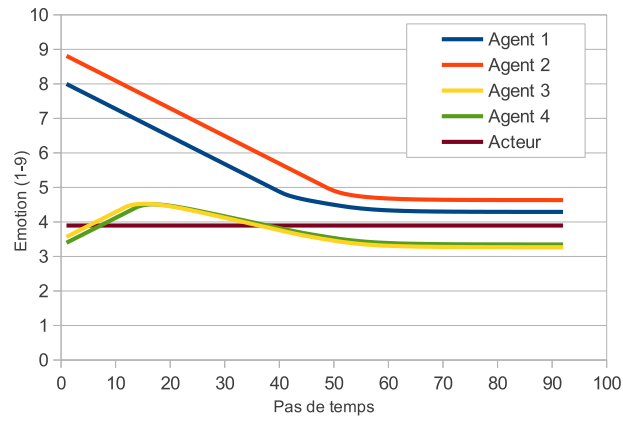


Figure 7. Convergence de l'état émotionnel dans un groupe de 5 agents avec $\sigma = 0.1$.

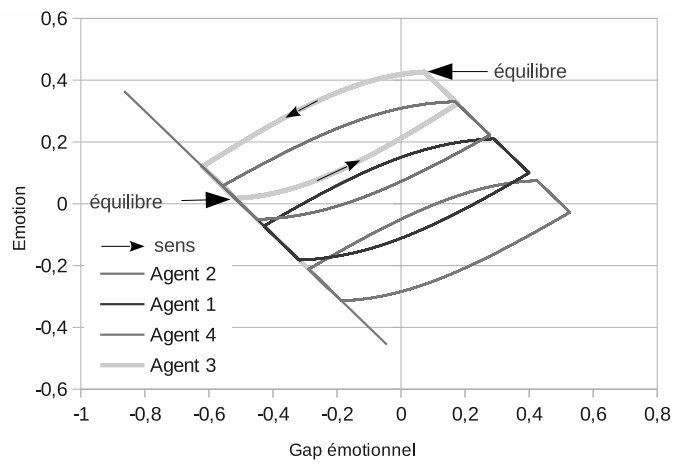


Figure 8. Boucles d'hystérésis dans un groupe de 5 agents avec $\sigma = 0.1$.

l'initialisation aléatoire. Le sens des transitions entre les deux états stables est noté

sur la figure: les boucles tournent en sens anti-horaire, dénotant le décalage temporel entre la cause et l'effet³.

Dans un premier temps, la pente de la boucle croît à mesure que le stimulus (représenté ici par le gap) est plus fort. Ici, l'état émotionnel de l'agent stimulé prend un retard de plus en plus important, lié à la mise à jour parallèle des états. Ensuite, la pente atteint la limite σ imposée par la fonction Γ (visible sur les parties rectilignes). Lorsque l'état de l'agent provoquant la stimulation cesse de décroître, les agents stimulés rejoignent leurs états stables respectifs, qui dépendent de leur personnalité et de la dynamique externe. On voit par exemple que pour un stimulus à -0.5 , l'agent 3 a pour état stable 0.01 , tandis que l'agent 4 a pour état stable -0.32 .

Ces boucles montrent l'évolution temporelle de l'effet de la contagion émotionnelle sur l'état des agents, ainsi que la possibilité de modifier sa dynamique grâce à σ .

4.3. Validation quantitative

Dans cette seconde expérience, nous souhaitons comparer quantitativement nos simulations aux données de Barsade. Pour cela, nous avons initialisé l'état de l'acteur aux valeurs estimées par les participants (enjoué: 6.62 et triste: 3.82), et observé l'évolution des autres agents. Nous avons effectué 100 simulations dans chaque modalité de l'acteur, et présentons les résultats dans la table 2, ainsi que les résultats originaux de Barsade.

Table 2. Résultats comparatifs. Les écart-types sont entre parenthèses.

Cas	Variable	Barsade (?, ?)	Simulation
Enjoué	État émotionnel du groupe ¹	5.07 ² (0.8)	4.7 ³ (0.45)
Triste	État émotionnel du groupe	3,75 (0.94)	3.54 (0.45)
Enjoué	Variation ⁴ individuelle	0.41 (1.13)	0.93(0.85)
Triste	Variation individuelle	- 0.25 (1.01)	-0.61 (0.85)

¹Échelle 1-7

²Moyenne de la note donnée par les participants et de celle donnée par les observateurs

³Moyenne de l'état émotionnel des agents (acteur exclu)

⁴Échelle 1-9

3. Lorsqu'il n'y a pas de phénomène d'hystérésis, la courbe se déplace le long d'un segment dont les extrémités sont les états stables. L'aller et le retour sont alors confondus. Une anticipation est représentée par des boucles tournant en sens horaire.

Sur la notation de l'état émotionnel du groupe, au niveau collectif, nos résultats de simulation sont très proches des données observées par Barsade, avec une erreur respective pour chaque modalité de 6.2% (enjoué) et 3.5% (triste).

Sur les variations individuelles de l'état émotionnel des participants, nous pouvons observer que si les tendances sont cohérentes avec les données de Barsade, les valeurs sont plus grandes en simulation, avec un facteur d'échelle autour de 2.3, mais qui reste raisonnable en valeur (6 à 7% sur l'échelle 1-9).

Une explication de cette différence est l'initialisation des paramètres des agents: dans les simulations, l'état initial e des agents est tiré au hasard indépendamment de la tendance de l'agent e_{base} . Autrement dit, un agent de nature enjouée a autant de chance de commencer la simulation joyeux que triste, ce qui n'est probablement pas le cas dans les expérimentations originales. L'état final ne dépendant que de l'acteur et des e_{base} des agents, la variation est alors surévaluée dans nos simulations.

5. Propriétés du mécanisme

Dans cette partie, nous étudions la formation et l'évolution de groupes homogènes d'agents en fonction des paramètres suivants: inclusion du mécanisme de contagion émotionnel, état initial, nombre d'agents, force de la contagion β et distance de perception τ . Nous étudions l'évolution d'une seule émotion, la peur, mais le mécanisme est le même pour toutes les émotions.

Dans ces simulations, les agents sont placés de façon pseudo-aléatoire dans un espace bi-dimensionnel. Les simulations sont exécutées 100 fois et les résultats sont une moyenne des simulations. Nous récapitulons les différents paramètres par défaut en table 3. Nous considérons qu'une moitié des agents a un niveau émotionnel de base à -1 et l'autre moitié à 1 , de façon à créer des différences plus tranchées dans l'évolution de l'état émotionnel des agents.

Table 3. Paramètres de simulation

Paramètre	Domaine	Valeur par défaut
N_{agents}	\mathbb{N}	19×19
δ_R	$[0.75, 1.25]$	aléatoire uniforme
e	$[-1, 1]$	aléatoire uniforme
e_{base}	$[-1, 1]$	Bimodal: -1 or 1
α_e	$[0, 1[$	0.99
β	\mathbb{R}^+	1
τ	\mathbb{N}	20
σ	$[0, 1]$	1

5.1. Comportement global et stabilité

Un exemple d'évolution de simulation est montré en figure 9. Les agents sont représentés par des points. Plus le point est foncé, plus l'agent est effrayé. Au début de la simulation (capture de gauche) les agents ont un état émotionnel aléatoire dans $[-1, 1]$, simulant l'occurrence d'un événement évalué par les agents de façon différente en fonction de leur perception de l'événement, de leur personnalité et de la façon dont ils ont évalué la situation. Au bout d'une minute, l'état des agents s'est stabilisé. La capture d'écran en haut à droite montre que des groupes d'agents ayant le même niveau de peur se forment grâce à la contagion émotionnelle. La capture d'écran en bas à droite montre la situation finale si on ne met pas en place de contagion émotionnelle (situation de contrôle). Dans ce cas, seule la dynamique temporelle est prise en compte, et aucun phénomène collectif n'apparaît.

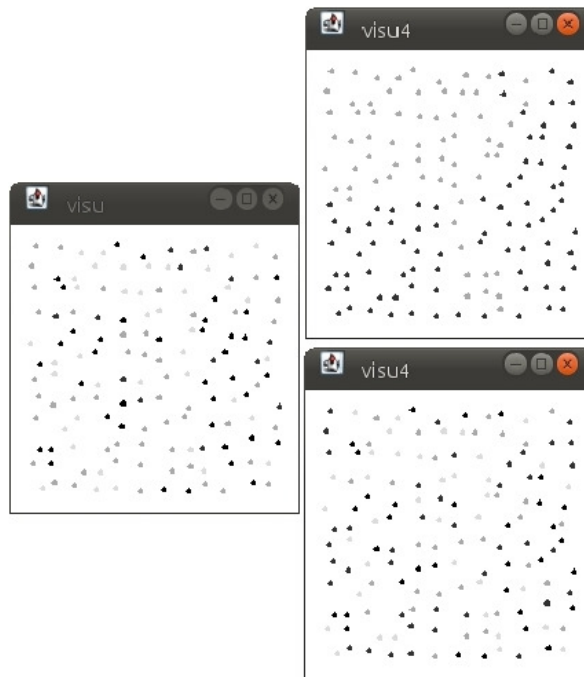


Figure 9. Gauche : État initial.
Droite : État final avec contagion émotionnelle (Haut) et sans contagion (Bas).

Cette expérience montre que la distance physique est suffisante pour permettre l'émergence de groupes homogènes malgré des personnalités hétérogènes, ce qui est typique de la psychologie des foules.

Nous avons vu que du fait de la formule de dynamique temporelle, les agents ayant un niveau émotionnel de base égal à 1 devraient atteindre la valeur de peur max-

imale au fil du temps. La figure 10 montre l'évolution de la simulation après stabilisation lorsqu'aucun événement particulièrement déplaisant ne s'est produit (valeurs initiales distribuées uniformément dans $[-1, 0]$). La capture d'écran de droite montre que bien que la moitié des agents aient une tendance à s'énerver, la régulation sociale limite l'effet de cette tendance dans des situations non émotionnellement chargées. Cependant, quelques agents deviennent effrayés. Ceux-ci sont situés en bord de foule,

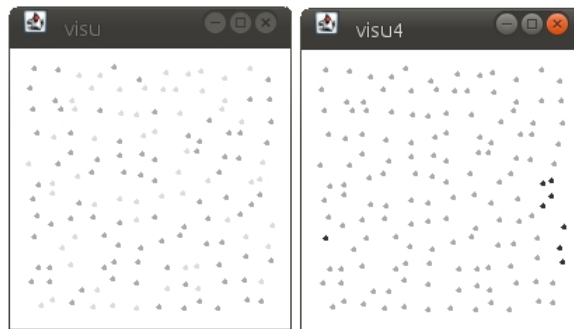


Figure 10. Évolution sans agents effrayés initialement. État initial (gauche), État final (droite).

et sont donc moins influencés par les autres agents, limitant ainsi l'effet régulateur de la foule.

Nous étudions également l'impact de la proportion initiale d'agents dont la peur est supérieure à 0. La figure 11 représente la proportion stabilisée d'agents effrayés en fonction de leur proportion initiale. Un agent est considéré comme effrayé si la valeur de sa variable peur est supérieure à 0. Les expérimentations montrent que la relation est quasiment linéaire. Des groupes d'agents (comme ceux montrés en figure 9) se forment quelle que soit la situation initiale, même lorsqu'il n'y a aucun agent effrayé au départ. C'est cohérent avec le comportement montré en figure 10, et probablement dû à notre choix d'un niveau émotionnel de base bi-modal pour les agents (-1 ou 1).

L'écart type est montré sous forme de barre d'erreur. Il montre que le résultat d'une simulation est relativement dépendant du tirage initial. L'écart type maximal (13%) se retrouve au milieu de la courbe.

Nous testons maintenant la stabilité de nos résultats en fonction du nombre d'agents, de façon à évaluer à quelles échelles le mécanisme reste cohérent. La figure 12 illustre la proportion d'agents effrayés en fonction du nombre d'agents. Un agent est considéré *influencé* si le signe de sa valeur de peur est contraire à celui de son niveau émotionnel de base. Elle montre que le nombre d'agents n'a pas d'impact majeur sur le mécanisme, puisque les proportions sont équivalentes pour 144 à 4225 agents. Cette proportion varie de moins de 1% pour plus de 1000 agents. L'écart type est très fort pour un nombre d'agents faible (16% pour 144 agents), mais décroît quand le nom-

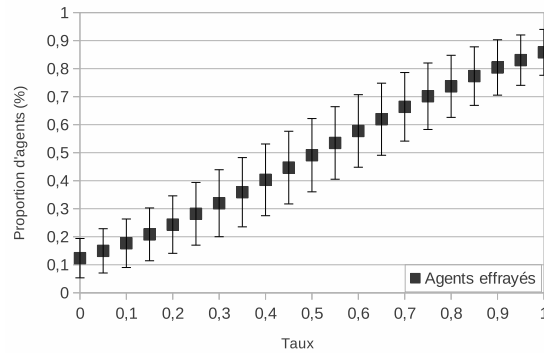


Figure 11. Proportion stabilisée d'agents effrayés en fonction de la proportion initiale.

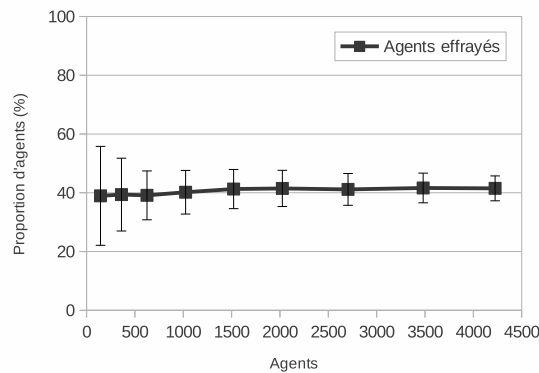
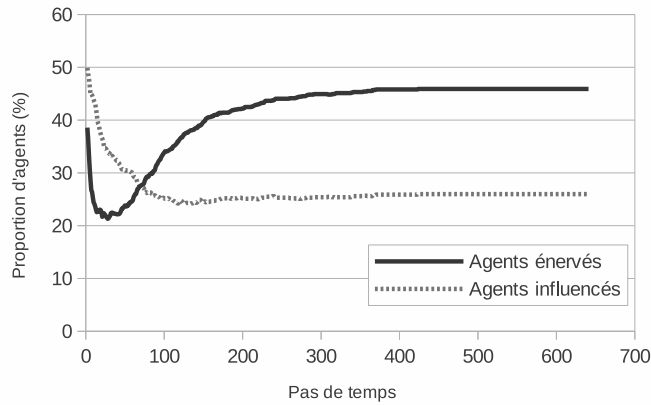


Figure 12. Proportion stabilisée d'agents effrayés en fonction du nombre d'agents.

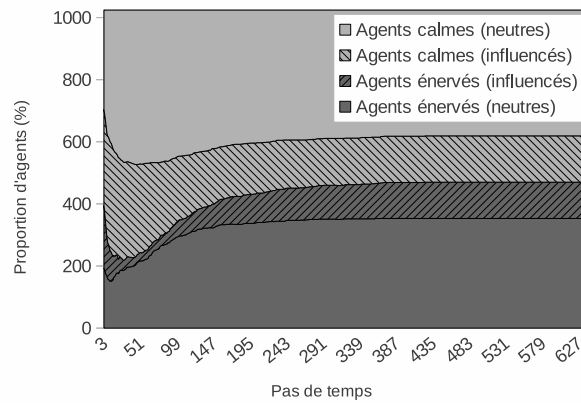
bre d'agents augmente. Ainsi, l'écart-type important trouvé dans l'expérimentation précédente (figure 11) est aussi expliqué par la taille de la foule.

Finalement, nous évaluons l'évolution du phénomène au cours du temps. En figure 13 (a), nous étudions la proportion d'agents effrayés (courbe claire) et la proportion d'agents influencés (courbe foncée) en fonction du temps pour 1025 agents. Un agent est considéré *influencé* si le signe de sa valeur d'énerverment est contraire à celui de son niveau émotionnel de base. La proportion d'agents influencés décroît rapidement pendant les 100 premiers pas, puis atteint lentement son équilibre. La courbe correspondant à la proportion d'agents effrayés contient deux parties. La première est

une forte décroissance lors des 15 premiers pas de temps, puis la seconde est une croissance vers l'état d'équilibre du système.



(a) Agent effrayés et influencés



(b) Agents neutres et influencés par catégorie

Figure 13. Évolution des agents en fonction du temps (secondes).

Pour expliquer ce résultat, nous avons besoin de plus d'information sur la composition de la foule. La figure 13 (b) décompose les proportions en agents positivement et négativement influencés, ainsi que les agents "naturellement" effrayés ou calmes, *i.e.* les agents qui ne sont pas influencés. Dans la première partie des courbes, le

mécanisme de contagion émotionnelle tend à créer des noyaux de groupes avec les agents initialement éparpillés. A ce moment, les groupes d'agents calmes s'étendent, du fait de la proportion initiale (60% d'agents calmes). Puis, les courbes tendent vers un équilibre en stabilisant les frontières des groupes. La présence d'agents influencés dans les proportions stabilisées montre que, sans événement externe (ou pro-actif), les groupes sont stables au cours du temps.

Ces expérimentations montrent que lorsque l'on augmente l'échelle de la simulation, le mécanisme reste cohérent et stable, aussi bien en situation normale qu'après des événements modifiant les facteurs émotionnels.

5.2. Calibration

5.2.1. Force de la propagation émotionnelle

De façon à calibrer α_e et β , *i.e.* la force des influences internes et externes, nous étudions l'impact de la variation de β . Nous avons choisi d'étudier β car α ne modifie pas le résultat final moyen. La figure 14 montre la proportion d'agents influencés en fonction de β , pour une proportion initiale de 40%. Il n'y a pas de contagion émotionnelle pour $\beta = 0$, puisque cela implique une influence externe générale de 0. Ensuite, pour $\beta < 1$, la proportion stabilisée d'agents influencés augmente rapidement, puis le rythme de cette croissance diminue pour $\beta > 1$.

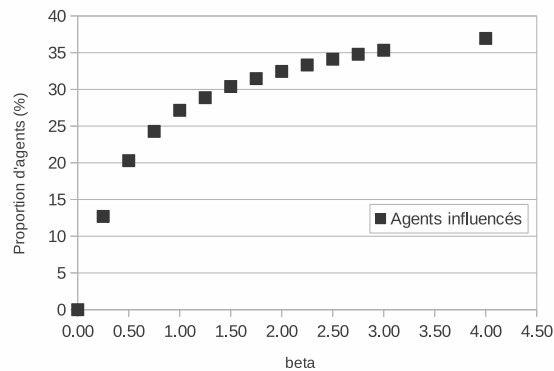


Figure 14. Proportion stabilisée d'agents influencés en fonction de β

La calibration du paramètre β dépend donc de la situation simulée. N'importe quelle valeur supérieure à 0.25 permet la création de groupes. Une foule composée de petits groupes et de beaucoup d'individualités est obtenu avec $\beta \in [0.25, 0.75]$, tandis que des groupes plus grands (proportionnellement à la situation initiale, comme indiqué dans la figure 11) seront formés pour $\beta \geq 1$.

5.2.2. Distance maximum de propagation

Nous nous tournons maintenant vers l'évaluation expérimentale de l'impact de la distance maximale de perception τ . La figure 15 et la figure 15 montrent la proportion d'agents influencés en fonction de β , pour une proportion initiale de 40%. Le motif général est similaire à l'expérimentation précédente, bien que la proportion augmente plus rapidement dans la première partie de la courbe, et plus modérément dans la seconde.

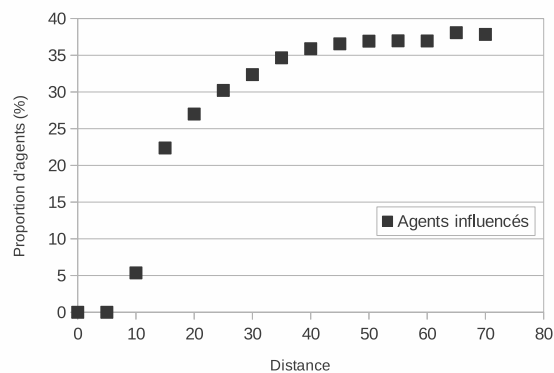


Figure 15. Proportion stabilisée d'agents effrayés en fonction de τ

Pour $\tau \leq 5$, il n'y a pas de contagion, puisque très peu d'agents se trouvent à cette distance de perception. Toute valeur de τ supérieure à 15 permet la formation de groupes de taille moyenne, et au dessus de 40 elle ne modifie que marginalement le nombre d'agents influencés.

Toute valeur supérieure à 15 entraîne la création de groupes de tailles moyennes. Comme pour β , le nombre d'étapes nécessaires pour obtenir une situation stable augmente pour $\tau \geq 65$.

6. Efficacité de l'utilisation de l'environnement

Dans cette partie, nous comparons le coût en temps de calcul de notre architecture utilisant l'environnement, en comparaison de calculs gérés par les agents. Pour cela, nous avons implémenté un simulateur en C++, permettant de mieux contrôler l'environnement d'exécution qu'en Java⁴.

4. En particulier, l'impossibilité de s'assurer du déclenchement du ramasse-miettes peut générer des erreurs lors de comparaisons de temps d'exécution.

Nous comparons la solution présentée dans cet article avec une solution purement agent, c'est à dire une solution où les dynamiques internes et externes sont calculées au sein de l'agent. Dans le cas agent, de façon à éviter une diffusion systématique de l'ensemble des informations à tous les agents, l'environnement distribue aux agents l'état des autres agents situés dans leur distance de perception. Nous assimilons la distance de perception à la distance de propagation τ , *i.e.* le minimum pour mettre en œuvre les dynamiques émotionnelles. Les agents utilisent ensuite ces informations pour mettre à jour leurs émotions selon la même formule de contagion émotionnelle.

L'initialisation des paramètres de simulation est la même que pour les séries précédentes. Une simulation termine lorsque l'état émotionnel de tous les agents est stable. Chaque simulation est exécutée 100 fois. Les mêmes graines de génération pseudo-aléatoire sont utilisées pour initialiser les deux simulations (calcul par l'environnement et calcul par les agents) de façon à vérifier la comparabilité des situations.

Nous comparons le temps d'exécution des simulations dans les deux modalités, en fonction du nombre d'agents et en fonction de la distance de perception.

6.1. Nombre d'agents

La figure 16 montre les temps d'exécution pour un nombre d'agents variant de 25 à 1521. Le temps de calcul est toujours plus faible en utilisant l'environnement qu'en passant par les agents. En valeur, le gain augmente avec la taille de la simulation (de 36 ms pour 144 agents à 503 ms pour 1521 agents), mais la part de ce coût est faible par rapport à la surcharge apportée par le nombre d'agents quelle que soit la méthode de contagion émotionnelle utilisée. Ainsi, en proportion, le gain de temps lié à l'utilisation de l'environnement va de 52% pour 144 agents à 11% pour 1521 agents.

Ceci s'explique par le fait que les agents ont une distance de perception égale quelle que soit la taille du système. Autrement dit, quel que soit le nombre d'agents, chaque agent perçoit le même nombre de voisins. Ainsi, le surcoût du calcul par les agents par rapport au calcul par l'environnement est linéaire en fonction du nombre d'agents n , tandis que le coût global de la simulation est en n^2 du fait de la recherche des voisins, qui est réalisée dans les deux cas.

6.2. Distance de perception

Nous nous intéressons ensuite à l'effet de la distance de perception sur le temps d'exécution. Les résultats sont résumés en figure 17. La figure 17(a) montre deux tendances: jusqu'à 50, le temps d'exécution baisse, puis il augmente fortement pour τ égal à 60.

La forme générale des courbes correspond au mécanisme lui-même: au début, plus τ augmente, plus la simulation se stabilise vite car au lieu d'effectuer le calcul de proche en proche, les agents prennent immédiatement en compte un plus grand nombre de leurs voisins. Cet effet a également un impact sur les proportions finales

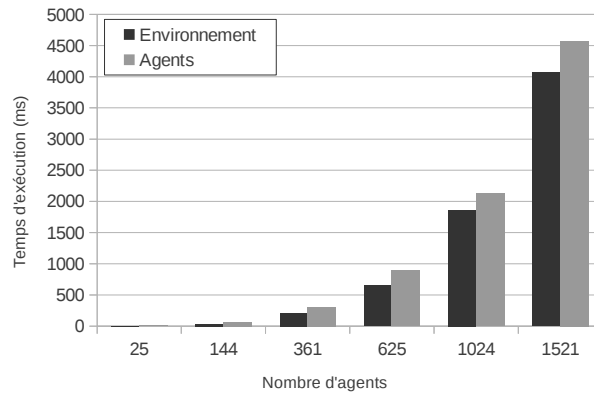


Figure 16. Temps de calcul en fonction du nombre d'agents

d'agents influencés, comme nous avons vu en section précédente (calibration de τ). Une fois dépassée un seuil, ici 50, le temps d'exécution augmente fortement. Ceci s'explique par une plus grande difficulté de stabilisation lorsque chaque agent est influencé par un grand nombre d'autres agents (environ 25 agents pour $\tau = 50$), eux même soumis à d'autres influences.

Du fait de la forme de la courbe qui la rend peu lisible pour la comparaison, nous avons généré une seconde figure (17(b)) avec des résultats normalisés (100% est le temps d'exécution de la plus longue des simulations).

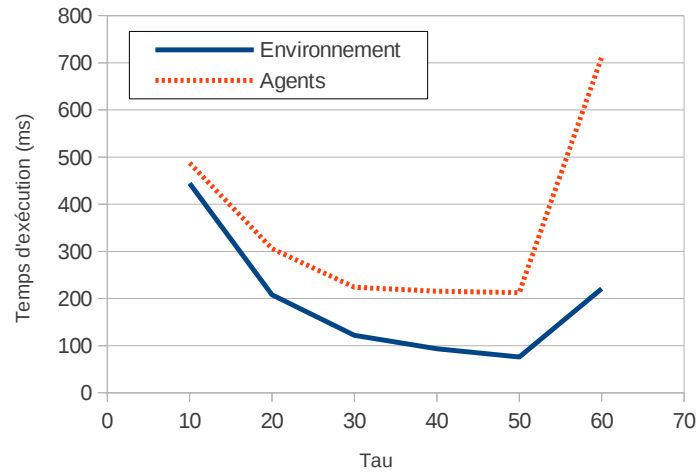
Concernant la comparaison entre le calcul par l'environnement et le calcul par les agents, on observe que plus τ augmente, plus il est intéressant de faire réaliser les calculs par l'environnement. De façon prévisible, le temps de calcul est directement lié à la taille des informations passées et calculées dans les agents.

Comme pour les expérimentations sur le nombre d'agents, il est dans tous les cas plus intéressant de faire réaliser les calculs par l'environnement. Le gain va de 8.5% pour $\tau = 10$ à 69% pour $\tau = 60$.

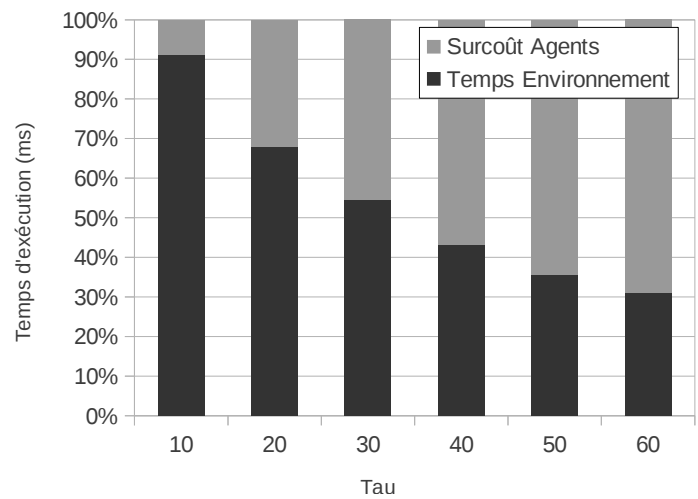
7. Discussion et conclusion

Dans cet article, nous avons proposé de calculer les dynamiques émotionnelles au sein d'une architecture multi-agents. Ce mécanisme est fondé sur trois dynamiques: événementielle, temporelle et externe. Les événements impactent les émotions en fonction de l'état interne de l'agent et de sa perception de l'événement. La dynamique temporelle représente le phénomène de stabilisation des émotions au fil du temps. La dynamique externe est la contagion émotionnelle entre agents.

Le calcul d'une partie de l'état interne de l'agent en fonction de son équivalent dans l'état interne d'autres agents a été utilisé dans d'autres simulations sociales à base



(a) Temps de calcul



(b) Coût du calcul par l'environnement et surcoût du calcul par les agents, normalisé

Figure 17. Temps de calcul en fonction de τ

d'agents réactifs, voir par exemple le modèle satisfaction/altruisme (?, ?) dans lequel la propagation de l'état des agents permet d'améliorer la coopération et la résolution de conflits entre agents.

Concernant l'architecture MA/SDEC, en comparaison avec un calcul au sein de chaque agent, notre modélisation d'agent incarné grâce à l'environnement offre deux avantages: tout d'abord, l'architecture d'agent est ainsi focalisée sur les décisions de

haut niveau, tandis que l'environnement prend une part de la complexité de l'agent qui concerne les mécanismes de bas niveau. Ensuite, en ce qui concerne les coûts de calcul, encapsuler ce service dans l'environnement n'augmente pas la charge globale. Elle permet au contraire de mutualiser une partie des calculs, au lieu de refaire le calcul dans chaque agent.

Nos simulations ont montré un gain en temps d'exécution modéré à important (suivant les paramètres et la taille du SMA) de l'approche via l'environnement en comparaison avec l'approche purement agent. Cependant, utiliser l'environnement peut créer un goulot d'étranglement si l'environnement n'est pas lui-même distribué. Il est important de noter que le fait de déléguer une partie du calcul à l'environnement (considéré en tant qu'abstraction architecturale) n'implique pas nécessairement une centralisation à l'exécution. Dans le cas de la simulation d'un espace physique, celui-ci peut être subdivisé en espaces distribués sur plusieurs hôtes, la synchronisation étant facilitée par l'introduction d'une distance de perception.

Les corps des agents peuvent être contrôlés par l'environnement, dont les services sont généralement matérialisés en tant que services de la plate-forme SMA. Cependant, certains auteurs proposent de créer des corps logiciels qui ne font pas partie de l'environnement, par exemple dans (? , ?) pour contrôler l'animation d'agents conversationnels. Un tel composant pourrait être utilisé pour gérer la dynamique temporelle des émotions, servir d'interface avec le mécanisme de contagion émotionnelle et de mécanisme de contrôle des variations émotionnelles.

L'architecture MA/SDEC ne s'appuie pas sur une représentation particulière des émotions et de la personnalité. Nous proposons des fonctions pour la dynamique des émotions, mais celles-ci peuvent être remplacées pour reproduire des situations particulières, par exemple des groupes dont on connaît la topologie sociale. Ainsi, n'importe quel modèle de contagion émotionnelle, comme (? , ?), peut être utilisé pour gérer la dynamique externe.

L'utilisation de la proximité physique a été proposée dans (? , ?), mais la formule proposée par les auteurs diffère de deux façons: l'utilisation d'une diminution exponentielle de la force du canal (au lieu de linéaire), et l'incorporation du seuil τ directement dans la formule. En ce qui concerne la force du canal, une diminution linéaire crée une tendance limitée à niveler les émotions. Cependant, cela permet également de prendre en compte l'ambiance collective en aplanissant le poids des influences des agents à l'intérieur de la distance de perception. Concernant la distance de perception, calculer l'influence de tous les autres agents du système (quand aucun sous-groupe n'existe) est coûteux en terme de temps de calcul. De plus, ce n'est pas nécessaire puisque tous les agents en dehors du champ de perception ont une influence négligeable. En conséquence, exclure ces agents du calcul de la contagion émotionnelle permet de réduire la complexité de calcul. Un travail similaire a été réalisé dans la modélisation des piétons: le modèle de forces sociales (? , ?) utilise des forces répulsives et attractives pour diriger l'agent dans un espace bidimensionnel, et il a été montré dans (? , ?) que la distance de perception pouvait être limitée à 9 mètres sans influence notable sur le résultat des simulations.

Notre spécification de la force de la relation entre deux agents en tant que distance physique permet l'émergence de groupes sans connaissance préalable de la topologie sociale, mais elle pourrait être affinée. Une perspective serait d'adjoindre un poids à la distance pour prendre en compte les petits groupes (par exemple les familles) qui font partie de la foule au sein de foules non organisées pour étudier l'influence de petits groupes dans une foule. Cependant, nous pouvons noter que notre formule est adéquate pour toute situation où il est possible de quantifier une distance sociale entre les agents.

Il serait aussi intéressant d'étudier l'utilisation de la proximité psychologique dans le cas où des relations sociales sont connues entre certains agents. Dans ce cas, proximité spatiale et proximité psychologique influencent la contagion émotionnelle entre agents, et il serait donc intéressant d'étudier comment un phénomène compense ou majore l'autre. Dans certains cas, on peut imaginer que les dynamiques de groupes seront accélérées du fait d'une proximité psychologique pré-existante. Une question ouverte est la façon de modéliser ces effets: est-ce la rapidité de synchronisation qui est modifiée, autrement dit un changement de la boucle d'hystérésis, ou est-ce l'équilibre final, et donc le calcul de la force de la contagion émotionnelle?

Nous avons réalisé des expérimentations pour valider et étudier les propriétés de notre modèle, qui ont montré la cohérence de notre mécanisme de propagation des émotions par rapport aux données qualitatives et quantitatives trouvées dans la littérature. En particulier, nous notons l'émergence de groupes stables grâce au mécanisme de contagion. Nous avons également trouvé des indications de calibration du modèle pour équilibrer les influences internes et externes.

Dans le futur, nous souhaitons étendre l'étude de sensibilité à d'autres paramètres du modèle, tels que la réceptivité de l'agent δ_R et l'émotion de base e_{base} , qui étaient simplifiés dans cet article. Par ailleurs, de nombreux travaux ont montré l'impact de l'émotion et de la contagion émotionnelle sur l'efficacité du travail de groupe, la régulation de la rationalité face à un environnement dynamique ou la stabilisation sociale. L'intégration de notre mécanisme au sein de systèmes confrontés à ce type de tâche pourrait alors permettre de se rapprocher des modes de résolution humains.

Enfin, l'approche à base d'agents incarnés, dans lesquels la relation entre esprit, corps et environnement sont strictement formalisés doit permettre de faciliter la modélisation de processus proches de l'humain. Notamment, retirer du module de contrôle (l'esprit ou agent autonome) une partie des calculs de plus bas niveau, tels que la contagion émotionnelle ou la couche physique doit permettre de simplifier sa conception. Une perspective serait alors de proposer une méthodologie permettant l'application de ce principe pour tous les cas où les agents sont situés et peuvent donc interagir avec un environnement.

References

- Barsade S. (2002). The ripple effect: Emotional contagion and its influence on group behavior. *Administrative Science Quarterly*, pp. 644–675.

- Bisognin L., Pesty S. (2004). Emotions et Systèmes Multi-Agents : Une Architecture d'Agent Emotionnel. In O. Boissier, Z. Guessoum (Eds.), *Journées Francophones sur les systèmes Multi-Agents*. Paris, Hermes.
- Bosse T., de Lange F. P. J. (2008). Estimating emotion regulation capabilities. In *Proceedings of the 1st international conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments*, pp. 93:1–93:8. New York, NY, USA, ACM. Retrieved from <http://doi.acm.org/10.1145/1389586.1389691>
- Bosse T., Duell R., Memon Z., Treur J., Van Der Wal C. (2009). A multi-agent model for mutual absorption of emotions. In *Proceedings of the 23rd European Conference on Modelling and Simulation, ECMS*, pp. 212–218.
- Bosse T., Hoogendoorn M., Klein M., Treur J., van der Wal C. (2011). Agent-based analysis of patterns in crowd behaviour involving contagion of mental states. *Modern Approaches in Applied Intelligence*, pp. 566–577.
- Bourgois L., Saunier J., Auberlet J. (2012). Towards contextual goal-oriented perception for pedestrian simulation. In *Proceedings of the 4th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, pp. 197–202. SCITEPRESS Digital Library.
- Castelfranchi C., Falcone R. (2003). From automaticity to autonomy: The frontier of artificial agents 1. In H. Hexmoor, C. Castelfranchi, R. Falcone, G. Weiss (Eds.), *Agent Autonomy*, Vol. 7, p. 103-136. Springer US.
- Czaplicka A., Chmiel A., Hołyst J. A. (2010). Emotional agents at the square lattice. *ACTA PHYSICA POLONICA A*, Vol. 117, pp. 688-694.
- de Rosis F., Castelfranchi C., Goldie P., Carofiglio V. (2011). Cognitive evaluations and intuitive appraisals: Can emotion models handle them both? In *Emotion-oriented systems*, pp. 459–481. Springer.
- de Rosis F., Cavalluzzi A., Mazzotta I., Novelli N. (2005). Can Embodied Conversational Agents Induce Empathy In Users? In *Proceedings of AISB'05 Virtual Social Characters Symposium*.
- Dugdale J., Pavard J., Soubie B. (2000). A pragmatic development of a computer simulation of an emergency call center. In *Designing Cooperative Systems: The Use of Theories and Models*, p. 241-256. IOS Press.
- García-Rojas A., Gutiérrez M., Thalmann D. (2008). Simulation of individual spontaneous reactive behavior. In *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, pp. 143–150. Richland, SC, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- Gratch J., Marsella S. (2004). A domain-independent framework for modeling emotion. *Cognitive Systems Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 269 - 306.
- Gutknecht O., Ferber J. (2000, June). MadKit: A generic multi-agent platform. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Autonomous Agents*, pp. 78–79. Barcelona, Catalonia, Spain, ACM Press.
- Hatfield E., Cacioppo J., Rapson R. (1994). *Emotional contagion*. New York, NY, US, Cambridge University Press.
- Helbing D., Molnar P. (1995, May). Social force model for pedestrian dynamics. *Phys. Rev. E*, Vol. 51, pp. 4282–4286.

- Hoogendoorn M., Treur J., van der Wal C., Van Wissen A. (2011). Agent-based modelling of the emergence of collective states based on contagion of individual states in groups. *Transactions on computational collective intelligence III*, pp. 152–179.
- Imbert R., De Antonio A. (2005). Agents that combine emotions and rationality: a context independent cognitive architecture. *WSEAS Transactions on Computers*, Vol. 4, No. 9, pp. 1202–1209.
- Jiang H., Vidal J. M., Huhns M. N. (2007). Ebdi: an architecture for emotional agents. In *Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pp. 11:1–11:3. New York, NY, USA, ACM.
- Jones H., Saunier J., Lourdeaux D. (2011). Fuzzy rules for events perception and emotions in an agent architecture. In *Proceedings of the European Society for Fuzzy Logic And Technology, EUSFLAT 2011*, p. 657 - 664. Atlantis Press.
- Krasnoselskii M., Pokrovskii A. (1989). *Systems with Hysteresis*. Springer-Verlag.
- Le Bon G. (1896). *The crowd: A study of the popular mind*. New York: The Macmillan Co.
- Lhomme M., Lourdeaux D., Barthès J.-P. (2011). Never alone in the crowd: A microscopic crowd model based on emotional contagion. In *Proceedings of Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT), 2011 IEEE/WIC/ACM International Conference on*, Vol. 2, p. 89 -92. IEEE Press.
- Lucidarme P., Simonin O., Liégeois A. (2002). Implementation and evaluation of a satisfaction/altruism based architecture for multi-robot systems. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'02*, Vol. 1, pp. 1007–1012. IEEE Press.
- Platon E., Sabouret N., Honiden S. (2007). Tag interactions in multiagent systems: Environment support. In *Proceedings of Environment for Multi-Agent Systems, Workshop held at the Fifth Joint Conference in Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 4389, pp. 106–123. Springer Verlag.
- Schoenewolf G. (1990). Emotional contagion: Behavioral induction in individuals and groups. *Modern Psychoanalysis*, Vol. 15, No. 1, pp. 49–61.
- Silverman B. G., Johns M., Cornwell J., O'Brien K. (2006). Human behavior models for agents in simulators and games: Part i: Enabling science with pmfserv. *Presence*, Vol. 15, No. 2, pp. 139 – 162.
- Thiebaut M., Marsella S., Marshall A., Kallmann M. (2008). Smartbody: Behavior realization for embodied conversational agents. In *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems-Volume 1* , pp. 151–158. Richland, SC, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- Tsai J., Bowring E., Marsella S., Tambe M. (2011). Empirical evaluation of computational emotional contagion models. In *Proceedings of the 10th international conference on Intelligent Virtual Agents*, pp. 384–397. Springer-Verlag.
- Van Minh L., Adam C., Canal R., Gaudou B., Tuong Vinh H., Taillandier P. (2012). Simulation of the emotion dynamics in a group of agents in an evacuation situation. *Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, pp. 604–619.
- Weyns D., Omicini A., Odell J. (2007, February). Environment as a first-class abstraction in multi-agent systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 5–30. (Special Issue on Environments for Multi-agent Systems)