



**HAL**  
open science

# SYSTEMES DE SYSTEMES: AUTONOMIE ET PROACTIVITE

Alain Cardon, Mhamed Itmi

► **To cite this version:**

Alain Cardon, Mhamed Itmi. SYSTEMES DE SYSTEMES: AUTONOMIE ET PROACTIVITE. 9th International Conference on Modeling, Optimization & SIMulation, Jun 2012, Bordeaux, France. hal-00728681

**HAL Id: hal-00728681**

**<https://hal.science/hal-00728681>**

Submitted on 30 Aug 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## SYSTEMES DE SYSTEMES : AUTONOMIE ET PROACTIVITE

A. CARDON, M. ITMI

LITIS / INSA  
Avenue de l'Université. BP. 8  
76801 – St-Etienne du Rouvray Cedex - France  
Alain.Cardon@gmail.com, itmi@insa-rouen.fr

**RESUME :** *En nous intéressant aux systèmes de systèmes nous focalisons sur l'autonomie des systèmes et en donnons une nouvelle approche dont nous précisons les fondements. La notion de proactivité y joue un rôle important. Nous la clarifions en définissant la proactivité faible et la proactivité forte. Nous montrons ensuite comment par différentes organisations d'agents nous arrivons à modéliser un système autonome opérant avec production d'émergences comportementales et à en aborder le contrôle.*

**MOTS-CLES :** *autonomie, émergence, proactivité, systèmes multi-agents, systèmes de systèmes.*

### 1 INTRODUCTION

En informatique, on considère usuellement des systèmes bien structurés, formés d'éléments bien identifiés ayant des identités et des fonctions précises dont celle d'échanger de l'information, fonctions qui opèrent dans les conditions prévues de fonctionnement du système. Ces systèmes n'ont pas de notion de bord, ils sont identifiés par des noms ou des adresses et ils communiquent en échangeant des informations bien formatées que leurs composants spécialisés interprètent. Nous allons considérer l'activité d'un certain type de ces systèmes, une classe très particulière de systèmes qui ont à faire se réaliser les tâches internes de leurs nombreux composants avec l'objectif de satisfaire à des **tendances qui leur seront spécifiques**. Ces systèmes auront donc d'abord à se distinguer de leur environnement pour satisfaire à des tendances qui leur permettront cette distinction et ils auront ainsi une **tendance à l'autonomie**. Ces tendances conduiront les comportements de ces systèmes, appréciés par les autres systèmes avec lesquels ils communiqueront. Ces systèmes doivent donc gérer la coordination et superviser les activités de leurs composants internes en tenant compte des informations qui entrent et qui doivent sortir. Ces systèmes seront appelés des **systèmes ouverts soumis à des tendances**. Nous considérerons en effet qu'ils sont en communication dans les deux sens avec leur environnement, qu'ils ont à gérer les effets de ces communications, et donc que ce sont des systèmes systématiquement ouverts. Mais la notion d'autonomie (Saridis, 1985) (Varela, 1989) restera à préciser, ce que nous allons faire dans la suite.

### 2 CARACTERE D'UN SYSTEME AUTONOME

Un **système** sera considéré ici comme un ensemble d'éléments d'un certain domaine, éléments actifs selon

des fonctionnalités propres et qui interagissent entre eux en suivant des règles précises pour définir les actions du système sur l'environnement. Sa caractérisation sera donnée par ses constituants et leurs relations ainsi que par ce qui le borde et le délimite de son extérieur. Le système aura donc une **membrane artificielle** qui le limite et l'identifie.

#### 2.1 Substrat

C'est l'ensemble des composants matériels et fonctionnels d'une entité fortement proactive, comprenant par exemple des capteurs et leurs mémoires tampons permettant de saisir les valeurs numériques de commandes ou de mesures, ainsi que des fonctions qui déterminent les valeurs des fonctions des éléments et de leurs relations admissibles dans des domaines précis et utilisant par exemple des bases de données.

#### 2.2 Éléments de base du substrat

Ce sont les éléments fonctionnels de base du système et formant son substrat. Ces éléments de base sont réactifs. Ils sont éventuellement formés d'éléments matériels ou logiciels et ils sont strictement fonctionnels. Ils permettent à tout élément de base de fonctionner et de réagir dans son environnement comme il le doit, selon ce qui a été établi dans la composition du substrat. Le substrat des systèmes étudiés est formé de nombreux éléments de base, qui sont pris en considération selon une granularité dépendant du problème à traiter. Les entités fortement proactives utiliseront les éléments du substrat sans jamais être réduites à ces éléments de base et il y aura donc un niveau logiciel au-dessus de ces éléments de base.

La notion de **membrane** pour un système artificiel aura deux caractères majeurs :

1. C'est le bord qui permet la diffusion et l'entrée d'éléments informationnels avec l'environnement, en les considérant comme des éléments informationnels échan-

gés par une structure qui a une étendue, une surface et pas un simple service de courrier. On pourra donc considérer que les informations échangées peuvent modifier la surface de passage et que ces échanges seront altérateurs de la membrane qui sera sensible aux informations échangées. Cela entraîne que ces informations ne seront pas des flots binaires, mais des entités significatives, interprétables par les éléments de base du système constituant la membrane.

2. C'est la limite qui enveloppe les fonctionnalités du système lorsqu'il a achevé son développement, lorsqu'il est opérationnel. Dans le cas des systèmes vivants, la membrane n'identifie l'élément que lorsque celui-ci est viable, avec une certaine autonomie. Avant, elle est essentiellement communicante avec l'environnement de génération qui fournit tous les moyens du développement. Comme nous ne considérerons que des systèmes en état d'opérationnalité, même s'ils évoluent, la membrane artificielle d'un système informatique sera un bord établissant une discontinuité avec l'environnement par la manipulation des informations échangées, cette manipulation altérant éventuellement les éléments internes et leur organisation.

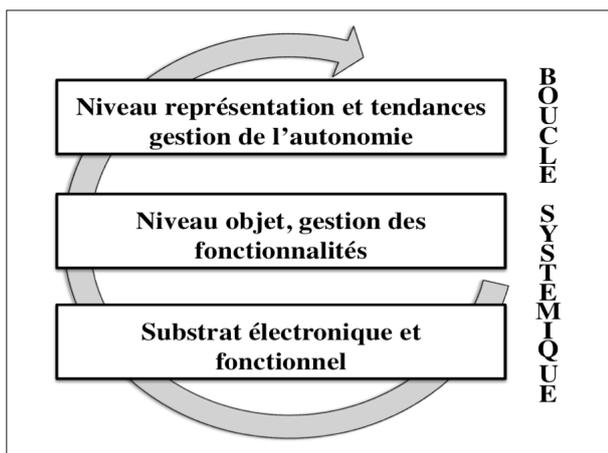


Figure 1. Les trois niveaux et la boucle systémique d'un système autonome.

La membrane d'un système artificiel n'est donc ni une IHM ni un système de messagerie, mais c'est une organisation d'éléments imprégnant, par maillage fin, toute l'organisation interne du système et assurant ses communications avec son environnement, dans les deux sens. La membrane sera donc un réseau actif liant les composants du système pour assurer l'ouverture de celui-ci. Elle sera, selon les types de systèmes considérés, permanente ou évolutive, très variable.

On considère un système informatique ouvert sur son environnement par une liaison continue à l'aide d'une membrane et qui est constitué de nombreux composants internes communiquant fortement. Une entité proactive dans ce type de système est un composant représentant l'activité de certains composants simplement fonction-

nels. C'est une entité d'un certain niveau qui peut agir de manière non simplement réactive, mais en ayant des buts propres qu'elle tente d'atteindre et qu'elle peut même réviser. Elle a ainsi une certaine autonomie et ne se contente pas de réagir aux stimuli en déclenchant automatiquement les procédures appropriées. L'entité proactive a la possibilité de se détacher de la réaction immédiate pour apprécier sa situation dans son milieu, évaluer ses choix d'actions, et en ce sens, elle a une certaine maîtrise de son temps de réponse et d'action. Elle est la réunion d'un substrat matériel ou logiciel fonctionnel sur lequel elle se fonde et d'un composant logiciel lui permettant d'évaluer ses caractères fonctionnels courants, son état, son contexte et de planifier l'action qu'elle va entreprendre. Elle est de plus évolutive, pouvant modifier ses règles d'action et ses connaissances d'appréciation de son état. Elle est donc en apprentissage continu par l'analyse des conséquences de ses actions.

Toute la question est l'étendue de l'autonomie, des domaines d'analyse et d'action de l'entité proactive, qui peuvent être réduits ou bien très grands, en allant d'un composant local du système au système dans son entier. Nous sommes donc conduits à préciser les deux bornes qui définissent la notion de proactivité, ce qui donnera à ce concept général une valeur plus précise. On définira donc deux types limites de proactivités, définissant les bornes de tout système ayant de l'autonomie :

**Proactivité faible** : on considère une entité dans le système ouvert, entité dont le comportement possible est strictement limité dans un sous-domaine du domaine où se situe le comportement du système. Cette entité peut décider de ses actions, selon ses connaissances sur son contexte. Le sous-domaine d'activité de l'entité est fermé et borné pour la connaissance générale du domaine du système. Cette entité a des caractères définis dans un domaine précis, éventuellement important mais fini, qui sont fixés dès la conception de l'entité, qui varient selon des règles fixées à la conception. Son degré d'autonomie est faible mais non nul.

**Proactivité forte** : elle concerne une entité formée de nombreuses entités, ce qui lui permet et même lui impose de modifier sa structure et la façon dont elle l'utilise, ce qui revient précisément à modifier son organisation. Pour cela elle use des communications internes entre ses éléments et des communications avec les autres entités de son environnement accessible par une membrane. Elle agit selon des tendances qui éclairent ses réorganisations et ses choix, ce qui lui permet de définir des représentations où les plans d'actions prendront forme. En ce sens, son organisation interne est dynamique et évolutive de manière non strictement déterministe, son degré d'autonomie est très grand, mais ne lui permet évidemment pas d'agir indépendamment du contexte.

### 3 REGLE DE CONCEPTION DES SYSTEMES DE SYSTEMES

#### 3.1 Systèmes de systèmes

L'existence des systèmes de systèmes (Ackoff, 1971) (Maier, 1998), notés par la suite SdS, a trouvé son sens dans le développement de grands systèmes complexes connectés et distribués. L'évolution des technologies de la communication a permis l'observation de ces systèmes dans des champs pluridisciplinaires. C'est le cas, par exemple, des robots hétérogènes et autonomes qui doivent coopérer et s'organiser en groupes dans un environnement variable. Avec une industrie et une société fortement connectées et une croissance de systèmes enfouis ou embarqués, nomades ou ubiquitaires les SdS se généralisent. Les SdS sont des systèmes distribués et hétérogènes qui posent de nombreux problèmes (Sausser et Boardman, 2006) quant à leur architecture (Shaneyfelt et al., 2008), organisation, du comportement du système global, de leur conception, coût (Deonandan et al. 2010), test (Dahmann et al., 2010), évaluation, etc. et surtout le problème de leur contrôle (Maturana et Liberman, 2010).

Du point de vue de la proactivité, un système de systèmes fortement proactif aura ce caractère fourni par l'existence dans son organisation de nombreuses entités faiblement proactives, le système étant délimité par une membrane.

#### 3.2 Tendances fondamentales

Certains systèmes naturels ou artificiels sont conçus pour qu'ils satisfassent à des besoins qui orientent leurs comportements dans la plupart des situations et ceci de manière décisive. Ces systèmes auront ainsi une certaine autonomie selon des aptitudes à la qualification par production de points de vue. Ces besoins généraux, multiples et contradictoires, seront appelés les *tendances fondamentales* du système de représentation et permettront à la fois de construire des scènes selon des points de vue, des plans d'action spécifiques et de choisir le meilleur plan d'action. Ces tendances opèrent donc au niveau de la formation de la représentation courante et elles ont une importance majeure.

#### 3.3 La relation tendance – membrane

Cette relation établit la distinction majeure entre les systèmes que nous étudions et les systèmes fonctionnels. Les systèmes fortement proactifs que nous étudions sont fait pour se comporter dans leur environnement, en s'y maintenant toujours en état de fonctionnalité et en y étant le plus adapté possible. Pour cela, ils doivent interpréter leur environnement à partir des informations qu'ils perçoivent, et mémoriser cette interprétation en sélectionnant celles qu'ils doivent considérer comme bien admissibles. Ce seront les tendances fondamentales qui opèreront ces choix sur l'organisation sélective de la membrane. On voit donc là la relation entre ce qui est très spécifique du système, c'est-à-dire ses tendances, et

ce qui en fait un système ouvert adapté à son environnement, sa membrane.

La catégorisation des systèmes fortement proactifs, leur conception et leur évolution sont des domaines très importants car c'est la voie qui permettra de réaliser des systèmes de systèmes réellement autonomes. Cela permettra aussi d'aborder l'important problème de la compréhension du développement du vivant.

#### 3.4 Emergence comportementale

Il est usuel de parler d'émergence (Cardon, 2005) dans le comportement d'un système composé de très nombreuses entités faiblement ou fortement proactives, un système qui n'est pas soumis à des règles rationnelles représentées par des équations liant des variables d'états à des variables de contrôle. Dans les cas d'un système fortement proactif, nous dirons qu'il y a *émergence comportementale* si celui-ci est doté d'une organisation d'éléments générant de façon continue des représentations et si chaque représentation permet de dégager, selon l'état du système et ses tendances fondamentales, une planification de son comportement dans l'espace et le temps.

Le point central de l'étude des systèmes autonomes sera la raison qui conduira à la définition de leurs comportements, dans toutes les situations et à chaque instant. Ce comportement n'étant pas conduit par une causalité rationnelle se ramenant à des équations ou à une suite de règles fixes prédéfinies, nous étudierons l'architecture permettant de produire des représentations et le rôle des tendances organisationnelles pour produire des actions intentionnelles. Ceci sera une nouvelle approche de l'émergence comportementale, ce qui était à faire.

### 4 MODELISATION PAR ORGANISATION D'AGENTS

Après avoir défini ce qu'est un système autonome opérant avec production d'émergences comportementales, nous proposons une modélisation à l'aide de différentes organisations d'agents. Nous commençons par donner quelques définitions sur les agents et nous détaillerons ensuite l'architecture du système.

#### 4.1 L'agentification aspectuelle

Les connaissances d'aspect et les caractères des changements organisationnels des connaissances précisés dans la définition des ontologies, vont donner lieu à une agentification aspectuelle. On passe d'une représentation de la connaissance structurelle du phénomène étudié au niveau de ses fonctionnalités, qui donne une représentation descriptive fine à partir d'objets et de relations entre ces objets, à une représentation dynamique évolutive basée sur des agents aspectuels et prenant en compte l'état du contexte (Cardon et Itmi, 2009).

Le principe retenu consistera à considérer que toute connaissance donnant lieu à une précision ou une modification des caractères expressifs d'un événement fonc-

tionnel sera représentée par des agents aspectuels. Certains agents seront directement déduits des connaissances et d'autres, typiques de l'aspect dynamique et morphologique de l'organisation complexe d'agents, devront être introduits spécifiquement pour l'utilisation de cette connaissance dynamique.

Toute connaissance qui représente un fait, un état, un trait, un caractère d'une fonctionnalité et qui peut se modifier ou faire changer d'autres connaissances définies par des valeurs, sera représentée par des agents aspectuels.

#### 4.2 Création d'un agent aspectuel

Tout élément caractéristique du domaine fonctionnel étudié et qui en représente un certain trait, qui décrit un état, une valeur, un concept, une structure, une forme, un mouvement ou une évolution propre, doit être représenté par des agents aspectuels situant cette connaissance dans ses contextes d'usage.

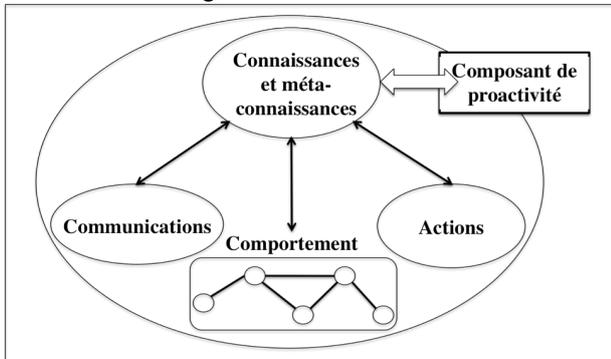


Figure 2. Structure générale d'un agent aspectuel.

Un agent aspectuel est le générateur comportemental de la connaissance dynamique qu'il incarne en agissant dans l'ensemble des connaissances dynamiques comme élément pouvant se rendre significatif en s'agrégeant à d'autres.

Les agents aspectuels (figure 2 ci-dessus) représentent donc les traits caractéristiques et les effets, locaux et globaux des fonctionnalités décrites par le comportement des objets, se produisant à différentes échelles dans les aspects et les mouvements représentant le phénomène étudié. Ils représentent le comportement observé ou prévu des nombreuses entités fonctionnelles actives et évolutives. Les effets et les changements de caractères ou d'aspects des objets observés sont systématiquement représentés par des agents ayant capacité à s'activer, à communiquer, à former des groupes générant tous les aspects d'un thème.

### 5 ANALYSE DE L'ORGANISATION AGENT ET CONTROLE

Rappelons que, globalement, le système de représentation d'un système fortement proactif basique, tel qu'il apparaît dans (Itmi et Cardon, 2012), est structuré selon deux niveaux liés de façon forte par une boucle systémique (voir la figure 3) :

1. Le niveau des éléments exprimant les aspects des objets fonctionnels, l'appréhension de toutes les informations sur ces éléments fonctionnels : ce sera le niveau des agents aspectuels.

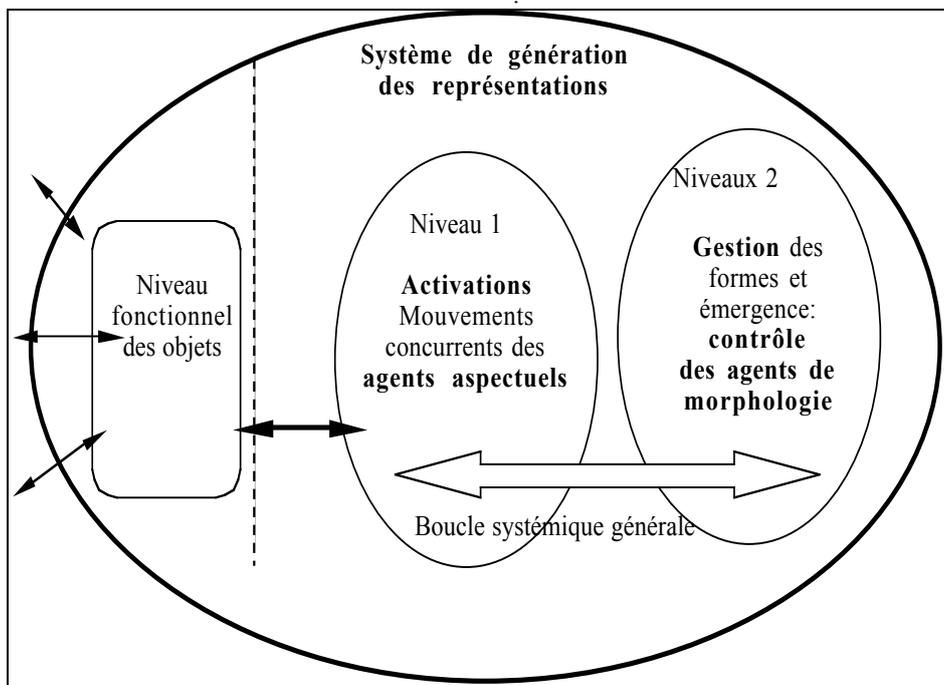


Figure 3. La structure du système représentant le bouclage entre système aspectuel et système de contrôle morphologique

2. Le niveau des éléments de représentation de l'activité des éléments du niveau aspectuel, qui seront des éléments décrivant l'expansion agent évaluée géométriquement et sémantiquement : ce sera le niveau morphologique et opérant un contrôle, exprimant l'action des tendances fondamentales du système. Il y aura coactivité entre le niveau des agents aspectuels et le niveau morphologique.

3. Une boucle liant organiquement les éléments aspectuels avec le niveau du contrôle, rendant ce contrôle dépendant des activités des éléments aspectuels. Les deux niveaux précédents sont donc considérés comme coactifs, avec certains délais. Le contrôle n'est pas réalisé par un superviseur central indépendant. L'existence de ce bouclage systémique rend le système autonome

## 6 ASPECTS ORGANISATIONNELS DE LA COUCHE ASPECTUELLE

L'ensemble des agents composant la couche aspectuelle, sous l'impulsion de l'activité des objet de la couche fonctionnelle, exprime en s'organisant, les actions de ces agents qui s'unissent ou bien s'affrontent. Ces caractères agrégatifs et de distinction peuvent s'exprimer de façon morphologique en caractérisant les proximités et les éloignements des comportements des actions des agents en utilisant les bonnes métriques. Ce sera le rôle d'agents particuliers, les **agents de morphologie**, de représenter ces caractères morphologiques.

L'objectif de la boucle systémique est de conduire le comportement organisé qui se déroule dans l'activité aspectuelle. Si l'on admet qu'un agent aspectuel possède une connaissance partielle lui permettant d'agir pour atteindre ses buts, l'agrégation de plusieurs agents coopérant pour atteindre un but collectif synthèse organisée de leurs buts partiels, ne peut donc que générer de la signification de niveau plus global. Il faut donc pouvoir, en observant et en manipulant ces agents aspectuels, comprendre les agrégations, les séparations, les désagrégations, les transformations, les points fixes et les situations de bifurcation. C'est seulement dans ce sens que le système arrivera à générer des plans conformes à la situation d'action générale du système.

Cependant, le fait que les agents aspectuels soient nombreux et que leur degré de liberté comportementale soit relativement grand conduit à considérer la couche aspectuelle comme une organisation dont le comportement n'est pas facilement représentable et dont la prédiction du comportement elle-même semble délicate. À cet effet, on va considérer dans l'analyse de l'organisation chaque agent sous l'aspect d'un vecteur d'aspects, afin de faciliter la compréhension des actions agrégatives et ainsi pouvoir influencer sur certaines.

Il y a donc une activité de niveau aspectuel, qui se déploie et qui va se comprendre globalement comme un

vaste processus d'agrégations, exprimé au niveau des éléments structurants. Les agrégations auront du sens, exprimeront les effets, les causalités et les contextes de tout déploiement. Pour en arriver là, il faut que le déploiement agent soit conduit, il faut un contrôle faisant tendre les activités des agents agrégés en éléments structurants vers des formes spécifiques et des amas de formes, connues du système car ayant une certaine permanence, ou bien originales et singulières.

Le contrôle des éléments structurants revient à trouver les caractères morphologiques dans leurs organisations en constitution :

1. Expression de tendances favorisant la formation des groupes,
2. Cohérence des groupements au niveau sémantique et structurel,
3. Continuité des agrégations ou caractères éphémères,
4. Changements de formes, vitesse et intensité des déformations,
5. Discontinuité ou rupture dans les agrégations d'agents aspectuels,
6. Uniformisation de l'organisation ou déploiement entropique,
7. Incohérence ou chaos des agrégations.

Tous ces caractères sont bien mesurables par des métriques dans un espace euclidien. Nous utiliserons donc un espace d'observation des caractères des éléments structurants, utilisant des métriques adaptées. Les éléments d'observation seront distribués, multiples, dynamiques et ils seront dotés d'une capacité d'action sur les groupes aspectuels. Ces éléments de contrôle évaluent donc, en les mesurant, les groupements d'agents aspectuels à partir de l'organisation structurante, selon les caractères métriques que nous avons précisés ci-dessus. Ils permettent de détecter, par simple lecture géométrique du polyèdre qui en représente le nuage, les caractères précédemment définis dans le déploiement agent au niveau structurant. Tel sera l'espace morphologique permettant le contrôle du système.

## 7 APPLICATIONS EN COURS

L'approche présentée est en cours de développement sur divers projets du laboratoire dont :

- la simulation d'un groupe de robots autonomes jouant entre-eux,
- la gestion du trafic urbain en tant que SdS autonome,
- la gestion de la « supply chain » : distribution et autonomie,
- la compétitivité régionale du point de vue des décisions stratégiques,
- le « Smart Grid » dans la gestion de l'énergie et la maintenance des sites de production.

## 8 CONCLUSION

Les principaux résultats de cet article concernent l'approche de l'autonomie. En précisant les notions de proactivité faible et de proactivité forte nous avons pu préciser la notion d'autonomie. La modélisation présentée est nouvelle. Quoique hautement conceptuelle, elle montre la voie pour la construction et l'étude de systèmes artificiels « fortement proactifs ». Avec la notion d'espace morphologique nous montrons qu'il est possible d'aborder les problèmes de SdS à diverses échelles et surtout leur contrôle.

## REFERENCES

- Abbott R., 2006. Open at the top; open at the bottom; and continually (but slowly) evolving, *Proceedings of the International Conference on System of Systems Engineering IEEE SoSE'06*, (Los Angeles, CA, USA, April 24-26), ISBN: 1-4244-0188-7, 6 pages, IEEE/SMC.
- Ackoff R., 1971. Towards a System of Systems Concepts, *Journal of the Institute for Operations Research and the Management Sciences*, Vol. 17, No. 11, July.
- Cardon A., 2005. La complexité organisée, Systèmes adaptatifs et champ organisationnel, *Ed. Hermès-Lavoisier*, Paris.
- Cardon A. and M. Itmi, 2009. Multi agent modeling approach for an adaptive regulation in large scale complex systems. *Proceedings of the International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE-SMC'09*, (San Antonio, Texas, USA, October 11-14), CDROM.
- Dahmann, J., J.A. Lane, G. Rebovich and R. Lowry, 2010. System of Systems Test and Evaluation Challenges. *International Conference on System of Systems Engineering IEEE SoSE'10*, (Loughborough, UK, June 22-24). ISBN: 978-1-4244-8197-2, 6 pages.
- Deonandan I., R. Valerdi, J.A. Lane and F. Macias, 2010. Cost and Risk Considerations for Test and Evaluation of Unmanned and Autonomous Systems of Systems, *Proceedings of the International Conference on System of Systems Engineering, IEEE SoSE'10*, (Loughborough, UK, June 22-24). ISBN: 978-1-4244-8197-2, 6 pages.
- Huang H., K. Pavsek, J. Albus and E. Messina, 2005. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework, An Update: *SPIE Defense and Security Symposium*, Orlando, Florida.
- Itmi M. and A. Cardon, 2012. Autonomy and control of Adaptive Systems of Systems. *International Journal of Modeling, Simulation and Scientific Computing* 3(1): 1240002 (21 p.). World Scientific Publishing Company. DOI: 10.1142/S1793962312400028. (March 2012).
- Lane, J. A. and R. Valerdi, 2007. Synthesizing SoS concepts for use in cost modeling. *Systems Engineering*, vol. 10, issue 4, pp. 297–308, Wiley.
- Maier, M., 1998. *Architecting Principles for Systems-of-Systems*, Vol.1, No.4, 267–284, online: <http://www.infoed.com/Open/PAPERS/systems.htm>
- Maturana F.P. and E. Liberman, 2010. The Role of Business-to-Control Agents in Next Generation Automation Enterprise Systems, *Factory Automation, Javier Silvestre-Blanes (Ed.)*, ISBN: 978-953-307-024-7, INTECH.
- Saridis G.N., 1985. Foundations of the Theory of Intelligent Controls, *Proceedings of the IEEE Workshop on Intelligent Control*, pp. 23-28.
- Sausser B. and J., Boardman, 2006. Systems of Systems - The Meaning of Of. *Proceedings of the IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering*. Los Angeles, CA.
- Varela F., 1989. *Autonomie et connaissance, Essai sur le vivant*, Seuil, Paris.