

Modélisation et simulation multi-niveaux orientées agent

Gildas Morvan

Univ. Lille Nord de France, 1bis rue Georges Lefèvre 59044 Lille, France
LGI2A, U. Artois, Technoparc Futura 62400 Béthune, France



Université Lille Nord de France
Pôle de Recherche
et d'Enseignement Supérieur



UNIVERSITÉ D'ARTOIS



11 février 2011

Overview

Introduction

Contexte

Modélisation et simulation multi-niveaux

Le principe influences → réaction

Un modèle formel : IRM4MLS

Meta-modèle

Modèle de simulation

Conclusion

Laboratoire de Génie Informatique et Automatique de l'Artois

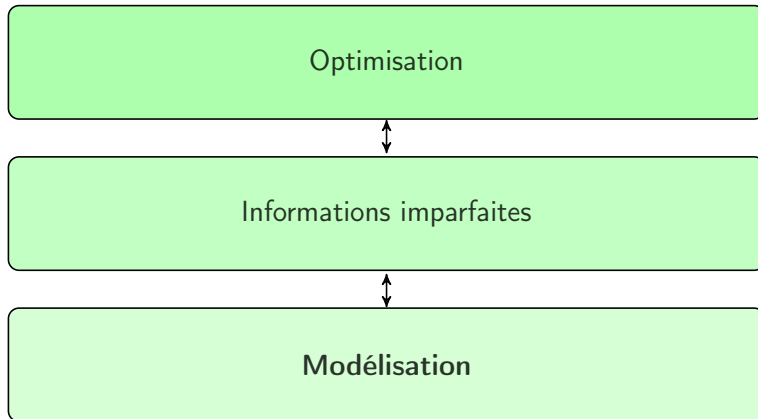
Modélisation

Laboratoire de Génie Informatique et Automatique de l'Artois

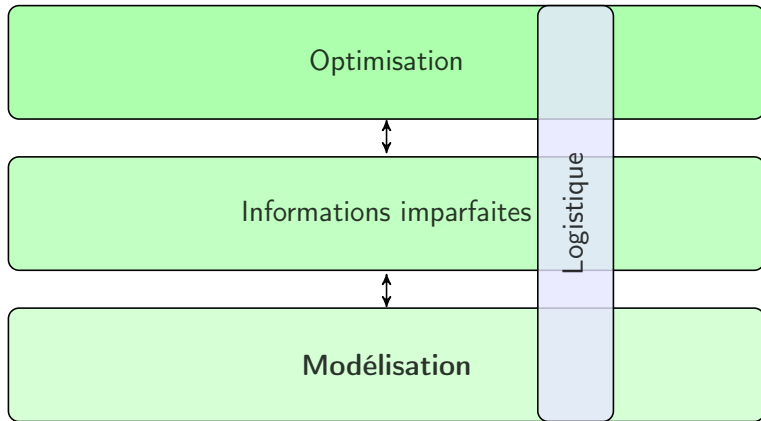
Optimisation

Modélisation

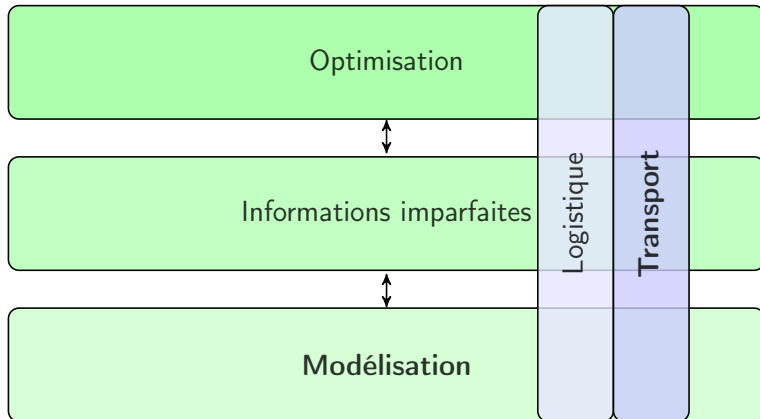
Laboratoire de Génie Informatique et Automatique de l'Artois



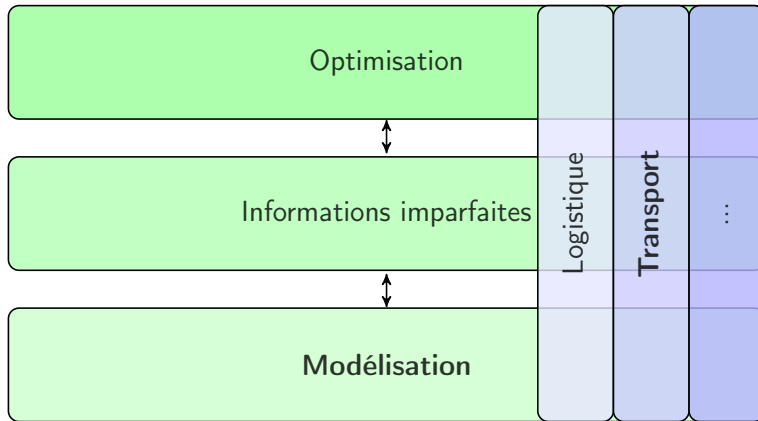
Laboratoire de Génie Informatique et Automatique de l'Artois



Laboratoire de Génie Informatique et Automatique de l'Artois



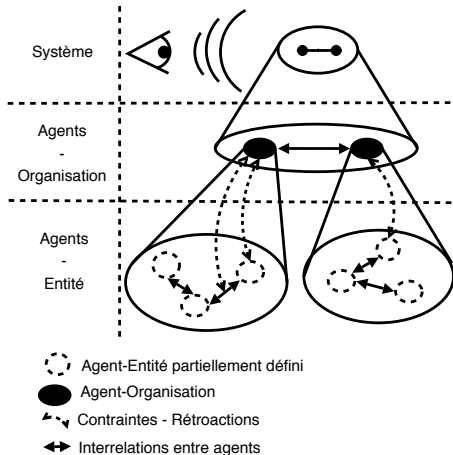
Laboratoire de Génie Informatique et Automatique de l'Artois



De la modélisation à la modélisation multi-niveaux I

- A l'origine : un problème de données disponibles
 - relatives à des individus
 - relatives à des groupes d'individus
- Données essentielles pour la modélisation
- Changement d'« échelle » impossible
- Solution : Détecter et agentifier les groupes (organisations) émergeant de la simulation [Morvan et al., 2008b]

De la modélisation à la modélisation multi-niveaux II



Modélisation multi-niveaux (MMN)

- Système : organisé à différents niveaux. Système social :

Modélisation multi-niveaux (MMN)

- Système : organisé à différents niveaux. Système social :

Macrosociologie

Grande structure sociale

Mésosociologie

communauté

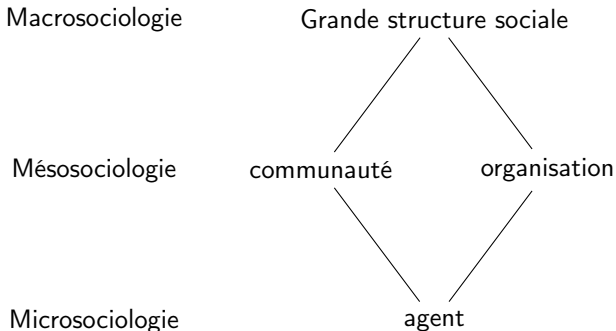
organisation

Microsociologie

agent

Modélisation multi-niveaux (MMN)

- Système : organisé à différents niveaux. Système social :



- MMN : intégrer des connaissances issues de niveaux différents dans un même modèle [Bourdieu, 1994, Giddens, 1987].
- Comprendre des phénomènes co-produits par des processus modélisés à différents niveaux.

Modélisation, simulation et pilotage multi-niveaux

- L'exemple d'un réseau routier :

macro

Flux de véhicules sur le réseau

méso

groupe de véhicules

micro

véhicule

Modélisation, simulation et pilotage multi-niveaux

- L'exemple d'un réseau routier :

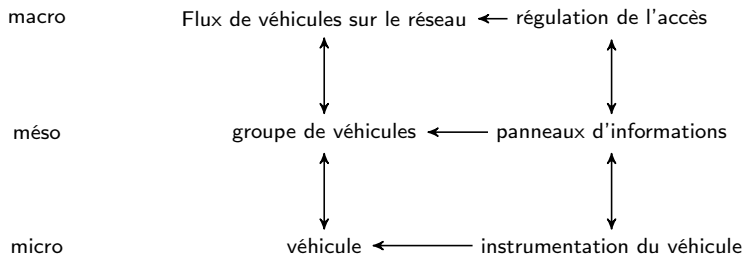
macro Flux de véhicules sur le réseau ← régulation de l'accès

méso groupe de véhicules ← panneaux d'informations

micro véhicule ← instrumentation du véhicule

Modélisation, simulation et pilotage multi-niveaux

- L'exemple d'un réseau routier :



- Modélisation et pilotage d'un système à partir d'informations issues de différents niveaux [El hmam et al., 2006]

Modélisation et simulation multi-niveaux orientées agent

- Thématique émergente mais mal référencée [Gil Quijano et al., 2009]
- Pourtant de nombreux champs d'application :
 - hydrologie [Servat et al., 1998],
 - sociologie [Sawyer, 2003, Schillo et al., 2001, Pumain et al., 2009],
 - éthologie [Morvan et al., 2008b, Morvan et al., 2008a],
 - conception de systèmes de production [Van Brussel et al., 1998],
 - biologie cellulaire [Lepagnot and Hutzler, 2009, An, 2008, Zhang et al., 2007, Zhang et al., 2009],
- Où est le problème ?

Modélisation et simulation multi-niveaux orientées agent

- Différents problèmes :
 - modélisation dans un contexte de connaissances incomplètes [Morvan et al., 2009]
 - visualisation : loupe dynamique [Gil Quijano et al., 2008]
 - optimiser le temps de calcul [Lepagnot and Hutzler, 2009, Pettinaro et al., 2003, Gaud et al., 2008]
 - model coupling [Bonneaud et al., 2007, Siebert et al., 2010]
- Peu de formalisation → implémentations mal décrites,
- Questions techniques ou conceptuelles passées sous silence :
 - Mapping spatio-temporel [Hoekstra et al., 2007]
 - Détection de phénomènes émergents [David and Courdier, 2008, Prévost and Bertelle, 2009, Chen et al., 2009, Chen, 2009]
 - ordonnancement [Weyns and Holvoet, 2004]

Modélisation et simulation multi-niveaux orientées agent

Vocabulaire

Qui fait quoi ? 2 clés de classification intéressantes :

- organisation hiérarchique des niveaux ou non,
- interaction faible ou forte [Michel, 2004].

| | | |
|---------------------|----------------|--------------------|
| | hiérarchique | + non hiérarchique |
| interaction faible | hybride | multi-modélisation |
| + interaction forte | multi-échelles | multi-niveaux |

Questions et solutions techniques différentes

Modélisation et simulation multi-niveaux orientées agent

Méta-modèles pour la MMN orientée agent

- DEVS : ML-DEVS basé sur P-DEVS [Uhrmacher et al., 2007]
- HMAS : [Gaud, 2007, Gaud et al., 2008]
- MABS :
 - tMans [Scheutz et al., 2005]
 - IR : IRM4S (micro/macro) [Michel, 2007a, Michel, 2007b]
 - **IRM4MLS** basé sur IRM4S [Morvan et al., 2011]

Influence Reaction model for multi-level simulation

- Objectif principal : généralité
- exemple de situations typiques :
 - environnements partagés par différents niveaux,
 - agents multi-niveaux,
 - migration dynamique des agents entre les niveaux
- IRM4MLS est composé de deux éléments :
 - un meta-modèle
 - des algorithmes capables d'exécuter (simuler) toute instance du meta-modèle.
- Modélisation de l'action : principe influences → réaction [Ferber and Müller, 1996].

Le principe influences \rightarrow réaction (IR)

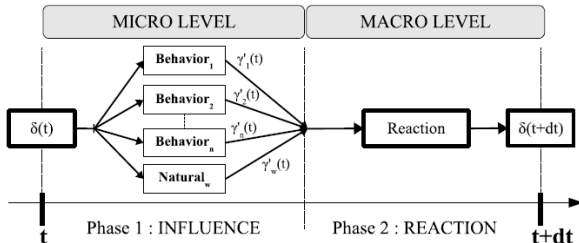
- Représentation classique de l'action en IA : $\Sigma \mapsto \Sigma$
- Comment représenter les actions simultanées ?
- Différencier l'action et ses conséquences [Ferber, 1995]
- Etat dynamique : $\Delta = \langle \Sigma, \Gamma \rangle$ [Ferber and Müller, 1996]
 - Σ : variables d'état de l'environnement,
 - Γ : influences produites par les agents et l'environnement.
- Action : 2 phases :
 1. les agents et l'environnement produisent des influences (Γ'),
 2. calcul du nouvel état dynamique $\langle \Sigma, \Gamma' \rangle \mapsto \Delta$

Le principe influences → réaction (IR)

- Critiques du modèle original :
 - implémentation complexe,
 - centralisation du calcul de la réaction.
- Depuis quelques années, nombreux travaux sur IR.
 - calcul distribué de la réaction [Weyns and Holvoet, 2003],
 - modèle dédié à la simulation (à temporalité) [Michel, 2007a].
- Un bon modèle :
 - haut niveau (comparé à DEVS p. ex.),
 - gestion "naturelle" de la simultanéité (comparé à P-DEVS p. ex.),.

Influence Réaction model for simulation

- Ajout d'une variable temporelle, t , explicite.
- Etat dynamique du système à t : $\delta(t) = \langle \sigma(t), \gamma(t) \rangle$
- L'évolution ($\delta(t) \mapsto \delta(t + dt)$) est réalisée en 2 temps :
 1. les agents et l'environnement produisent des influences $\delta(t) \mapsto \gamma'(t)$
 2. calcul du nouvel état dynamique $\langle \sigma(t), \gamma'(t) \rangle \mapsto \delta(t + dt)$



from [Michel, 2007a]

Les niveaux et leurs interactions

l_2 • L : l'ensemble des niveaux ($L = \{l_0, l_1, l_2\}$)

l_1

l_0

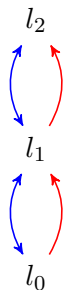
L

Les niveaux et leurs interactions

 l_2  l_1  l_0 L

- L : l'ensemble des niveaux ($L = \{l_0, l_1, l_2\}$)
- **Perception** : digraphe $\langle L, E_P \rangle$. *E.g.*,
 - $E_P = \{l_0l_1, l_1l_2\}$
 - Les agents de l_0 peuvent percevoir les états de l_0 et l_1

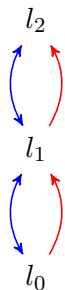
Les niveaux et leurs interactions



L

- L : l'ensemble des niveaux ($L = \{l_0, l_1, l_2\}$)
- **Perception** : digraphe $\langle L, E_P \rangle$. *E.g.*,
 - $E_P = \{l_0l_1, l_1l_2\}$
 - Les agents de l_0 peuvent percevoir les états de l_0 et l_1
- **Influence** : digraphe $\langle L, E_I \rangle$. *E.g.*,
 - $E_I = \{l_0l_1, l_1l_0, l_1l_2, l_2l_1\}$
 - Les agents de l_1 peuvent influencer l_0 , l_1 et l_2

Les niveaux et leurs interactions



L

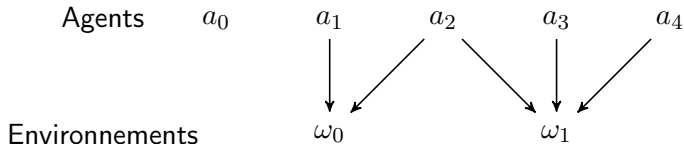
- L : l'ensemble des niveaux ($L = \{l_0, l_1, l_2\}$)
- **Perception** : digraphe $\langle L, E_P \rangle$. *E.g.*,
 - $E_P = \{l_0l_1, l_1l_2\}$
 - Les agents de l_0 peuvent percevoir les états de l_0 et l_1
- **Influence** : digraphe $\langle L, E_I \rangle$. *E.g.*,
 - $E_I = \{l_0l_1, l_1l_0, l_1l_2, l_2l_1\}$
 - Les agents de l_1 peuvent influencer l_0 , l_1 et l_2
- **P** et **I** sont toujours possibles au sein d'un même niveau.

Agent population and environments

Agents a_0 a_1 a_2 a_3 a_4

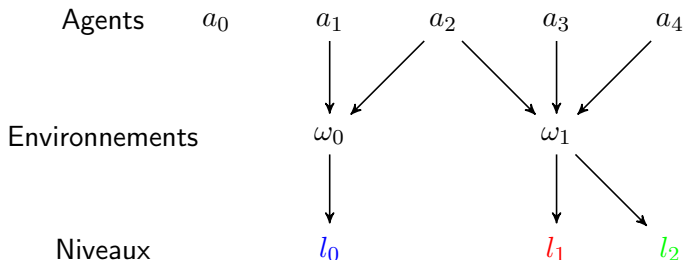
- $A(t)$: l'ensemble des agents dans le système à t

Agent population and environments



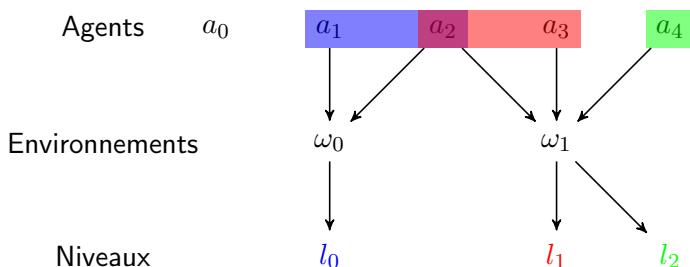
- $A(t)$: l'ensemble des agents dans le système à t
- Les agents agissent dans 0, 1 ou plusieurs environnements

Agent population and environments



- $A(t)$: l'ensemble des agents dans le système à t
- Les agents agissent dans 0, 1 ou plusieurs environnements
- 1 environnement peut être partagé par plusieurs niveaux

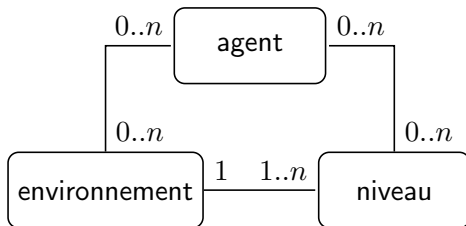
Agent population and environments



- $A(t)$: l'ensemble des agents dans le système à t
- Les agents agissent dans 0, 1 ou plusieurs environnements
- 1 environnement peut être partagé par plusieurs niveaux
- Les agents appartiennent à 0, 1 ou plusieurs niveaux

Concepts centraux de IRM4MLS

les cardinalités sont spécifiées à la manière d'UML



Production d'influences

- Modélisation du comportement des agents

*Comportement*_a^l =

*Perception*_a^l

*Perception*_a^l($\langle \delta^{l_P}(t) : l_P \in N_P^+(l) \rangle$) = $\langle p_a^{l_P}(t) : l_P \in N_P^+(l) \rangle$

Un agent *a*

1. construit un ensemble de percepts

Production d'influences

- Modélisation du comportement des agents

$$\text{Comportement}_a^l = \text{Memorisation}_a \circ \text{Perception}_a^l$$

$$\text{Memorisation}_a(\langle p_a^{l_P}(t), s_a(t) : l_P \in N_P^+(l) \rangle) = s_a(t + dt)$$

Un agent a

1. construit un ensemble de percepts
2. calcule son nouvel état interne. **Un seul état interne**

Production d'influences

- Modélisation du comportement des agents

$$\text{Comportement}_a^l = \text{Decision}_a^l \circ \text{Memorisation}_a \circ \text{Perception}_a^l$$

$$\text{Decision}_a^l(s_a(t + dt)) = \langle \gamma_a^{lI'}(t) : l_I \in N_I^+(l) \rangle$$

Un agent a

1. construit un ensemble de percepts
2. calcule son nouvel état interne. **Un seul état interne**
3. produit des influences

Production d'influences

- Modélisation du comportement des agents

$$\text{Comportement}_a^l = \text{Decision}_a^l \circ \text{Memorisation}_a \circ \text{Perception}_a^l$$

$$\text{Decision}_a^l(s_a(t + dt)) = \langle \gamma_a^{lI'}(t) : l_I \in N_I^+(l) \rangle$$

Un agent a

1. construit un ensemble de percepts
2. calcule son nouvel état interne. **Un seul état interne**
3. produit des influences

- Modélisation de la dynamique propre de l'environnement

Réaction aux influences

- idem IRM4S : réaction propre à un niveau $Raction^l$

$$Raction^l(\langle \sigma^l(t), \gamma^{l'}(t) \rangle) = \delta^l(t + dt)$$

- $\gamma^{l'}(t)$: ensemble d'influences temporaire l à t

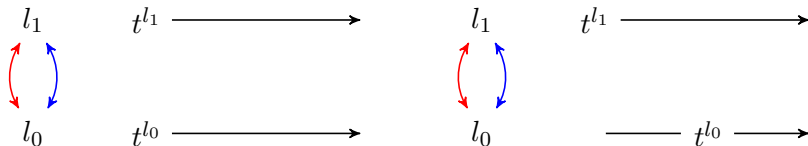
Modèle de simulation

- Ordonnancement des fonctions comportementales des agents et de l'environnement et de la réaction des niveaux.
- Pas si facile
 - agents et environnements multi-niveaux
 - différentes représentation du temps (pas de temps ou événements discrets)
 - temporalité propre à chaque niveaux (échelle)
- Contraintes temporelles basées sur 3 principes
 - causalité,
 - cohérence,
 - efficacité.

Contraintes temporelles

Principe de causalité

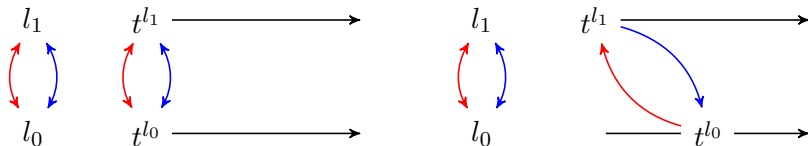
1. un agent ne peut pas **percevoir** le futur
2. un agent ne peut pas **influencer** le passé



Contraintes temporelles

Principe de causalité

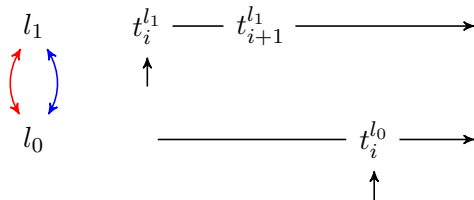
1. un agent ne peut pas **percevoir** le futur
2. un agent ne peut pas **influencer** le passé



Contraintes temporelles

Principe de cohérence

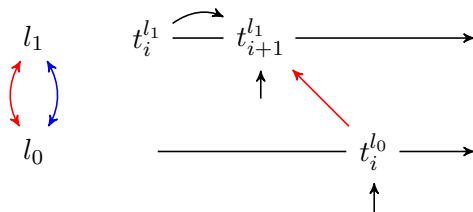
Un agent ne peut **percevoir** que les *derniers* états dynamiques



Contraintes temporelles

Principe de cohérence

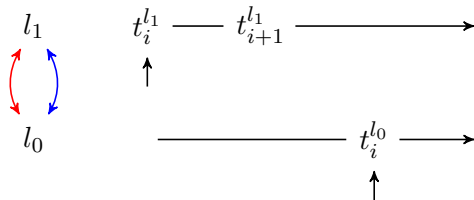
Un agent ne peut **percevoir** que les *derniers* états dynamiques



Contraintes temporelles

Principe de cohérence

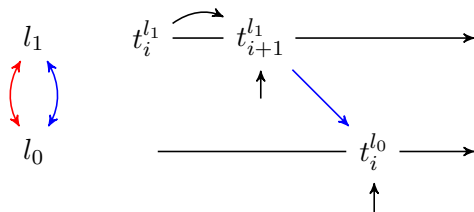
Idem pour l'influence



Contraintes temporelles

Principe de cohérence

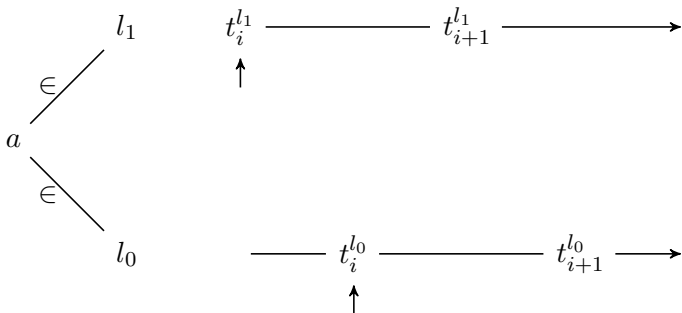
Idem pour l'influence



Contraintes temporelles

Principe de cohérence

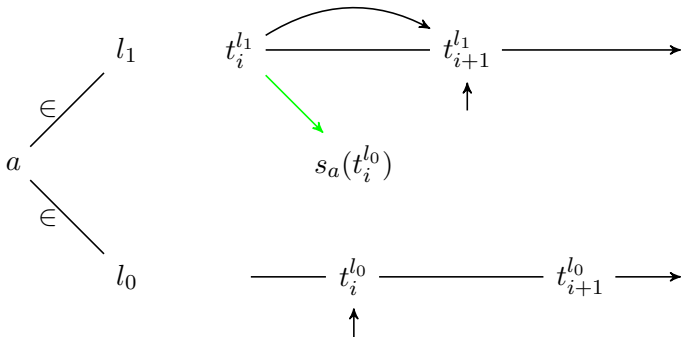
L'état interne d'un agent doit être **calculé** pour son prochain pas de simulation



Contraintes temporelles

Principe de cohérence

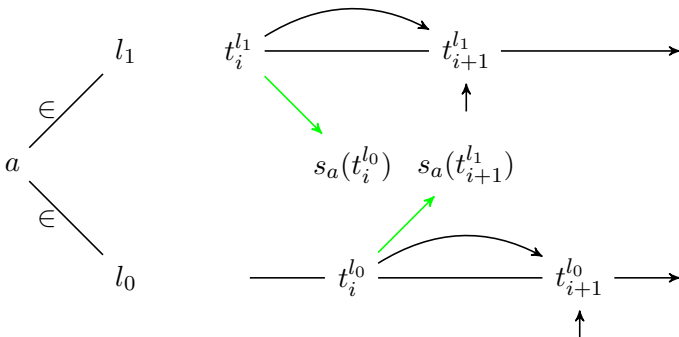
L'état interne d'un agent doit être **calculé** pour son prochain pas de simulation



Contraintes temporelles

Principe de cohérence

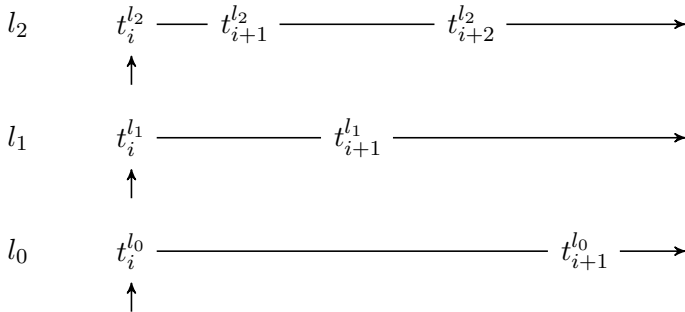
L'état interne d'un agent doit être **calculé** pour son prochain pas de simulation



Contraintes temporelles

Principe de cohérence

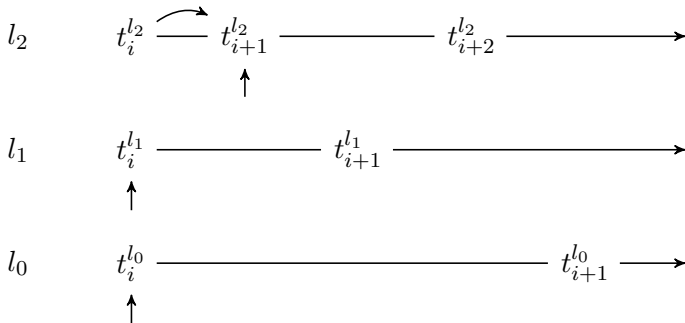
Les réactions doivent être calculées pour le prochain pas de simulation



Contraintes temporelles

Principe de cohérence

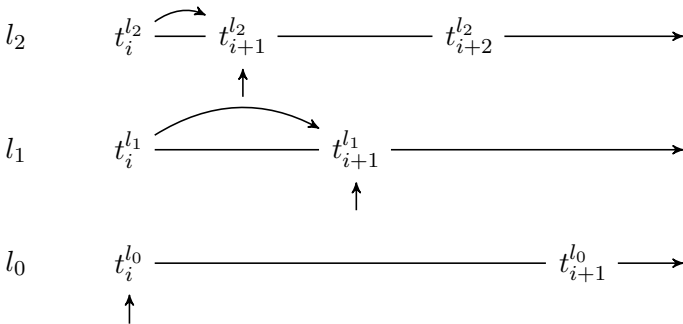
Les réactions doivent être calculées pour le prochain pas de simulation



Contraintes temporelles

Principe de cohérence

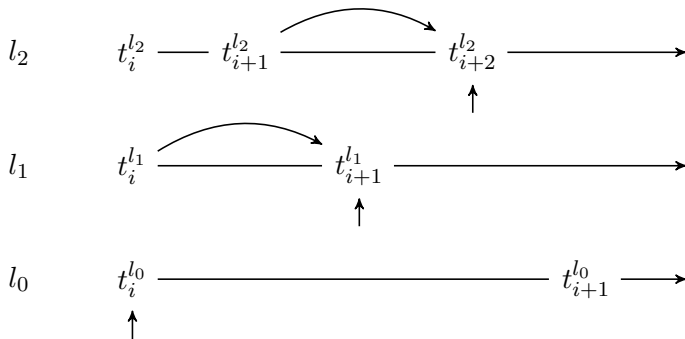
Les réactions doivent être calculées pour le prochain pas de simulation



Contraintes temporelles

Principe de cohérence

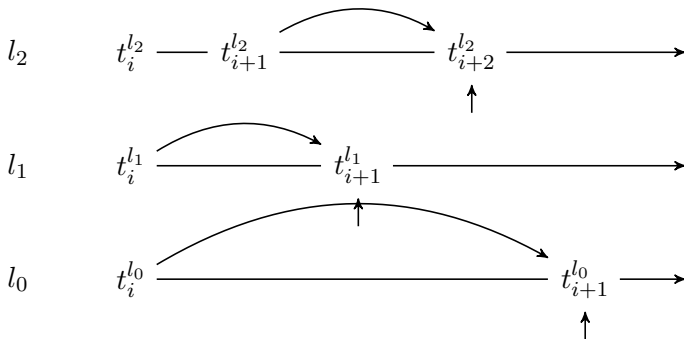
Les réactions doivent être calculées pour le prochain pas de simulation



Contraintes temporelles

Principe de cohérence

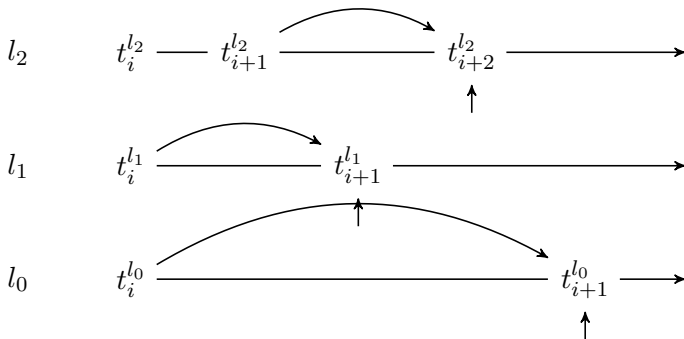
Les réactions doivent être calculées pour le prochain pas de simulation



Contraintes temporelles

Principe de cohérence

Les réactions doivent être calculées pour le prochain pas de simulation

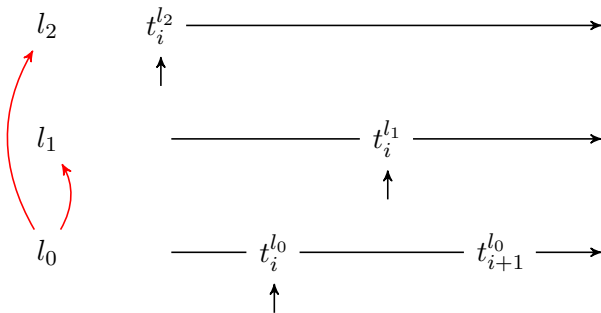


Résout les problèmes liés à la **perception** et l'**influence**.

Contraintes temporelles

Principe d'efficacité (simplifier l'implémentation)

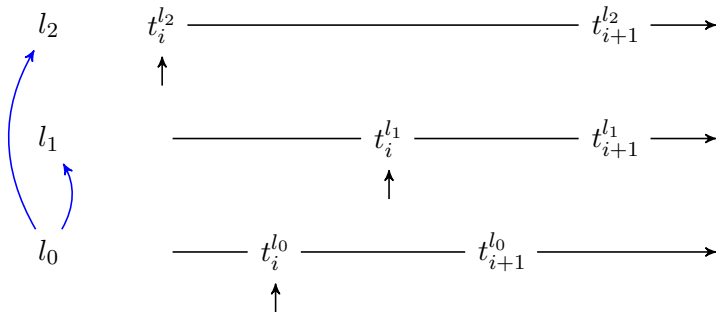
Les **percepts** devraient être construits en une fois.



Contraintes temporelles

Principe d'efficacité (simplifier l'implémentation)

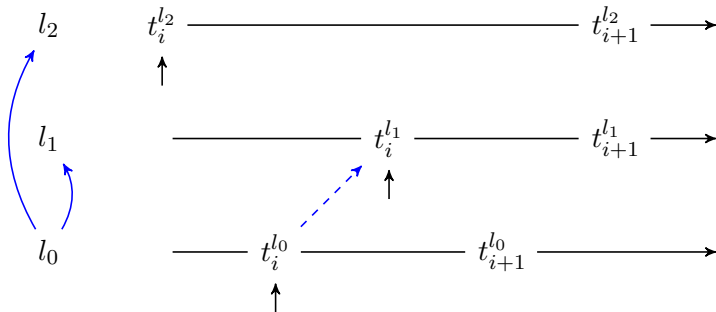
Tout comme les **influences**



Contraintes temporelles

Principe d'efficacité (simplifier l'implémentation)

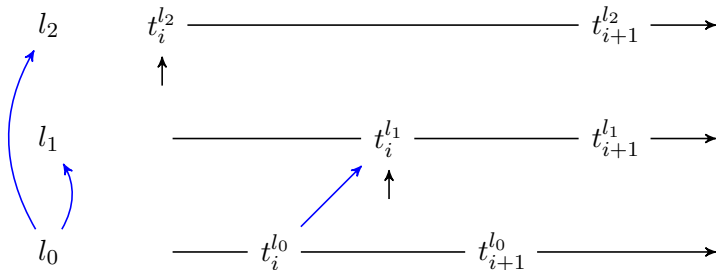
Tout comme les influences



Contraintes temporelles

Principe d'efficacité (simplifier l'implémentation)

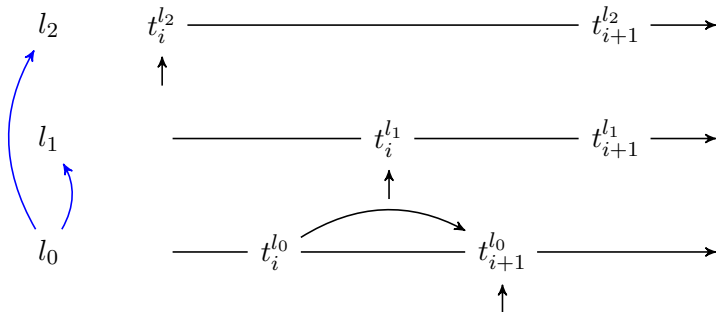
Tout comme les **influences**



Contraintes temporelles

Principe d'efficacité (simplifier l'implémentation)

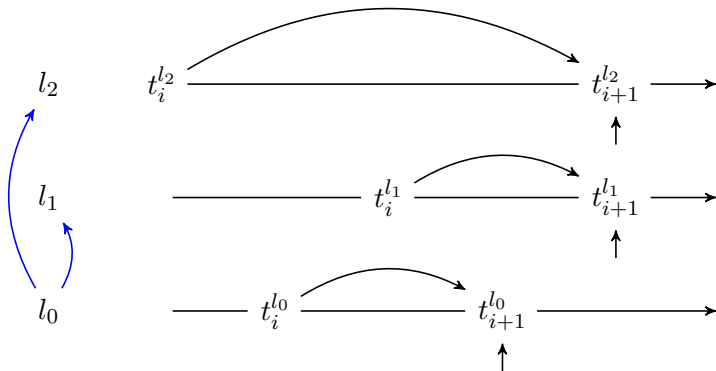
Tout comme les influences



Contraintes temporelles

Principe d'efficacité (simplifier l'implémentation)

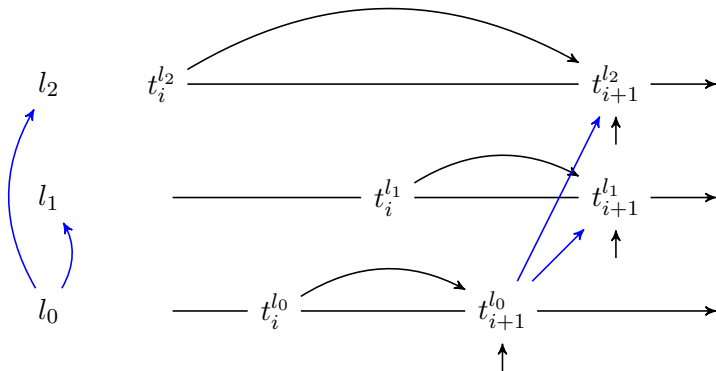
Tout comme les influences



Contraintes temporelles

Principe d'efficacité (simplifier l'implémentation)

Tout comme les influences



Modèle de simulation (simplifié)

Input: $\langle L, E_I, E_P \rangle, A(t_0), \delta(t_0)$

Output: $\delta(T)$

while *la simulation n'est pas finie* **do**

end

Modèle de simulation (simplifié)

Input: $\langle L, E_I, E_P \rangle, A(t_0), \delta(t_0)$

Output: $\delta(T)$

while *la simulation n'est pas finie* **do**

foreach $a \in A(t)$ **do**

$L_P = \{ \text{niveaux perçus par } a \text{ et respectant les règles de perception } \};$

$p_a(t^l) = \langle \text{Perception}_a^l(\langle \delta^{l_P}(t^{l_P}) : l_P \in N_P^+(l) \rangle) : l \in L_P \rangle;$

$s_a(t_a + dt_a) = \text{Memorisation}_a(p_a(t^l));$

end

end

Modèle de simulation (simplifié)

Input: $\langle L, E_I, E_P \rangle, A(t_0), \delta(t_0)$

Output: $\delta(T)$

while *la simulation n'est pas finie* **do**

foreach $a \in A(t)$ **do**

$L_P = \{ \text{niveaux perçus par } a \text{ et respectant les règles de perception } \};$

$p_a(t^l) = \langle \text{Perception}_a^l(\langle \delta^{l_P}(t^{l_P}) : l_P \in N_P^+(l) \rangle) : l \in L_P \rangle;$

$s_a(t_a + dt_a) = \text{Memorisation}_a(p_a(t^l));$

end

$L_I = \{ \text{niveaux respectant les règles d'influence} \};$

foreach $l \in L_I$ **do**

foreach $a \in A_l(t)$ **do**

$\gamma^{l_I'}(t^{l_I}) = \begin{cases} \text{Decision}_a^l(s_a(t_a + dt_a)) & \text{si contrainte de causalité OK} \\ \emptyset & \text{sinon;} \end{cases}$

end

end

end

Modèle de simulation (simplifié)

Input: $\langle L, E_I, E_P \rangle, A(t_0), \delta(t_0)$

Output: $\delta(T)$

while *la simulation n'est pas finie* **do**

foreach $a \in A(t)$ **do**

$L_P = \{ \text{niveaux perçus par } a \text{ et respectant les règles de perception } \};$

$p_a(t^l) = \langle \text{Perception}_a^l(\langle \delta^{l_P}(t^{l_P}) : l_P \in N_P^+(l) \rangle) : l \in L_P \rangle;$

$s_a(t_a + dt_a) = \text{Memorisation}_a(p_a(t^l));$

end

$L_I = \{ \text{niveaux respectant les règles d'influence} \};$

foreach $l \in L_I$ **do**

foreach $a \in A_l(t)$ **do**

$\gamma^{l_{I'}}(t^{l_I}) = \begin{cases} \text{Decision}_a^l(s_a(t_a + dt_a)) & \text{si contrainte de causalité OK} \\ \emptyset & \text{sinon;} \end{cases}$

end

end

$L_R = \{ \text{niveaux respectant les règles de réaction} \};$

foreach $l \in L_R$ **do**

$\delta^l(t^l + dt^l) = \text{Raction}^l(\sigma^l(t^l), \gamma^{l'}(t^l));$

$t^l = t^l + dt^l;$

end

end

Conclusion

- Le principe Influences → Réaction : bon candidat pour la modélisation multi-niveaux multi-agents
 - mêmes concepts pour les interactions intra et inter-niveaux
 - modèle de simulation générique (pas d'hypothèse *had hoc*)
- IRM4MLS est très général
 - son implémentation peut être complexe...
 - le modèle de simulation peut être simplifié dans certains cas (hiérarchie de niveaux, agents sans état interne, etc.)

Travaux en cours

- Thèse de Jean-Baptiste Soyez (2010 –)
 - Implémentation d'IRM4MLS
 - Application : projet InTrade
 - Automatisation d'infrastructures portuaires

InTraDE

Intelligent Transportation for Dynamic Environment

www.intrade-nwe.eu

Travaux en cours

- Méthodologie
- Implémentation de modèles hybrides de flux de trafic existants [El hmam et al., 2006]
- Développement de nouveaux modèles
- Intégration avec une plate-forme SMA existante

References I



An, G. (2008).

Introduction of an agent-based multi-scale modular architecture for dynamic knowledge representation of acute inflammation.

Theoretical Biology and Medical Modelling, 5(11).



Bonneaud, S., Redou, P., and Chevaillier, P. (2007).

Pattern oriented agent-based multi-modeling of exploited ecosystems.

In *Proceedings of the 6th EUROSIM congress*.



Bourdieu, P. (1994).

Raisons pratiques : sur la théorie de l'action, volume 331 of *Points*.

Éditions du Seuil.



Chen, C.-C. (2009).

Complex Event Types for Agent-Based Simulation.

PhD thesis, University College London.



Chen, C.-C., Clack, C., and Nagl, S. (2009).

Identifying multi-level emergent behaviors in agent-directed simulations using complex event type specifications.

Simulation.



David, D. and Courdier, R. (2008).

Emergence as metaknowledge : refining simulation models through emergence reification.

In *Proceedings of ESM'2008, Le Havre, France*, pages 25–27.

References II



El hmam, M., Abouaissa, H., Jolly, D., and Benasser, A. (2006).

Macro-micro simulation of traffic flow.

In Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM06), pages 351–356, Saint Etienne FRANCE.



Ferber, J. (1995).

Les Systèmes Multi-Agents : Vers une Intelligence Collective.
InterEditions.



Ferber, J. and Müller, J.-P. (1996).

Influences and reaction : a model of situated multiagent systems.

In 2nd International Conference on Multi-agent systems (ICMAS-96), pages 72–79.



Gaud, N., Galland, S., Gechter, F., Hilaire, V., and Koukam, A. (2008).

Holonc multilevel simulation of complex systems : Application to real-time pedestrians simulation in virtual urban environment.

Simulation Modelling Practice and Theory, 16 :1659–1676.



Gaud, N. A. (2007).

Systèmes multi-agent holoniques : De l'analyse à l'implantation. Méta-modèle, méthodologie, et simulation multi-niveaux.

PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.



Giddens, A. (1987).

La constitution de la société : éléments de la théorie de la structuration.

Presses Universitaires de France.

References III



Gil Quijano, J., Hutzler, G., and Louail, T. (2009).

De la cellule biologique à la cellule urbaine : retour sur trois expériences de modélisation multi-échelles à base d'agents.

In *Actes des 17èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA'09)*.



Gil Quijano, J., Piron, M., and Drogoul, A. (2008).

Social Simulation : Technologies, Advances and New Discoveries, chapter Mechanisms of Automated Formation and Evolution of Social-Groups : A Multi-Agent System to Model the Intra-Urban Mobilities of Bogota City.

IGI Global.



Hoekstra, A., Lorenz, E., Falcone, J.-L., and Chopard, B. (2007).

Towards a complex automata framework for multi-scale modeling : Formalism and the scale separation map.

In *Proceedings of ICCS'07, Part I, LNCS 4487*, pages 922–930.



Lepagnot, J. and Hutzler, G. (2009).

A multiscale agent-based model for the simulation of avascular tumour growth.

Journal of Biological Physics and Chemistry, 9(1) :17–25.



Michel, F. (2004).

Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents.

PhD thesis, Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier - Université Montpellier II.

References IV



Michel, F. (2007a).

The irm4s model : the influence/reaction principle for multiagent based simulation.
In *AAMAS '07 : Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 1–3, New York, NY, USA. ACM.



Michel, F. (2007b).

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 :757–779.



Morvan, G., Jolly, D., and Charabidze, D. (2008a).

Thermoregulation in p. terraenovae aggregations, an agent-based approach.
In *Proceedings of the ESM'2008, Le Havre, France*, pages 417–422.



Morvan, G., Jolly, D., Veremme, A., Dupont, D., and Charabidze, D. (2008b).

Vers une méthode de modélisation multi-niveaux.
In *Actes de la 7ème Conférence de Modélisation et Simulation MOSIM, Paris, France*, volume 1, pages 167–174.



Morvan, G., Veremme, A., and Dupont, D. (2011).

Multi-Agent-Based Simulation XI, chapter IRM4MLS : the influence reaction model for multi-level simulation.
Number 6532 in *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Springer.



Morvan, G., Veremme, A., Dupont, D., and Jolly, D. (2009).

Modélisation et conception multiniveau de systèmes complexes : stratégie d'agentification des organisations.
Journal Européen des Systèmes Automatisés, 43 :381–406.

References V



Pettinaro, G., Kwee, I., and Gambardella, L. (2003).

Acceleration of 3d dynamics simulation of s-bot mobile robots using multi-level model switching.
Technical report, IDSIA/USI-SUPSI.



Prévost, G. and Bertelle, C. (2009).

Complex Systems and Self-organization Modelling, chapter Detection and Reification of Emerging Dynamical Ecosystems from Interaction Networks, pages 139–161.
Springer Berlin Heidelberg.



Pumain, D., Sanders, L., Bretagnolle, A., Glisse, B., and Mathian, H. (2009).

Complexity Perspectives in Innovation and Social Change, volume 7 of *Methodos*, chapter The Future of Urban Systems : Exploratory Models, pages 331–360.
Springer Netherlands.



Sawyer, R. (2003).

Artificial societies, multiagent systems and the micro-macro link in sociological theory.
Sociological Methods & Research, 31(3) :325–363.



Scheutz, M., Madey, G., and Boyd, S. (2005).

tmans - the multi-scale agent-based networked simulation for the study of multi-scale, multi-level biological and social phenomena.
In *Spring Simulation Multiconference*.



Schillo, M., Fischer, K., and Klein, C. (2001).

The micro-macro link in dai and sociology.
In *Multi-Agent Based Simulation : Second International Workshop on Multi-Agent Based Simulation*, volume 1979 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 133–148.
Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

References VI



Servat, D., Perrier, E., Treuil, J.-P., and Drogoul, A. (1998).

When Agents Emerge from Agents : Introducing Multi-scale Viewpoints in Multi-agent Simulations, volume 1534 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 183–198. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.



Siebert, J., Ciarletta, L., and Chevrier, V. (2010).

Agents and artefacts for multiple models co-evolution. building complex system simulation as a set of interacting models.
In *Proc. of 9th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010)*, pages 509–516.



Uhrmacher, A. M., Ewald, R., John, M., Maus, C., Jeschke, M., and Biermann, S. (2007).

Combining micro and macro-modeling in devs for computational biology.
In *Proceedings of the 39th conference on Winter simulation : 40 years! The best is yet to come, WSC '07*, pages 871–880, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press.



Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., and Peeters, P. (1998).

Reference architecture for holonic manufacturing systems : Prosa.
Computers in Industry, 37(3) :255–274.



Weyns, D. and Holvoet, T. (2003).

Multi-Agent System Technologies, chapter Model for Simultaneous Actions in Situated Multi-agent Systems, pages 105–118.
Number 2831 in *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.



Weyns, D. and Holvoet, T. (2004).

A formal model for situated multi-agent systems.
Fundamenta Informaticae, 63(2–3) :125 – 158.

References VII



Zhang, L., Athale, C., and Deisboeck, T. (2007).

Development of a three-dimensional multiscale agent-based tumor model : Simulating gene-protein interaction profiles, cell phenotypes and multicellular patterns in brain cancer. *Journal of Theoretical Biology*, 244(1) :96–107.



Zhang, L., Wang, Z., Sagotsky, J., and Deisboeck, T. (2009).

Multiscale agent-based cancer modeling. *Journal of Mathematical Biology*, 48(4–5) :545–559.