



UNIVERSITE ABDELHAFID BOUSSOUF MILA
DEPARTEMENT MATHEMATIQUE

Simulation avancée

Dr. BOUNAIRA Soumaya
Enseignante-chercheuse

Date: Décembre 3, 2025

Chapitre 2

Simulation multi-agents

2.1 Introduction

Dans notre quête de compréhension des phénomènes naturels caractérisés par la notion philosophique de l'être, ou artificiels caractérisés par la notion de l'intention d'être, nous sommes fréquemment confrontés aux problèmes de caractérisation de ces phénomènes communément qualifiés par la terminologie de systemes complexes.

2.2 Que ce qu'un système complexe (SC)?

Dans la littérature il existe plusieurs définitions sur les systèmes complexes. Dans cette section, nous allons présenter quelques définitions sur l'état de l'art sur les systèmes complexes.

Un système est un ensemble qui se constitué par une unité cohérente et autonome d'objets réels ou conceptuels. On peut dire qu'un système est un organisme conçu pour atteindre un objectif ou ensemble d'objectifs avec moyen d'interactions mutuelles et dynamiques.

2.2.1. Définitions

- Définition de SC selon *(Robert)*

« ensemble structuré d'éléments naturels de la même espèce ou de la même fonction »

il définit alors un système par trois critères fondamentaux:

- ✓ le nombre d'éléments,
 - ✓ leur espèce ,
 - ✓ et les relations qui existent entre ces éléments.
- Définition d'un SC [Advances in Complex Systems Journal]
"A system comprised of a (usually large) number of (usually strongly) interacting entities, processes, or agents, the understanding of which requires the development, or the use of, new scientific tools, nonlinear models, out-of-equilibrium descriptions and computer simulations."
 - Définition d'un SC [Jerome Singer]
"A system that involves numerous interacting agents whose aggregate behaviors are to be understood. Such aggregate activity is non linear, hence it cannot simply be derived from summation of individual components behavior."

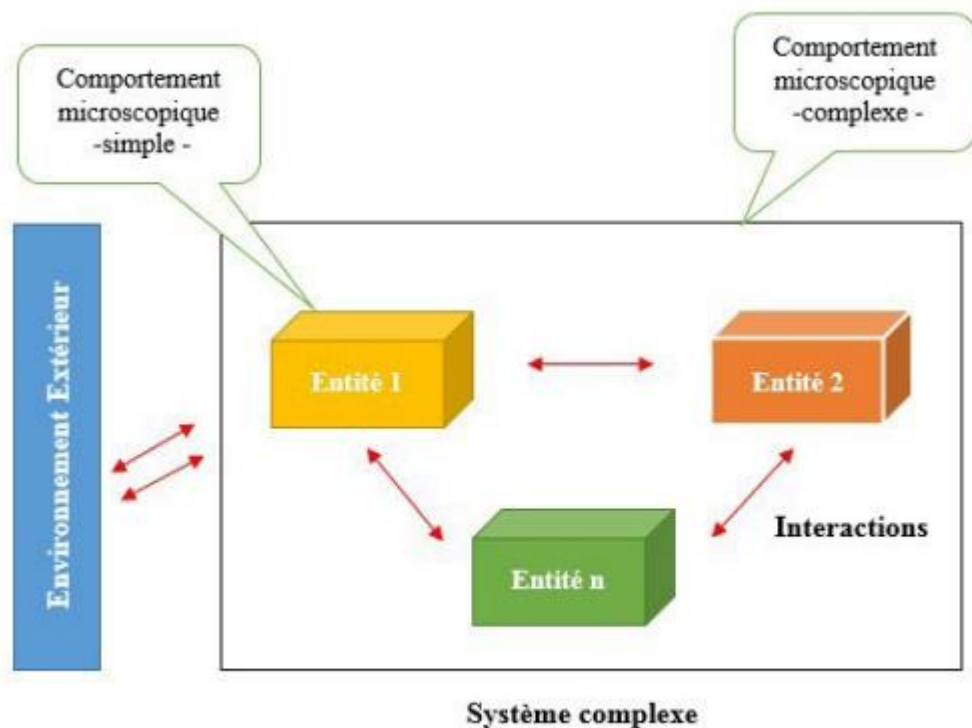


Figure 1. Vue générale du système complexe.

2.2.2. Complexité d'un système

De la notion de complexité d'un système peut résulter trois éléments :

- ✓ le degré élevé d'organisation, d'organisation, l'incertitude
- ✓ l'incertitude de son environnement, environnement,
- ✓ la difficulté, sinon l'impossibilité d'identifier tous les éléments et de comprendre toutes les relations mises en jeu.

Edgar Morin précise que:

➔ **la complexité n'est pas la complication**

Et postule que ce qui est compliqué peut se réduire à un principe simple.

Le Moigne et Clergue établissent également la distinction entre ces deux systèmes.

Les systèmes compliqués sont des systèmes que l'on peut réduire en éléments plus simples que l'on peut analyser séparément pour comprendre le système global.

- **Système compliqué : peut être décomposé pour être**
 - Compris et étudié.
 - Exemple : Moteur de voiture.
- **Système complexe : perd son intelligibilité s'il est**
 - Décomposé.
 - Exemple : Ecosystème, chaîne alimentaire.

Exemples :

- Une voiture est un système très compliqué, mais démontable en un ensemble fini de pièce.
- Un organisme vivant est complexe dans le sens où il ne peut être décomposé et reconstruit à partir d'éléments simples et indépendants.

2.2.3 Caractéristiques d'un système complexe

2.2.3.1. Les cardinalités : Un système est qualifié de complexe s'il contient plusieurs entités composantes (agents, cellules, machines, utilisateurs...).

- *Exemple* : Une colonie de fourmis, un réseau électrique.

2.2.3.2. Systèmes dynamiques : une petite action peut avoir de grands effets, ou l'inverse. Les relations ne sont **pas proportionnelles**.

- *Exemple* : Une légère augmentation du trafic peut créer un énorme embouteillage.

2.2.3.3. L'indécidabilité : Un système est considéré comme complexe si son comportement est considéré comme indécidable (indéterminable) en revanche, les systèmes qui possèdent un comportement déterminable sont considérés moins complexes.

2.2.3.4. Émergence : Le comportement global du système apparaît spontanément grâce aux interactions entre les éléments.

Ce comportement **n'existe pas** au niveau individuel.

- *Exemple* : Le vol coordonné d'un groupe d'oiseaux.

2.2.3.5. Adaptation : Les éléments modifient leur comportement en fonction de l'environnement.

- *Exemple* : Un système biologique qui s'adapte à un changement climatique.

2.2.3.6. A u t o - o r g a n i s a t i o n : Un mécanisme ou processus qui permet aux systèmes de changer l'organisation sans intervention explicite durant son déroulement. De plus, les interactions entre ses entités ou avec l'extérieur du système sont faites de façon autonome (sans intervention centrale et extérieur).

2.2.3.7. Non linéarité : Les systèmes ont des comportements non linéaire qui permet de répondre de façon totalement différents pour les même valeurs d'entrées du système en fonction de leur état ou contexte.

2.3. Simulation basée agents : Agents, Environnement, comportement

La simulation basée agents (SBA) ou *Agent-Based Modeling* (ABM) est un paradigme de modélisation computationnelle qui permet de simuler les actions et interactions d'individus autonomes (les agents) pour comprendre le comportement d'un système complexe dans son ensemble.

2.3.1. Notion d'agent : définition

Le mot « agent » est utilisé pour décrire des systèmes très différents les uns des autres. Pour ajouter à la confusion, les chercheurs sont allés même jusqu'à inventer plusieurs synonymes au mot « agent ». Ils ont ainsi inventé, par exemple, « knowbots » (robots à base de connaissances), « softbots » (robots logiciel), taskbots (robots à base de tâche), « userbots »

(robots pour utilisateur), robots, agents personnels, agents autonomes, assistants personnels, etc. Il est vrai qu'une telle prolifération de termes trouve sa justification dans le fait que les agents peuvent prendre différentes formes physiques (robot ou agent logiciel) et qu'ils peuvent aussi jouer plusieurs rôles.

« Un agent est une entité intelligente, agissant rationnellement et intentionnellement, en fonction de ses buts propres et de l'état actuel de sa connaissance. » Y. Demazeau & J.P. Müller, 90

« Un agent est une entité qui fonctionne continuellement et de manière autonome dans un environnement où d'autres processus se déroulent et d'autres agents existent » Shoham, 1993

« Un agent est une entité **autonome**, réelle ou abstraite, qui est capable **d'agir** sur elle-même et sur son **environnement**, qui, dans un **univers multi-agents**, peut **communiquer** avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses **observations**, de ses **connaissances** et des **interactions** avec les autres agents » (Ferber, 1995)

« Un agent est une entité qui **perçoit** son **environnement** et **agisse** sur celui-ci » (Russell, 1997)

« Un agent est un programme informatique qui est **situé** dans un **environnement** et qui est doté de comportements **autonomes** (actions) lui permettant d'atteindre, dans cet environnement, **les objectifs** qui lui ont été fixés à sa conception » (M. Wooldridge 1997)

2.3.2. Propriétés d'un agent

Un agent peut être caractérisé par plusieurs propriétés, nous pouvons citer parmi elles :

- **Autonomie** : Wooldridge et Jennings (Wooldridge & Jennings, 1994) définissent l'autonomie comme étant la capacité pour un agent d'opérer de manière autonome sans une intervention directe d'humains ou d'autres agents et de contrôler ses actions et son état interne. Quant à C.CastelFranchi dans (Castelfranchi, 1995), définit un agent autonome comme étant un agent qui a ses propres buts et qui est capable de décider des buts à poursuivre, comment les atteindre et résoudre les conflits internes relatives aux buts choisis. Pour P.R.Cohen, H.J.Levesque dans (Cohen & Levesque, 1995) et Y.Shoham dans (Shoham 1993), un agent est capable :
 - d'agir selon ses intentions ;
 - d'adopter les buts qu'il croit réalisables et d'abandonner ceux qu'il croît irréalisables ;
 - de planifier ses propres actions et de tenir compte de celles des autres ;
 - de raisonner non seulement sur ses connaissances mais aussi sur celles des autres.

- **Réactivité**

Les agents perçoivent leur environnement et réagissent aux changements qui s'y produisent (Wooldridge & Jennings, 1994).

La réactivité signifie aussi la capacité qu'a un agent de modifier son comportement lorsque les conditions environnementales changent (Oliveira, 1998).

Un objet est une entité passive(ou réactive), si personne ne demande la valeur d'un attribut ou n'active une méthode de l'objet, il ne se passe rien (Sansonnet, 2002).

- **Proactivité**

Les agents n'agissent pas simplement en réponse à leur environnement, ils sont capables d'exhiber un comportement guidé par des buts en prenant des initiatives (Wooldridge & Jennings, 1994). La proactivité est la capacité d'un agent d'anticiper des situations et de changer son cours d'action pour les éviter (Oliveira, 1998).

Un agent possède, en plus des attributs et méthodes, des processus internes qui fonctionnent même en l'absence de sollicitations externes. Un agent peut donc agir même si personne ne lui demande rien.

- **Adaptabilité**

Face à un environnement perpétuellement changeant, un agent doit constamment modifier le plan qu'il poursuit pour atteindre un but. Pour cela :

Il doit, de manière continue, percevoir et évaluer la situation (contexte) de son action. Construire des représentations en cours même de fonctionnement (c'est à dire être capable d'apprendre).

Élaborer des plans dynamiques qui lance des processus internes ou au contraire les stoppent. L'adaptabilité est la capacité d'un agent de s'adapter à l'environnement dans lequel il est situé (Oliveira, 1998). Un agent adaptatif est un agent capable de contrôler ses aptitudes (communicationnelles et comportementales) selon l'environnement dans lequel il évolue et selon l'agent avec lequel il interagit (Guessoum, 1996).

L'adaptabilité est une propriété très importante pour un agent qui évolue dans un environnement dynamique.

- **Sociabilité**

La sociabilité est la capacité d'un agent de s'intégrer dans un environnement peuplé d'agents avec qui il échange des messages pour accomplir un but (Oliveira, 1998).

Nous reviendrons sur cette propriété lorsque nous aborderons les propriétés d'un SMA car elle intègre d'autres propriétés telles que la communication, la coopération et la délégation.

- **Apprentissage**

L'apprentissage est une propriété assez particulière car un agent n'est pas forcément une entité capable d'apprendre. Les agents peuvent avoir à apprendre lorsqu'ils réagissent et/ou interagissent avec leur environnement externe (Nwana, 1996).

L'apprentissage est une propriété qui fournit aux systèmes la capacité d'acquérir la compréhension de certains comportements au cours du temps, sans nécessiter que ces comportements soient programmés manuellement (Guessoum & all, 2006).

2.3.3. Qu'est-ce qu'un système multi-agents ?

Précédemment on a présenté des systèmes où il n'y avait qu'un seul agent mais, dans la plupart des situations réelles, l'agent n'est pas seul dans son environnement, il y a d'autres agents présents autour de lui. Il nous faut donc aborder des systèmes où plusieurs agents doivent interagir entre eux pour effectuer leurs tâches. De tels systèmes sont appelés « systèmes multi agents » et ils possèdent les caractéristiques principales (Jennings & all, 1998) suivantes :

- chaque agent a des informations ou des capacités de résolution de problèmes incomplètes,
donc chaque agent a un point de vue limité ;
- il n'y a pas de contrôle global du système ; les données sont décentralisées ;
- les calculs sont asynchrones.

La définition d'un système multi-agents (avec son acronyme SMA, et MAS pour « multiagent system » en anglais) est plus immédiate : « Un ensemble d'agents qui agissent (et interagissent) dans un environnement commun ». Nous ne faisons que suivre ici la définition usuelle du terme système : « un ensemble organisé d'éléments ». Cela signifie que dans un système multi-agent, il existe une ou plusieurs organisations qui structurent les règles de cohabitation et de travail collectif entre agents (définition des différents rôles, partages de ressources, dépendances entre tâches, protocoles de coordination, de résolution de conflits, etc.). Dans un même système, il existe en général plusieurs organisations et un même agent peut appartenir à plusieurs simultanément. Des exemples d'organisations d'agents dans le monde réel sont une organisation économique telle qu'une entreprise, mais aussi une organisation animale telle qu'une fourmilière.

Selon (Ferber, 1995) : On appelle système multi-agent (ou SMA), un système composé des éléments suivants:

1. Un environnement E, c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
2. Un ensemble d'objets O. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que, pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E. Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
3. Un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers ($A \subseteq O$), lesquels représentent les entités actives du système.
4. Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
5. Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O.
6. Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers.

2.3.4. Typologie d'agents dans un SMA

La topologie se réfère à l'étude de type des agents en se basant sur les critères suivants : (leur dynamique, leur capacité de raisonnement, leurs caractéristiques et leurs rôles).

En plus de leurs caractéristiques d'autonomie, organisation, raisonnement, mobilité et apprentissage, (Jennings, 1998), on peut définir quelques types d'agents. On définit classiquement deux catégories d'agents : les agents *réactifs* et les agents *cognitifs*.

- **Les agents réactifs sont définis uniquement à partir de lois de type stimulus/réponse. Ils permettent de modéliser des comportements très fins, mais ne possèdent pas d'états internes.**
- **les agents cognitifs sont dotés d'une représentation symbolique de leur environnement.**

Il est souvent nécessaire de combiner ces deux types d'agents pour modéliser des systèmes complexes.

2.3.4.1. Les agents réactifs

L'idée d'architectures d'*agents réactifs* a été essentiellement introduite par Brooks (Brooks 1991). Les architectures *réactives*, dites aussi *comportementales*, se caractérisent par des agents qui ont la capacité de réagir rapidement à des problèmes simples, qui ne nécessitent pas un haut niveau de raisonnement, comme son nom l'indique, un agent réactif ne fait que réagir aux changements qui surviennent dans leur environnement ou aux messages provenant des autres agents. Autrement dit, un tel agent ne fait ni délibération ni planification, il se contente simplement d'acquérir des perceptions et de réagir à celles-ci en appliquant certaines règles prédéfinies. Étant donné qu'il n'y a pratiquement pas de raisonnement, ces agents peuvent agir et réagir très rapidement.

Il convient de remarquer que les humains aussi utilisent cette manière d'agir. Dans plusieurs situations, il est souvent préférable de ne pas penser et de réagir immédiatement. Par exemple, lorsqu'une personne met la main sur une plaque très chaude, elle ne commence pas à se demander si c'est chaud, si ça fait mal et s'il faut ou non qu'elle retire sa main. Dans ce cas, elle retire sa main immédiatement, sans réfléchir, et c'est cette rapidité de réaction qui lui permet de diminuer les blessures. Cet exemple montre bien que ce type de comportement réflexe est essentiel pour les êtres humains. De la même manière, il est aussi essentiel pour les agents s'ils veulent pouvoir agir dans le monde réel.

En effet, leurs décisions sont essentiellement basées sur un nombre très limité d'informations et sur des règles simples de type *situation - action* (Müller, 1996). Ce type d'architectures ne nécessite aucune représentation symbolique de l'environnement réel. Ces agents ne disposent que d'un protocole de communication et d'un langage de

communication réduits (Guessoum, 1996). Dans un système à base d'agents réactifs, l'intelligence émerge de l'interaction des agents avec leur environnement.

2.3.4.2. Les agents cognitifs

Les agents cognitifs ont la capacité de résoudre des problèmes complexes. Ils sont ainsi capables de raisonner sur une base de connaissances, de traiter des informations diverses liées au domaine d'application et des informations relatives à la gestion des interactions avec d'autres agents et avec l'environnement (Guessoum, 1996). Ces agents maintiennent une représentation interne de leur monde et un état mental explicite qui peut être modifié par un raisonnement symbolique (Müller, 1996).

Les SMAs cognitifs ont deux problèmes majeurs (Guessoum, 1996) :

- la traduction de l'univers de l'agent en une description symbolique ;
- la représentation symbolique des informations de l'univers complexe des entités et des processus ainsi que la manière de raisonner sur ces informations.

Les agents cognitifs sont des agents qui effectuent une certaine délibération pour choisir leurs actions. Une telle délibération peut se faire en se basant sur les buts de l'agent ou sur une certaine fonction d'utilité. Elle peut prendre la forme d'un plan qui reflète la suite d'actions que l'agent doit effectuer en vue de réaliser son but.

AGENTS COGNITIFS	AGENTS REACTIFS
Représentation explicite de l'environnement	Pas de représentation explicite
Peut tenir compte de son passé	Pas de mémoire locale
Agents complexes	Fonctionnement stimulus/action
Nombre d'agents réduit	Nombre d'agents élevé

2.3.4.3. Les agents hybrides

Les sections précédentes ont présenté deux types d'architectures : réactive et cognitive.

- Les architectures purement réactives ont un comportement assez simpliste,
- Alors que les architectures cognitives utilisent des mécanismes de raisonnement qui ne sont pas faciles à manipuler et qui ne sont pas suffisamment réactifs.

Chacune de ces architectures est appropriée pour un certain type de problème.

Pour la majorité des problèmes cependant, ni une architecture complètement réactive, ni une architecture complètement cognitive n'est appropriée. Comme pour les humains, les agents doivent pouvoir réagir très rapidement dans certaines situations (comportement réflexe), tandis que dans d'autres, ils doivent avoir un comportement plus réfléchi.

Afin d'apporter une réponse à ces imperfections, une architecture conciliant à la fois des aspects réactifs et cognitifs est requise. On parle alors d'architecture hybride, dans laquelle on retrouve généralement plusieurs couches logicielles (Müller, 1996). L'idée principale est de structurer les fonctionnalités d'un agent en deux ou plusieurs couches hiérarchiques qui interagissent entre elles afin d'atteindre un état cohérent de l'agent.

2.3.5. L'interaction

- Toute action qui affecte l'agent dans la réalisation de son but, de sa tâche.
- Mise en relation dynamique d'agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques.
- Existence d'une interaction lorsque la dynamique propre d'un agent est perturbée par les influences des autres agents.

Il existe deux formes d'interaction entre agents :

- Interaction directe : Un agent communique par envoi de messages asynchrone vers un autre agent ou ensemble d'agents.
- Interaction indirecte : La communication est réalisée au travers de l'environnement.

2.3.6. L'environnement

- Espace commun aux agents d'un SMA, doté d'un ensemble d'objets et de possibilité de perception et d'action.
- Environnement = Tout ce qui n'est pas agent dans un SMA • Médium de l'interaction : signaux trace, ...
- Lieu où les actions sont réalisées et dans lequel des réactions perçues
- Un espace définissant des métriques spatiales : grilles, repère, ...
- Une source de données pour les agents.

2.4. La simulation multi agents

Simulation multi-agents est une application spécifique des systèmes multi-agents utilisée principalement pour simuler les interactions entre plusieurs agents dans un environnement contrôlé. L'objectif est souvent d'étudier des phénomènes complexes qui émergent des interactions d'agents individuels suivant des règles simples.

La **simulation des systèmes multi-agents** permet de modéliser et d'analyser le comportement collectif d'agents autonomes dans un environnement donné. Ces simulations offrent des perspectives précieuses pour comprendre les interactions complexes et prédire les impacts potentiels de différentes stratégies.

Cela est particulièrement utile dans des domaines comme l'économie, les sciences sociales, la biologie et la gestion du trafic, où il est complexe de prévoir les résultats basés sur les actions individuelles.

2.5. Logiciels de simulation des systèmes multi-agents

Plusieurs logiciels sont dédiés à la simulation des systèmes multi-agents :

2.5.1. NetLogo est l'un des environnements les plus utilisés pour l'enseignement et la recherche en simulation multi-agents.

Caractéristiques

- Langage de programmation simple et intuitif.
- Interface graphique intégrée.
- Bibliothèque riche de modèles prédéfinis.
- Exécution rapide de simulations avec visualisation en temps réel.

Avantages

- Très adapté à l'enseignement.
- Courbe d'apprentissage faible.
- Bonne visualisation des interactions agents-environnement.

Inconvénients

- Performances limitées pour des simulations de grande taille.
- Flexibilité réduite pour des modèles très complexes.

2.5.2. AnyLogic est un outil de simulation puissant combinant plusieurs paradigmes : événements discrets, dynamique des systèmes et simulation multi-agents, très utilisées dans l'industrie.

Caractéristiques

- Basé sur le langage Java.
- Environnement professionnel.
- Support de modèles hybrides.
- Animation avancée et analyse statistique intégrée.

Avantages

- Très flexible et extensible.
- Adapté aux applications industrielles.
- Support des grandes simulations.

Inconvénients

- Version complète payante.
- Complexité plus élevée.

2.5.3. Repast (Recursive Porous Agent Simulation Toolkit) est un framework flexible pour créer des simulations agent-based, populaire dans la communauté académique.

Caractéristiques

- Implémentation en Java, Python ou C#.
- Séparation claire entre modèle et visualisation.
- Forte orientation recherche.

Avantages

- Grande flexibilité.
- Performances élevées.
- Approprié pour des modèles scientifiques avancés.

Inconvénients

- Courbe d'apprentissage plus importante.
- Moins intuitif pour les débutants.

2.5.4. GAMA est une plateforme dédiée à la modélisation et la simulation multi-agents spatialisées.

Caractéristiques

- Langage dédié (GAML).
- Support des données géographiques (SIG).
- Visualisation 2D et 3D.
- Exécution de simulations à grande échelle.

Avantages

- Très performant pour les systèmes spatiaux.
- Forte expressivité du langage.
- Open-source.

Inconvénients

- Langage spécifique à apprendre.
- Communauté plus restreinte que NetLogo.

2.5.5. JADE (Java Agent Development Framework) est un framework orienté vers les systèmes multi-agents distribués.

Caractéristiques

- Conformité aux standards FIPA.
- Communication inter-agents avancée.
- Applications réseau et distribuées.

Avantages

- Très adapté aux systèmes communicants.
- Architecture robuste.

Inconvénients

- Peu orienté visualisation.
- Moins adapté à la simulation pure.

2.6. Exemples d'application de la simulation multi-agents

La simulation multi-agents est particulièrement adaptée à l'étude des systèmes complexes caractérisés par des interactions locales, une hétérogénéité des comportements et l'émergence de phénomènes globaux. Cette section présente plusieurs domaines d'application majeurs de la SMA.

2.6.1. Systèmes de transport et mobilité

La SMA est largement utilisée pour modéliser les systèmes de transport, où chaque entité agit de manière autonome.

Exemples

- Simulation du trafic routier (véhicules comme agents).
- Modélisation du comportement des piétons dans les gares et aéroports.
- Étude des embouteillages et des phénomènes de congestion.

Objectifs

- Optimisation des feux de circulation.
- Évaluation de politiques de mobilité urbaine.
- Analyse de la sécurité et des flux.

2.6.2. Systèmes économiques et marchés

Dans les modèles économiques, les agents représentent des acteurs individuels prenant des décisions rationnelles ou adaptatives.

Exemples

- Simulation de marchés financiers.
- Modélisation de l'offre et de la demande.
- Étude de la formation des prix et des bulles spéculatives.

Apports de la SMA

- Prise en compte de l'hétérogénéité des agents.
- Étude de comportements émergents non prévisibles analytiquement.

2.6.3. Sciences sociales et comportement collectif

La SMA permet de représenter les interactions sociales et les dynamiques collectives.

Exemples

- Modèles de ségrégation résidentielle (modèle de Schelling).
- Diffusion des opinions et des rumeurs.
- Propagation de normes sociales.

Intérêt

- Compréhension des mécanismes d'émergence.
- Analyse de scénarios « what-if ».

2.6.4. Biologie et écologie

Les systèmes biologiques sont naturellement composés d'agents interagissant localement.

Exemples

- Dynamique prédateur-proie.
- Modélisation de colonies d'insectes.
- Propagation d'espèces dans un habitat.

Avantages

- Modélisation individuelle plutôt que populationnelle.
- Représentation réaliste des comportements adaptatifs.

2.6.5. Épidémiologie et santé publique

La SMA est un outil puissant pour étudier la propagation des maladies.

Exemples

- Simulation de la diffusion d'une épidémie.
- Étude de l'impact de mesures de prévention.
- Modélisation des comportements individuels face au risque.

Indicateurs analysés

- Nombre de personnes affectées.
- Vitesse de propagation.
- Efficacité des stratégies de contrôle.

2.6.6. Systèmes industriels et logistiques

La SMA permet de modéliser des systèmes de production et de logistique décentralisés.

Exemples

- Gestion d'entrepôts automatisés.
- Coordination de robots industriels.
- Optimisation des chaînes d'approvisionnement.

Bénéfices

- Flexibilité des modèles.
- Simulation de scénarios complexes.

2.6.7. Informatique et réseaux

Les réseaux informatiques sont des systèmes distribués par nature.

Exemples

- Simulation de réseaux de communication.
- Modélisation de protocoles distribués.
- Étude de la cybersécurité.

2.6.8. Intelligence artificielle et systèmes autonomes

La SMA est à la base de nombreux systèmes intelligents.

Exemples

- Essaims de robots.
- Algorithmes inspirés de la nature (fourmis, oiseaux).
- Systèmes coopératifs autonomes.

2.7. Conclusion

La simulation multi-agents offre un cadre puissant pour analyser des systèmes complexes où les interactions locales donnent naissance à des comportements globaux émergents. Elle est aujourd'hui utilisée dans de nombreux domaines scientifiques, industriels et sociétaux.

La SMA constitue un complément essentiel aux approches analytiques classiques et ouvre la voie à des méthodes de modélisation modernes et interdisciplinaires.