

De l'intérêt de la cognition incarnée pour les agents logiciels

Julien Saunier
julien.saunier@insa-rouen.fr

LITIS, INSA de Rouen,
Avenue de l'Université - BP8, 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray Cedex - France

Résumé

Alors que la recherche sur les systèmes multi-agent devient de plus en plus mature, la communauté se heurte aux mêmes difficultés que celles rencontrées par les roboticiens en terme de complexité de conception. Deux problèmes majeurs sont les environnements dynamiques et l'interface entre les agents et ces environnements.

Dans cet article, je propose de s'appuyer sur la théorie de la cognition incarnée pour réifier la notion de corps pour les agents logiciels, de la même façon que l'environnement a été montré comme étant une abstraction de premier ordre dans la conception de systèmes multi-agent. Je propose un ensemble de responsabilités pour le corps des agents, et montre comment une architecture de système multi-agent peut utiliser ce concept pour déléguer une partie des processus de l'agent à son corps, comment cela préserve l'autonomie des agents, et comment l'utiliser au delà des environnements physiques (réels ou simulés). J'illustre ensuite ce paradigme avec une architecture pour le calcul de la dynamique émotionnelle qui prend en compte des événements ponctuels, la dynamique temporelle et la contagion émotionnelle. Finalement, je discute les défis et questions ouvertes levées par l'adoption de cette approche dans les systèmes multi-agents.

Mots-clés : Systèmes multi-agents, agent incarné, environnement, architecture

Abstract

As the multiagent systems research becomes more mature, the autonomous agents community is now facing the same difficulty as the robotics community in terms of design complexity. Unavoidable issues are dynamic environments, and the interfaces between the agents and these environments.

In this paper, I propose to draw lessons from the embodied cognition approach to reify the concept of body for software agents, in the same way as the environment has been shown to be

a first-order abstraction in multiagent systems design. I propose a set of responsibilities for the agent body, and show how an agent architecture can use this concept to delegate a part of the agent's tasks to its body, how it ensures agent autonomy, and how it may be used beyond (virtual or real) physical environments. I illustrate this paradigm with an emotion computation architecture that takes into account punctual events, temporal dynamics and emotional contagion. Finally, I discuss open questions raised by the adoption of this approach in the MAS field.

Keywords: Multi-agent Systems, Embodied agent, Environment, Architecture

1 Introduction

Dans la dernière décennie, un certain nombre de recherches ont mis en évidence l'importance de tout ce qui est "externe" aux agents dans la conception de systèmes multi-agents. C'est en particulier le cas des travaux du groupe de travail sur les environnements multi-agents E4MAS (Environment for Multiagent Systems) [20]. Une des idées principales est de déléguer une partie des responsabilités du système multi-agent à l'environnement. Celui-ci encapsule alors un ensemble de mécanismes tels que l'observabilité et l'accessibilité aux ressources partagées. Nous pouvons par exemple citer les travaux en cours sur la notion d'*artifacts* pour la coordination des agents, les organisations et les normes [3, 27].

Ces travaux ont également souligné l'intérêt de la notion de *situation* des agents, même lorsque ceux-ci sont purement logiciels [26], et montré comment dériver des solutions intelligentes adaptatives de concepts inspirés d'environnements physiques. Par exemple, dans [36], les auteurs montrent comment distribuer des tâches à des véhicules automatisés dans un entrepôt grâce à des champs de gradient, en combinant un fonctionnement réactif et un environnement

virtuel informé bâti en surcouche de l'environnement réel. Cette approche obtient de meilleurs résultats que les assignements de tâches classiques par protocole *contract-net*, qui reposent sur une approche symbolique centrée agent.

Décharger une partie des coûts de calcul à l'environnement et le considérer comme un composant de premier ordre du système multi-agent peut être relié au concept de cognition située et incarnée [35, 38]. L'aspect situé de la cognition implique que l'interaction entre l'agent et son environnement contraint ses comportements possibles, ce qui à son tour influence ses processus cognitifs. Le second aspect, l'incarnation de la cognition, est lié à la thèse selon laquelle la cognition est autant le produit de processus corporels que du raisonnement symbolique de haut-niveau. Ainsi, la cognition située et incarnée (que nous nommerons par la suite uniquement cognition incarnée) considère que l'intelligence émerge d'un système composé de trois éléments : l'esprit, le corps, et l'environnement. Dans le domaine des systèmes multi-agents, seuls deux de ces éléments ont été étudiés de façon approfondie : l'esprit, à travers les approches classiques des agents cognitifs fondées sur le raisonnement symbolique, et l'environnement, à travers les approches réactives et les travaux liés à E4MAS.

Dans la communauté SMA, le concept de corps n'a eu jusqu'ici qu'un impact limité. Deux articles de la littérature utilisant explicitement ce concept sont le modèle ELMS [19] et les corps logiciels (*soft-bodies*) [23]. Dans ces travaux, le corps est considéré comme contrôlé par l'environnement. Il encapsule également plusieurs responsabilités dont l'observabilité et l'accessibilité de l'état public des agents, et la médiation de la perception. D'autres travaux introduisent des médiateurs entre les agents et environnements, tels que les objets d'interaction [13], les artefacts [27] et les instances environnementales du système conatif [31], qui peuvent être vus comme fonctionnellement similaires à la notion de corps.

Dans cet article, j'argue d'une part que la cognition incarnée est un paradigme approprié pour la conception de systèmes multi-agents, et d'autre part qu'il est besoin de plus de travaux sur le sujet des corps logiciels, de la même façon que cela a été fait pour l'environnement, pour définir les responsabilités de ces composants, comment ils s'interfacent avec l'esprit (agent) et l'environnement, et leurs propriétés (autonome, actif...). Cet article est donc une synthèse de tra-

voux antérieurs et un exposé de position.

Dans la section 2, je motive l'importance de la cognition incarnée et introduit deux vues de ce paradigme, forte et faible. Un exemple de processus qui peut être typiquement partagé entre corps, esprit et environnement – le calcul des émotions – est exposé en section 3. Ensuite, comme première base de discussion, je souligne en section 4 les principes d'une approche agent incarnée en termes d'architecture du système et de composants. Finalement, je discute en section 5 quelques questions ouvertes concernant l'autonomie des agents, et les problématiques opérationnelles levées par l'adoption de cette approche dans le domaine des systèmes multi-agents.

2 La cognition n'est pas (que) du calcul

Depuis la fin des années 80, la cognition incarnée, issue des domaines de la philosophie et des sciences cognitives [35], a eu une influence majeure sur l'intelligence artificielle. L'approche cognitiviste traditionnelle [16] est fondée sur une représentation symbolique du monde, et son traitement logique par des méthodes de résolution de problèmes. Elle s'appuie ainsi sur le principe du penseur désincarné : l'intelligence est une émanation de l'esprit, tandis que le corps est considéré comme une interface imprécise avec le monde, composé de capteurs et d'actionneurs vus comme un dispositif d'entrée/sortie déconnecté du processus cognitif de haut-niveau.

Bâtie à l'origine en opposition au cognitivisme, l'approche incarnée de la cognition [38] considère que l'esprit, le corps et l'environnement jouent un rôle dans le processus cognitif global. Au lieu de souligner le rôle de la manipulation de symboles et des opérations formelles, la cognition incarnée met l'accent sur le fait que les comportements intelligents émergent d'esprits situés, localisés dans un environnement, et incarnés, via l'expérience sensitive apprise. Dans cette logique, le corps influence l'esprit autant que l'esprit influence le corps, constituant un système dynamique.

Les applications pratiques de la cognition incarnée pour l'instanciation de système intelligents proviennent principalement de la robotique, une contribution majeure étant les travaux de Rodney Brooks (voir par exemple [4]). Brooks a combattu l'approche de construction de l'intel-

l'Intelligence *top-down* basée sur le raisonnement automatique, essentiellement parce que les ressources utilisées pour construire une représentation symbolique du monde, la traiter et planifier les actions d'un robot (1) sont très coûteuses en terme de ressources et (2) ne permettent pas de prendre en compte aisément les environnements changeants.

Observant que l'intelligence n'est pas la pensée (les algorithmes à base de fourmi en étant un exemple SMA bien connu), Brooks a proposé d'utiliser une approche sub-symbolique et partiellement réactive. L'intelligence émerge alors de l'interaction et des boucles de rétroaction entre l'environnement dynamique et le robot, alors même que la plupart des tâches ne sont pas traitées symboliquement [21]. Dans la même idée, les recherches actuelles en robotique s'appuient également sur les matériaux de fabrication de leurs corps, de façon à simplifier le module de contrôle. Les progrès récents en marche bipède proviennent ainsi d'une meilleure conception des membres, par l'utilisation de propriétés physiques telles que l'élasticité et l'absorption de chocs [22].

Il pourrait être contre-argumenté que puisque la communauté multi-agent s'occupe principalement d'agents purement logiciels, la cognition incarnée n'est pas pertinente pour notre domaine. Bien que la transposition directe de l'incarnation des agents ne semble pas une approche pertinente, deux arguments sont en faveur de notre intérêt : premièrement, un grand nombre de nos approches sont inspirées par les systèmes biologiques. Ainsi, fonder nos modèles sur des travaux de philosophie et de sciences cognitives ne signifie pas que ceux-ci doivent être reproduits exactement, mais ils peuvent être une source de concepts utiles, tels que les affordances [12], la cognition étendue [24] et l'énaction [33], lesquels peuvent être adaptés aux systèmes logiciels en environnements dynamiques. Deuxièmement, les agents autonomes sont désormais face à la même difficulté que les robots en terme de complexité de conception. Traçant le parallèle, nous pouvons utiliser le concept de corps logiciels pour déléguer une partie de la complexité des agents à une entité modulaire et distincte, simplifiant ainsi la conception des agents (esprits) dédiés au raisonnement symbolique et réduisant leur charge de calcul.

Il est alors nécessaire de distinguer deux approches, la cognition incarnée *forte* et la cognition incarnée *faible*, de façon similaire à l'in-

telligence artificielle forte et faible. L'argument pour une cognition incarnée forte est que puisque l'intelligence humaine est profondément incarnée, la production d'une intelligence artificielle "réelle" (ou forte) nécessite d'utiliser également une approche incarnée. L'argument pour une cognition incarnée faible est qu'inspirer nos travaux de la façon dont les humains et animaux produisent leur comportement intelligent en minimisant leur charge cognitive ouvre des voies pour concevoir de meilleurs systèmes - en termes d'adaptativité, de qualité et de robustesse. De plus, l'approche incarnée est naturellement adaptée aux besoins de la simulation, de façon à reproduire et comprendre les comportements réels.

Dans cet article, j'adopte une approche faible de la cognition incarnée. De façon à en utiliser les concepts, il faut comprendre comment mettre en oeuvre une triade agent/corps/environnement et proposer une architecture compatible. En particulier, définir le rôle et les responsabilités du corps logiciel permettrait de diffuser son utilisation. Dans la section suivante, nous illustrons comment cette approche peut être utilisée pour concevoir une architecture de calcul des émotions.

3 Illustration : calcul des émotions

La simulation de systèmes biologiques toujours plus complexes, tels que les humains ou les systèmes sociaux, est difficile notamment parce qu'ils traitent de phénomènes situés à plusieurs échelles.

Ainsi, les émotions évoluent en fonction de trois influences [7] : les événements ponctuels, la dynamique temporelle, et la contagion émotionnelle. Traditionnellement, tous les processus sont intégrés dans l'architecture de l'agent, voir par exemple [14, 17]. Si l'évaluation de l'impact des événements est nécessairement traitée par le processus interne de l'agent, il est possible de décentraliser les autres mécanismes dans le corps logiciel de l'agent et dans l'environnement.

Bien qu'il n'y ait pas de consensus sur la façon dont les émotions sont gérées dans les systèmes biologiques, de nombreux modèles computationnels ont été proposés. Dans [30], nous avons fondé notre modélisation sur la thèse selon laquelle le calcul des émotions face à la perception d'un événement est le résultat d'un processus dual intuitif et cognitif [28]. Le premier

est semi-automatique et souvent inconscient. Il représente les modifications immédiates liées à un percept émotionnel, et concerne les émotions dites primaires (telles que la joie et l'amusement). Le second est une évaluation cognitive qui dérive de la cohérence entre les croyances, buts, percepts de l'agent et ses émotions courantes, et résulte en des émotions primaires et secondaires (telles que la honte ou la fierté).

À cette évaluation de l'impact émotionnel des événements perçus, s'ajoute une composante temporelle : d'une part, les émotions d'un individu tendent vers un niveau neutre (dépendant de l'individu) si aucun événement ne se produit ; d'autre part les variations d'émotions entre deux instants successifs sont limitées.

Enfin, la contagion émotionnelle est nécessaire à l'émergence de comportements collectifs cohérents. Hatfield *et al.* [15] ont montré que la contagion émotionnelle se situe à un niveau de conscience significativement plus bas que l'empathie, grâce à des processus automatiques, *i.e.* non contrôlés. Ces processus automatiques sont à la fois perceptifs et actifs, notamment via les comportements d'imitation, qui font partie des normes sociales du dialogue.

Ces mécanismes sont typiquement candidats à une "externalisation" hors de l'agent, puisqu'ils ne sont pas contrôlés par l'esprit dans les systèmes biologiques. De façon à proposer une architecture adéquate pour la contagion émotionnelle, un système multi-agent inspiré de la cognition incarnée va reposer sur deux concepts : un environnement actif et une séparation corps/esprit. Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, l'environnement peut être en charge d'accéder et de diffuser une partie des informations sur l'état des agents [37]. Dans le contexte de la modélisation des émotions, l'environnement peut récupérer les états émotionnels des agents et prendre en charge le calcul du résultat de la contagion émotionnelle à la place des agents.

Dans la même logique, nous pouvons considérer que l'agent est composé de deux parties : son esprit et son corps [23]. L'esprit contient le processus de décision de l'agent et est autonome, tandis que le corps est influencé par l'esprit, mais contrôlé par l'environnement. Cela correspond au fonctionnement humain : bien que l'esprit puisse prendre n'importe quelle décision arbitrairement, les limites à la réalisation de ces décisions sont imposées à la fois par les capacités du corps et par les règles de l'environnement.

En pratique, cette proposition implique que les états du corps de l'agent sont observables et que leur accessibilité est gérée par l'environnement, même pour l'agent lui-même. Pour le calcul des émotions (figure 1), le résultat des perceptions d'événements (1) est la responsabilité de l'esprit, les dynamiques temporelles (2) sont gérées par le corps et la contagion émotionnelle (3) par l'environnement. C'est alors la fusion de ces trois influences qui permet de déterminer l'évolution de l'état de l'agent. Plus de détails sur cette architecture peuvent être trouvés dans [30].

Utilisation dans des processus cognitifs de haut niveau

Dans cet exemple de calcul des émotions, une forme basique de cognition incarnée est mise en oeuvre, puisqu'il est considéré que le corps a seulement deux propriétés : des dynamiques internes (déléguées par l'esprit) et des règles d'accessibilité (déléguées par l'environnement). De cette façon, nous avons montré dans [30] que cela permet (1) de proposer un modèle modulaire avec des responsabilités distinctes pour chaque composant et (2) de diminuer le temps de calcul global.

Cependant, le paradigme de la cognition incarnée [38] argue que l'ensemble du processus cognitif émerge de l'interaction entre esprit, corps et environnement. Deux exemples de processus incarnés de plus haut niveau sont la réalisation de tâche et la planification.

Dans [1], Ballard *et al.* étudient les stratégies utilisées par des humains pour reproduire des motifs de blocs colorés sous pression temporelle. Au lieu de mémoriser le motif, les sujets se réfèrent de façon répétée (à travers leur perception, détectée à l'aide d'un oculomètre) aux blocs situés dans le modèle. Cette action de perception est réalisée de façon stratégique pour obtenir des informations partielles à la volée, par exemple en vérifiant d'abord la couleur du bloc, puis ensuite sa localisation précise. De cette façon, les humains utilisent une stratégie de mémoire minimale, en utilisant l'environnement comme son meilleur modèle.

Dans [32], les auteurs utilisent un graphe d'information sensorielle pour encoder les informations de navigation d'un robot. Ce graphe est construit au fur et à mesure de l'exploration de la zone. De façon à gérer les espaces encore inexplorés, ils fournissent au robot de fausses informations sensorielles qui viennent compléter

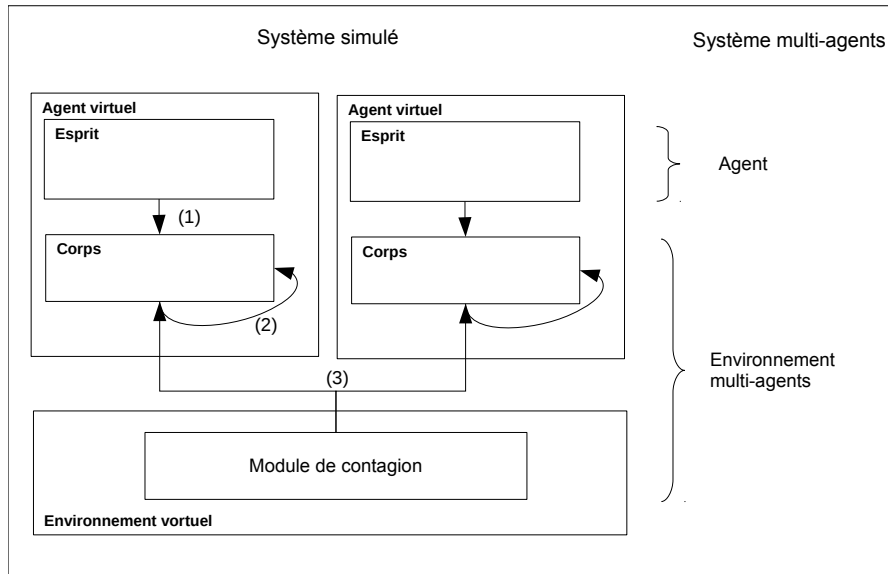


FIGURE 1 – Esprit, corps et environnement dans une architecture pour le calcul des émotions.

le graphe des endroits connus, au lieu d'utiliser une carte allocentrique. Le processus de planification est alors géré par auto-simulation au sein du graphe d'informations sensorielles, sans utiliser de traitement symbolique.

Au delà des aspects physiques

Investiguer le concept de corps implique d'également investiguer les différents types d'environnement dans lesquels l'agent interagit avec le monde. La métaphore physique est évidente, ce qui explique pourquoi c'est en premier dans le domaine de la simulation que le concept est apparu, par exemple dans [2, 30].

Cependant, l'environnement des agents n'est pas seulement physique, réel ou simulé. L'agent est également présent dans un ou plusieurs environnements sociaux, relationnels, et organisationnels. Dans chacune de ces dimensions, l'agent peut interagir avec les autres. Ceci permet d'envisager différentes utilisations du corps en fonction du type d'environnement dans lequel l'agent est plongé, voire l'utilisation de plusieurs corps, chacun étant rattaché à un environnement particulier. Dans les travaux de Soulié [31], chaque agent possède une instance dans chaque environnement auquel il participe.

Dans chacun de ces espaces, le corps de l'agent est utilisé comme une interface avec l'environnement, fournissant observabilité (ce qu'il montre), moyens d'actions (comment il influence le monde extérieur), interprétation

(comment les capteurs fournissent l'information), dynamiques (évolutions temporelles) et réactions (traitement des stimuli de bas niveau). Par exemple, dans les systèmes cyberphysiques, il est possible d'utiliser un même esprit agissant dans des univers virtuels et physiques par le biais de corps différents. De la même façon, si on considère le corps comme le moyen d'exposer des attitudes vis à vis des autres, la notion de profil public dans les réseaux sociaux peut être considérée comme l'observabilité du corps d'un agent, ou le rôle de l'agent dans une société.

4 Agents incarnés - principes

Dans cette section, je propose une première définition des responsabilités du corps, et son impact en terme d'architecture du système multi-agent. La principale difficulté provient de la place particulière du corps, dont les états et capacités dépendent à la fois de l'esprit et de l'environnement, le plaçant en interface entre les deux. Cette proposition dérive des travaux de Platon *et al.* [23] sur les *sofibodies*, des modèles ELMS [19] et MIC* [13], l'approche multi-environnementale de Soulié [31] et des modèles influence/réaction tels que [18]. Dans ces travaux, les effets des actions des agents sont calculés par l'environnement de façon à vérifier à l'exécution l'intégrité de l'environnement et à modéliser l'incertitude des résultats des actions.

Deux autres principes clés ont guidé cette pro-

position : d'une part, l'incertitude des résultats des actions nécessite des boucles de rétroaction pour que l'agent puisse contrôler et si nécessaire modifier ses futures sélections d'actions ; d'autre part le corps possède son propre ensemble de règles. Dans le modèle influence/réaction, les influences représentent le niveau microscopique, tandis que la réaction représente le niveau macroscopique. Cependant, des règles à la fois individuelles et collectives doivent être appliquées aux influences des agents, et les règles individuelles peuvent varier entre les agents, par exemple pour exprimer des capacités différentes. Ainsi, encapsuler les règles locales dans des entités locales, les corps, permet de modulariser la conception des dynamiques de l'environnement.

4.1 Responsabilités du corps logiciel

Le corps logiciel de l'agent encapsule les responsabilités suivantes :

1. **Accès aux ressources et observation de l'environnement** : le corps médie l'accès aux ressources dans l'environnement, et le processus de perception. Il fournit les moyens de définir grâce à des capteurs la perception de l'agent via des processus à la fois dirigés par l'agent lui-même (perception active) et par l'environnement (*awareness*). Il encapsule également les capacités d'action de l'agent, via ses influences.
2. **Accès et observation de l'agent** :
 - envers l'esprit, le corps permet l'introspection, autrement dit l'observation de ses états et processus par l'esprit ;
 - envers l'environnement, le corps fournit l'observabilité de l'état public de l'agent, et une interface pour prendre en compte les influences externes
3. **Dynamiques et règles propres** : le corps régule et contrôle l'ensemble des interfaces de l'esprit via un ensemble de règles – d'action, de perception et d'introspection. Il possède également un ensemble de dynamiques indépendantes ou en réaction à des influences de l'environnement ou de l'esprit.

4.2 Point de vue SMA (vue d'ensemble de l'architecture)

Intégrer l'approche incarnée nécessite de déplacer le focus de l'architecture vers une approche holistique environnement / corps / esprit. La figure 2 montre les différentes interactions entre ces trois éléments. Les agents incarnés sont premièrement situés dans un environnement, qui contient les ressources du système, les règles environnementales et les dynamiques du monde. Le corps médie l'ensemble des interactions entre agent et environnement. De plus, c'est une entité elle-même dynamique, dans le sens où elle encapsule des processus automatiques liés à l'agent, et une entité de régulation qui contient ses propres règles.

De cette façon si l'environnement et le corps sont des composants actifs, seul l'agent, qui correspond à l'esprit, est autonome, c'est à dire proactif envers ses buts.

Dans l'objectif d'améliorer la modularité, et puisque dans l'approche incarnée l'esprit n'a pas le contrôle total de son corps, la présence de rétroactions permet à l'agent de s'adapter à son corps. L'esprit est donc également impacté dans la mesure où il doit apprendre à utiliser son corps en fonction des capacités et dynamiques internes de celui-ci.

Les règles de l'environnement et celles du corps doivent être compatibles. Dans l'approche actuelle, les règles de l'environnement encapsulent à la fois des règles liées à l'individu (capacités) et des règles environnementales (telles que des règles physiques ou des normes), voir par exemple les règles de perception de [29]. Dans cette nouvelle approche, les deux types de règles sont séparées puisqu'elles sont sémantiquement et fonctionnellement distinctes.

5 Discussion et perspectives

Si cet article se focalise sur la notion de corps et, par là même, sur la décomposition architecturale du système multi-agent, c'est parce qu'il s'agit de l'élément le moins couramment utilisé et le moins normé dans la littérature, alors qu'il s'agit d'un concept primordial pour la cognition incarnée. Cependant, c'est bien du système agent - corps - environnement qu'émerge le processus cognitif global, composé des dynamiques propres de chacun de ses éléments et de leurs interactions.

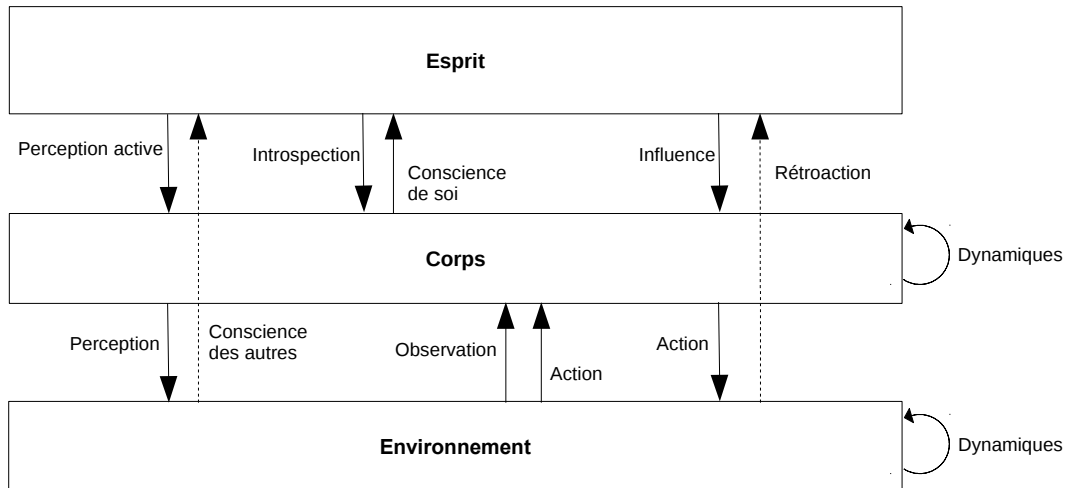


FIGURE 2 – Interactions esprit - corps - environnement.

Statut du corps de l'agent

Introduire la notion de corps pour les agents et la conception de systèmes multi-agents pose la question de leur statut. Bien que l'entité virtuelle précédemment nommée agent contienne conceptuellement à la fois un corps et un esprit, par exemple dans le cas de la simulation, la conception logicielle pratique de ce concept peut se matérialiser de trois façons : le corps peut être autonome, contrôlé par l'agent ou contrôlé par l'environnement.

Bien que toutes ces solutions soient meilleures en termes de modularité et de complexité que d'intégrer tous les processus dans les agents, une approche mixte qui corresponde aux principes conceptuels de la cognition incarnée telle qu'exposée dans les sections précédentes est la plus cohérente : le corps n'est pas autonome, mais influencé par l'esprit et régulé par l'environnement.

Les corps des agents peuvent être contrôlés par l'environnement, dont les services sont généralement matérialisés dans la plateforme multi-agent. Certains auteurs proposent cependant de créer des corps logiciels qui ne font pas partie de l'environnement, par exemple dans [34] pour gérer l'animation d'agents conversationnels. L'idée d'utiliser l'esprit pour générer les décisions de haut niveau et déléguer l'implémentation de ces décisions au corps est effectivement au coeur de l'approche incarnée computationnelle.

Problèmes opérationnels

Directement liées au statut du corps sont les problématiques de mise en oeuvre de l'approche. Notons premièrement que l'environnement et les corps des agents sont des composants fonctionnels. Ainsi, une centralisation fonctionnelle du contrôle du corps par l'environnement ne signifie pas nécessairement que l'environnement lui-même est centralisé.

La communauté des agents virtuels a monopolisé l'usage du terme d'agent incarné. Dans ce domaine, cela signifie que l'agent a une représentation visuelle qui est utilisée en tant qu'interface avec l'utilisateur. Cependant, cette représentation visuelle n'est pas nécessairement modélisée en tant que composant distinct de l'agent. Ainsi, il faut distinguer deux types d'incarnation : représentative ou conceptuelle. L'agent peut alors ne pas avoir d'incarnation, n'en avoir qu'une ou les deux. Par exemple, comme nous l'avons mentionné précédemment, certaines recherches proposent l'utilisation d'un corps logiciel [34] pour contrôler l'animation d'agents conversationnels et ainsi décharger une partie des processus décisionnels de l'agent. Dans ce cas, bien que l'utilisation du corps soit principalement utilisée pour décharger la partie motrice et non sensorielle de la cognition, les deux types d'incarnation, conceptuelle et représentative, sont utilisées.

Il n'existe à notre connaissance pas de modèle générique de corps pour les agents logiciels. Cependant, un certain nombre de sources d'inspi-

ration peut être trouvée, notamment dans la littérature sur les environnements multi-agents.

Platon et al. [23] ont introduit le concept d'*oversensing* : les agents ont des corps logiciels, possédant leurs états publics, qui sont médiés à la fois en terme d'accessibilité et d'observabilité par l'environnement. L'information sur les modifications de ces états est diffusée automatiquement par l'environnement aux autres agents, de façon à gérer la notion de conscience des autres. Cependant, dans ce cas, le modèle est conçu pour l'observabilité et la perception et non l'action. Soulié [31] propose des délégations d'actions et de perceptions dans un cadre multi-environnement, ainsi que la capacité de traduire les percepts de bas-niveau en concepts utilisables par le système conatif. Le modèle ELMS [19] propose de considérer le corps de l'agent comme encapsulant les aspects physiques de l'agent : ce modèle ajoute des capacités d'action et des contraintes de perception au rôle d'observabilité externe.

Les artifacts [27] peuvent être une façon d'implémenter des agents incarnée, en programmant le corps et les responsabilités des agents en tant que réactions et dynamiques. Dans ce cas, les corps seraient des artifacts particuliers, puisque nécessairement liés à un agent. MIC* [13] définit les objets d'interaction comme des moyens d'interaction avec les autres agents et l'environnement tout en préservant l'autonomie de l'agent. Les institutions électroniques [8] conjuguent souvent règles sociales et contrôle local. Ces lois locales (voir par exemple [39]) peuvent être assimilées à la fonction de régulation des corps logiciels, et mis en oeuvre par leur biais dans une plateforme multi-agent.

Ces travaux fournissent des éléments de réflexion pour la modélisation d'agents situés et incarnés interagissant avec leur environnement. Cependant, ils ne considèrent pas l'interface entre esprit et agent avec la même acuité. Comme nous l'avons mentionné auparavant, le corps joue également un rôle dans le processus cognitif de l'agent, en fournissant des rétroactions, de l'introspection, et des capacités de conscience de soi. De plus, tout comme dans les systèmes biologiques, le corps peut encapsuler des capacités de traduction, c'est à dire des moyens de fonder les symboles manipulés par les processus de haut niveau sur des expériences sensorimotrices à partir de l'expérience des agents. Pour modéliser ce processus, des travaux tels que [6, 31] proposent d'inclure une couche entre la "réalité" et l'esprit qui contient

le modèle conceptuel du monde, filtrant ainsi les percepts en une information sémantique grâce à une ontologie.

Remarquons que le corps et l'environnement doivent être séparés : ils fournissent des services distincts, principalement différenciés par le niveau auquel ils sont appliqués. Les responsabilités du corps sont dédiées à l'esprit (agent) auquel il est rattaché, tandis que l'environnement gère les interactions sociales et ressources externes.

Autonomie de l'agent

Concernant l'autonomie des agents, plusieurs travaux [18, 2, 30] ont montré que séparer l'esprit et le corps des agents permet d'assurer que l'agent n'est pas vulnérable à l'environnement et aux autres agents. En considérant l'autonomie comme l'intégrité interne de l'agent [13], i.e. "*une contrainte de programmation qui définit l'agent comme un système délimité comprenant une structure et des dynamiques internes qui ne sont ni contrôlables ni observables directement par une entité externe*", le corps est un concept approprié pour assurer l'autonomie de l'esprit. Il encapsule les mécanismes d'action et de perception, créant ainsi un espace tampon observable et accessible sans modifier l'état des agents eux-mêmes.

Changement de conception

La cognition incarnée est une approche holistique de l'intelligence. Ainsi, un changement de conception est nécessaire pour son intégration dans nos pratiques. Inspiré de l'expérience de la robotique, les objectifs principaux sont (1) de réduire la dépendance à l'approche symbolique à ce pour quoi elle est vraiment utile, par exemple la cognition 'hors-ligne' (telle que l'utilisation de la mémoire ou la planification de long-terme déconnectée des mécanismes sensorimoteurs), en se fondant plutôt sur des solutions adaptatives rapides liées au caractère situé du processus cognitif, (2) d'améliorer la modularité et de réduire la complexité de conception en séparant conceptuellement les responsabilités de chaque partie de la cognition, et (3) de trouver de nouvelles inspirations dans les systèmes biologiques.

Ce dernier point est un défi important. La psychologie du développement de Piaget (exposée par exemple dans [9]) souligne l'importance des

automatisme acquis dans le comportement intelligent des adultes. Les circuits sensorimoteurs, profondément ancrés dans les processus cognitifs matures, permettent de décharger l'esprit d'une partie de ses tâches. Dans les systèmes multi-agents, ceci implique que les boucles de rétroactions devraient être utilisées par l'agent pour acquérir une maîtrise de son corps, *i.e.* des motifs de bonne utilisation de ses capacités dans l'exécution de ses tâches. Une proposition à ce sujet est celle de Ribeiro *et al.* [25]. Les auteurs proposent d'utiliser des modules pour émuler la composition de processus entre capteurs et actionneurs, sans *a priori* sur le niveau de cognition concerné (esprit ou corps).

L'objectif de cet article n'est pas d'opposer l'intelligence artificielle symbolique et l'intelligence artificielle incarnée. L'intelligence artificielle symbolique a prouvé son utilité pour la conception de nombreux systèmes intelligents [11]. La difficulté principale dans la prise en compte effective de l'approche située et incarnée n'est pas de concevoir des systèmes réactifs efficaces (tels que les algorithmes à base de fourmis ou les véhicules automatiques), ni de concevoir des intelligence artificielles puissantes (tels que Deep Blue [5]). C'est de concevoir des solutions flexibles à des problèmes de haut niveau, adaptatifs aux changements de l'environnement (nécessitant donc des processus permettant la conscience de ces changements et s'appuyant sur la perception plutôt que la mémorisation et le calcul hors-ligne) pour produire des solutions cognitives non-triviales. Il s'agit également de pouvoir concevoir un seul esprit pour plusieurs modalités de mise en oeuvre (corps), ce qui implique des esprits adaptatifs et apprenants.

L'utilisation de plusieurs corps pour un même esprit permet également de mettre en oeuvre une hétérogénéité qui n'est pas directement modélisée dans le processus de raisonnement [31, 10]. Sur ce principe, les approches évolutionnaires pourraient être mises à profit de deux façons : sélectionner les meilleurs corps pour la réalisation d'une tâche, ou calibrer les systèmes multi-agents.

Finalement, formaliser l'approche fondée sur les agents incarnés, dans laquelle les relations entre esprit, corps et environnement(s) sont formalisées permettrait de faciliter la modélisation des processus humains (ou inspirés des humains). En particulier, le choix de retirer du module de contrôle (*i.e.* retirer de l'agent) une partie des calculs de bas-niveau, tels que la conta-

gion émotionnelle ou les aspects physiques / interactionnels réactifs, permet de simplifier l'architecture des agents. Des recherches approfondies sont alors nécessaires pour mieux comprendre la façon dont les concepteurs de systèmes multi-agents peuvent appliquer ce principe à tous les cas dans lesquels les agents sont situés et interagissent avec leur environnement, quel qu'il soit, et proposer une méthodologie de conception adéquate.

Références

- [1] D. H. Ballard, M. M. Hayhoe, P. K. Pook, and R. P. Rao. Deictic codes for the embodiment of cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, 20(04) :723–742, 1997.
- [2] F. Behe, S. Galland, N. Gaud, C. Nicolle, and A. Koukam. An ontology-based metamodel for multiagent-based simulations. *International Journal on Simulation Modelling, Practice, and Theory*, 40 :64–85, Jan. 2014.
- [3] O. Boissier, R. H. Bordini, J. F. Hübner, A. Ricci, and A. Santi. Multi-agent oriented programming with jacamo. *Science of Computer Programming*, 2011.
- [4] R. A. Brooks. Intelligence without representation. *Artificial intelligence*, 47(1) :139–159, 1991.
- [5] M. Campbell, A. J. Hoane Jr, and F.-h. Hsu. Deep blue. *Artificial intelligence*, 134(1) :57–83, 2002.
- [6] P. H.-M. Chang, K.-T. Chen, Y.-H. Chien, E. Kao, and V.-W. Soo. From reality to mind : A cognitive middle layer of environment concepts for believable agents. In *Environments for Multi-Agent Systems*, pages 57–73. Springer, 2005.
- [7] A. Czaplicka, A. Chmiel, and J. A. Holyst. Emotional agents at the square lattice. *ACTA PHYSICA POLONICA A*, 117 :688–694, 2010.
- [8] M. Esteva, J. Rodriguez-Aguilar, B. Rosell, and J. Arcos. Ameli : An agent-based middleware for electronic institutions. In *Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2004)*, pages 236–243. ACM Press, 2004.
- [9] J. H. Flavell. *The developmental psychology of Jean Piaget*. D Van Nostrand, 1963.
- [10] S. Galland, N. Gaud, J. Demange, and A. Koukam. Environment model for multiagent-based simulation of 3D urban systems. In *the 7th European Workshop on Multiagent Systems (EUMAS09)*, Ayia Napa, Cyprus, dec 2009. Paper 36.
- [11] J.-G. Ganascia. Epistemology of ai revisited in the light of the philosophy of information. *Knowledge, Technology & Policy*, 23(1-2) :57–73, 2010.
- [12] J. J. Gibson. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Lawrence Erlbaum Associates, 1979.
- [13] A. Gouaïch, F. Michel, and Y. Guiraud. Mic* : a deployment environment for autonomous agents. In D. Weyns, H. V. D. Parunak, and F. Michel, editors, *Proceedings of Environment for Multi-Agent Systems, Workshop held at the third AAMAS conference*, volume 3374 of *LNAI*, pages 109–126. Springer Verlag, 2005.

- [14] J. Gratch and S. Marsella. A domain-independent framework for modeling emotion. *Cognitive Systems Research*, 5(4) :269 – 306, 2004.
- [15] E. Hatfield, J. Cacioppo, and R. Rapson. *Emotional contagion*. Cambridge Univ Pr, 1994.
- [16] J. Haugeland. *Artificial intelligence : The very idea*. The MIT Press, 1989.
- [17] M. Lhomme, D. Lourdeaux, and J.-P. Barthès. Never alone in the crowd : A microscopic crowd model based on emotional contagion. In *Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT), 2011 IEEE/WIC/ACM International Conference on*, volume 2, pages 89 –92, aug. 2011.
- [18] F. Michel. Le modèle irm4s, de l'utilisation des notions d'influence et de réaction pour la simulation de systèmes multi-agents. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 21(5-6) :757–779, 2007.
- [19] F. Y. Okuyama, R. H. Bordini, and A. C. da Rocha Costa. Elms : An environment description language for multi-agent simulation. In *Environments for Multi-Agent Systems*, pages 91–108. Springer, 2005.
- [20] H. Parunak and D. Weyns, editors. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Special issue on environments for multi-agent systems*, volume 14(1). Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers, 2007.
- [21] R. Pfeifer and J. Bongard. *How the body shapes the way we think : a new view of intelligence*. MIT press, 2007.
- [22] R. Pfeifer and A. Pitti. *La révolution de l'intelligence du corps*. Éditions Xanadu, Paris, 2012.
- [23] E. Platon, N. Sabouret, and S. Honiden. 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*, volume 4389 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 106–123. Springer Verlag, 2007.
- [24] D. Pritchard. Cognitive ability and the extended cognition thesis. *Synthese*, 175(1) :133–151, 2010.
- [25] T. Ribeiro, M. Vala, and A. Paiva. Censys : A model for distributed embodied cognition. In *Intelligent Virtual Agents*, pages 58–67. Springer, 2013.
- [26] A. Ricci, A. Omicini, M. Viroli, L. Gardelli, and E. Oliva. Cognitive stigmergy : Towards a framework based on agents and artifacts. In D. Weyns, H. V. D. Parunak, and F. Michel, editors, *Proceedings of Environment for Multi-Agent Systems, Workshop held at the fifth AAMAS conference*, volume 4389 of *LNAI*, pages 124–140. Springer Verlag, 2007.
- [27] A. Ricci, M. Piunti, M. Viroli, and A. Omicini. Environment programming in cartago. In *Multi-Agent Programming* :, pages 259–288. Springer, 2009.
- [28] F. Rosis, C. Castelfranchi, P. Goldie, and V. Carofiglio. Cognitive evaluations and intuitive appraisals : Can emotion models handle them both? *Emotion-Oriented Systems*, pages 459–481, 2011.
- [29] J. Saunier, F. Balbo, and S. Pinson. A formal model of communication and context awareness in multi-agent systems. *Journal of Logic, Language and Information*, 23(2) :219–247, 2014.
- [30] J. Saunier and H. Jones. Mixed agent/social dynamics for emotion computation. In *Proceedings of the 2014 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, pages 645–652. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2014.
- [31] J.-C. Soulié. *Vers une approche multi-environnements pour les agents*. PhD thesis, Université de la Réunion, 2001.
- [32] L. A. Stein. Imagination and situated cognition. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 6(4) :393–407, 1994.
- [33] J. Stewart, O. Gapenne, and E. A. Di Paolo. *Enaction : toward a new paradigm for cognitive science*. The MIT Press, 2010.
- [34] M. Thiebaut, S. Marsella, A. Marshall, and M. Kallmann. Smartbody : Behavior realization for embodied conversational agents. In *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems-Volume 1*, pages 151–158, 2008.
- [35] F. J. Varela, E. Rosch, and E. Thompson. *The embodied mind : Cognitive science and human experience*. MIT press, 1992.
- [36] D. Weyns, N. Boucké, and T. Holvoet. Gradient field-based task assignment in an agv transportation system. In *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 842–849. ACM, 2006.
- [37] D. Weyns, A. Omicini, and J. Odell. Environment as a first-class abstraction in multi-agent systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 14(1) :5–30, Feb. 2007. Special Issue on Environments for Multi-agent Systems.
- [38] M. Wilson. Six views of embodied cognition. *Psychonomic bulletin & review*, 9(4) :625–636, 2002.
- [39] W. Zheng, C. Serban, and N. Minsky. Establishing global properties of multi-agent systems via local laws. In D. Weyns, H. V. D. Parunak, and F. Michel, editors, *Proceedings of Environment for Multi-Agent Systems, Workshop held at the fifth AAMAS conference*, volume 4389 of *LNAI*, pages 170–183. Springer Verlag, 2007.