**Chapitre 1 : Simulation et introduction aux agents**

**1-Simulation informatique**

La simulation informatique peut être assimilée, d'après Fishwick, à l'association des trois activités suivantes :

* Conception du modèle d'un système réel ou théorique
* Exécution de ce modèle sur un ordinateur
* Analyse des résultats de cette exécution

La conception du modèle associe la réalité à une représentation de celle-ci, en utilisant des données la plupart du temps formalisées. Il peut s'agir d'observations réelles (valeurs numériques) ou de connaissances sur le sujet. Ces entrées sont traduites en algorithmes qui seront exécutées dans le but de produire des données compatibles avec les observations.


*Figure 1. Vue de la simulation par Fishwick*

Fishwick définit trois étapes pour la construction de simulations : conception, exécution et analyse des résultats (Figure 1). La *conception* est la construction du modèle de simulation à partir d’une description du monde réel. Cela revient à identifier les objets du monde, leurs interactions, ainsi que la définition de la fonction de mise à jour. L’*exécution* consiste à définir des hypothèses de départ et de réaliser des simulations sur la base des hypothèses choisies. L’*analyse* des résultats de l’exécution permet des comparaisons entre la dynamique du système réel et celle du système simulé.

Le problème que pose cette approche est lié à la traduction du modèle initial en un modèle exécutable par l'ordinateur. En effet il n’existe aucune phase intermédiaire entre la phase de conception et d'implémentation.

C'est pourquoi Gilbert et Troitzch ont cherché à raffiner un peu ce diagramme. Ils mettent en évidence le fait qu'à l'heure actuelle, aucun langage de programmation n'est capable de fournir suffisamment de guides pour la construction du programme de simulation (structuré, efficace, compréhensible aussi bien par le modélisateur que par l'informaticien...). Ils ajoutent l'étape intermédiaire de *construction informatique du modèle* qui n'est pas si triviale que le suggère Fishwick.



*Figure 2. Proposition de Gilbert et Troitzch*

**2- Construction d’un modèle de simulation**

La problématique des méthodologies de construction de modèles de simulation à des fins pédagogiques ou scientifiques, peut être vue de plusieurs manières, suivant l’étape courante du processus de développement (amont, durant et aval).

**2.1- Niveaux de description**

Un modèle est une vue simplifiée d’une réalité, en se basant sur l’idéalisation et l’abstraction.

Un modèle n’a pas à se conformer à la réalité mais sa construction descriptive doit se rapprocher au mieux du système étudié en fonction des objectifs visés par ce modèle. Un bon modèle, utilisable, utile et capable de fournir des affirmations correctes n’a pas besoin d’être nécessairement complexe ou difficile.

Plusieurs auteurs soulignent l’importance de la distinction entre un modèle et un réplica

[Axelrod , Troitzsch , Macrae, Edmonds, … Un réplica est une copie intégrale du système étudié, ce qui est impossible lorsqu’il s’agit de modéliser un système complexe. Le système simulé est en général décomposé en niveaux, où chaque sous-système représente une entité ou un objet, pouvant calculer et communiquer un état interne. La simulation est un système itératif où le système simulé est représenté et ses dynamiques sont calculées.

**2.2- Méthodologies pour la construction de modèles de simulation**

Au vue de la complexité des systèmes réels et modélisés, plusieurs efforts méthodologiques concernent le domaine de la théorie de la simulation [Fishwick (1996), Shannon (1998), Gilbert et Troitzsch (1999), Guyot et Drogoul (2004)]. L’évolution de ces approches a suivi l’étendue de l’utilisation des modèles de simulation dans des domaines divers et variés.

Shannon (1998) définit plusieurs tâches associées aux différentes phases de simulation :

**1**. Définition du problème : il s’agit de définir clairement les objectifs de l’étude, en d’autres termes, pourquoi ce problème est-il étudié et quelles sont les questions auxquelles une réponse est attendue ?

**2**. Planification du projet : il s’agit ici d’être sûr de la disponibilité des ressources humaines et matérielles que nécessite le projet de simulation.

**3**. Définition du système : le but dans cette étape est de déterminer les limites et les restrictions utilisées pour la définition du système et ses règles de fonctionnement.

**4**. Formulation du modèle conceptuel : durant cette phase, un premier modèle est élaboré de manière graphique ou en utilisant un pseudo code. Il s’agit de définir les différentes entités qui composent le système : sous-systèmes (composants), variables descriptives et les interactions entre composants.

**5**. Conception expérimentale préliminaire : il s’agit de définir les mesures d’efficacité pour évaluer la qualité de l’expérimentation. Autrement dit, quels sont les paramètres à faire varier et avec quelle amplitude ?

**6**. Préparation des données en entrée : il s’agit de déterminer et de collecter les données qui sont nécessaires pour le paramétrage du modèle.

**7**. Transcription du modèle : consiste à convertir le modèle élaboré dans un langage de simulation de manière à permettre son implémentation sur machine.

**8**. Vérification et validation : il s’agit ici de vérifier (débuguer) le bon fonctionnement du simulateur et que les résultats obtenus par celui-ci sont acceptables et représentatifs du système réel.

**9**. Conception expérimentale finale : à ce stade de la conception, il convient de déterminer les expérimentations (ou scénarios) qui sont en mesure de fournir les résultats désirés et de déterminer comment mener ces expérimentations.

**10**. Expérimentation : la simulation proprement dite est exécutée de manière à récupérer les résultats désirés et à effectuer une analyse de sensibilité du modèle aux paramètres initiaux.

**11**. Analyse et interprétation des résultats : une fois les simulations effectuées, il s’agit d’inférer des conclusions sur le modèle à partir des résultats obtenus.

**12**. Utilisation et documentation : outre les conclusions tirées de l’expérimentation, le modèle et son utilisation doivent être clairement documentés.

L’organigramme de la figure 3 représente le processus proposé par Shannon. Plusieurs rétrocontrôles (feedbacks) sont nécessaires après les étapes de validation et d’interprétation. En effet, le raffinement du modèle de simulation impose une construction itérative des simulations. En ingénierie du logiciel, cette démarche conduit à la règle de développement "40-20-40". Autrement dit, les efforts et le temps de construction du modèle doivent allouer 40% du temps total aux étapes préparatoires 1 à 6 d’analyse et de conception du modèle, 20% pour l’étape 7 de transcription du modèle, et les 40% restantes pour les étapes 8 à 12 de validation, expérimentation et raffinement du modèle.



*Figure 3. Etapes de construction d’une simulation informatique [Shannon (1998)]*

**2.3- Phase d’analyse**

Étudier la construction d’un modèle de simulation nécessite d’analyser brièvement quelques courants de pensées. Ces derniers peuvent être regroupés en deux catégories principales, en fonction de l’objectif escompté par la simulation : l’approche systémique (descendante) et l’approche ascendante.

**Approche systémique**

Le système est décrit comme une organisation d’éléments en interactions. L’interaction dans ce contexte est considérée comme un échange (transfert de matière, d’énergie ou d’information), comme un passage d’une quantité d’un élément du système à un autre, ayant comme conséquence une transformation du système. Il est aussi intéressant de souligner les notions de temps et d’espace, qui opèrent sur l’évolution du système. La démarche systémique consiste donc en la recherche des lois d’organisation et de fonctionnement du système considéré. Elle est composée de trois étapes principales [Bousquet (1995)] :

1. Reconnaissance du système étudié, qui vise à définir les frontières du système réel.

2. Décomposition du système en sous-systèmes, qui sont analysés indépendamment ;

3. Recomposition du système, qui vise à construire une représentation globale du système.

C’est une étape de juxtaposition des connaissances acquises des différents sous-systèmes identifiés.

**Approche ascendante**

Une deuxième pensée d’analyse est de choisir comme objet d’étude les différents individus et leurs interactions pour rechercher les conditions d’une possible organisation. Cette approche s’intéresse à l’étude de la relation "du local vers le global", autrement dit, comment les interactions entre les individus du niveau inférieur peuvent créer une organisation au niveau supérieur. L’approche ascendante aborde aussi le principe d’émergence qui se pose dans plusieurs disciplines.

Adopter une approche ascendante nécessite dans un premier lieu de s’interroger sur les unités élémentaires observables et sur les organisations étudiées.

**2.4- Phase de conception**

La conception correspond au processus de définition d’une représentation structurée pour la résolution de problèmes souvent non structurés à la base. Cette définition peut s’appuyer sur des langages de description spécifiques.

Définir les limites d’un modèle et du degré de raffinement suffisant reste l’une des tâches des plus difficiles en modélisation. En général, la précision (en termes du nombre de données et d’hypothèses représentées dans le modèle) est importante lorsque l’objectif est la prédiction alors que la simplicité est avantageuse si l’objectif du modèle est la compréhension du fonctionnement du système. La conception d’un modèle consiste donc à choisir des hypothèses structurelles et fonctionnelles, qui sont représentées et intégrées dans un outil informatique.

**2.5- Phase d’implémentation**

Une fois le modèle conçu, il faut l’implémenter pour pouvoir valider les hypothèses du concepteur. L’implémentation correspond au processus de construction d’une solution fonctionnelle du modèle. Une telle solution peut être un programme informatique spécifique ou une composition d’un ensemble de packages ou de plateformes de développement et de simulation. Dans le cas où l’option "création d’une solution spécifique" est choisie, alors le programmeur doit choisir un langage de programmation. Une fois le langage de programmation choisi, l’implémentation est réalisée suivant un processus itératif (édition, compilation et exécution), qui doit aboutir à un programme pouvant renvoyer les résultats escomptés.

**2.6- Phase de validation**

La simulation étant implémentée, la prochaine étape est de vérifier que l’outil construit réalise effectivement ce qui a été prévu. La validation d’un modèle ne se restreint pas seulement à la vérification du bon fonctionnement de son outil. La validation n’est pas uniquement une procédure qui permet de tester une théorie scientifique ou de certifier la pensée scientifique mais elle peut être un moyen pour décider si un modèle est acceptable en fonction de son utilisation possible et d’en confronter ses résultats à ceux attendus.

La validation dans le cycle de modélisation peut être considérée à différents niveaux (Figure 4) [Rykiel (1996)] :



*Figure 4. Cycle de création d’un modèle informatique et aperçu des différents niveaux de*

*validation, selon* [Rykiel (1996)]

– Validation des données : permet de certifier que les données sont représentatives du système réel et constituent le meilleur test pour le modèle ;

– Validation conceptuelle : permet de vérifier que les théories et les hypothèses qui sont à la base du modèle conceptuel sont correctes et justifiables, et que la structure du modèle, ses relations logiques, mathématiques et causales sont correctes par rapport à l’utilisation attendue. En assurant la validité du modèle, la validation conceptuelle ne garantit toutefois pas la validité de ses résultats.

– Validation opérationnelle : il s’agit de démontrer que les capacités du modèle sont valables dès le départ du processus de construction jusqu’à ce que les performances souhaitées soient atteintes. Une telle tâche peut conduire à une comparaison entre les données simulées et celles attendues par observation et mesure dans le monde réel.

**2.7- Phase d’expérimentation**

Une fois le modèle implémenté, l’étape de simulation doit être préparée. En se basant sur les résultats souhaités par les scientifiques (utilisateurs de l’outil de simulation), plusieurs plans d’expérimentation doivent être élaborés. Le problème soulevé durant cette phase est la détermination de la durée de la simulation. Shannon définit deux types de systèmes : *délimité* (terminating system) et *non-délimité* (non terminating system). Une simulation délimitée s’exécute jusqu’à l’apparition d’un certain évènement de terminaison (ex. une variable "compteur" atteint la valeur 0). Dans une simulation non-délimitée, des conditions de convergence doivent être vérifiées. Ces conditions permettent de statuer sur l’aboutissement du système dans un état stable, en d’autres termes, l’exécution de nouvelles itérations ne changent pas le résultat de la simulation. L’analyse des résultats des simulations est réalisée par des analyses statistiques permettant d’évaluer, notamment la sensibilité de la simulation et le taux d’erreur.

**3- Agent et systèmes multi agent**

**3.1- Concept d’agent**

Le concept d’agent est devenu central en IAD (intelligence artificielle distribuée), de nombreuses définitions en ont été données. En voici quelques unes :

« Des agents sont des composants (informatiques) actifs et persistants qui perçoivent, raisonnent, agissent et communiquent. »

Cette définition proposée par Huhns et Singh (1998) met en avant les capacités des agents mais ne mentionne pas la notion d’autonomie qui suppose que l’agent soit doté de buts qu’il cherche à réaliser sans intervention extérieure.

« Un agent est un système informatique, situé dans un environnement et qui est capable de réaliser de façon flexible et autonome des actions de façon à atteindre ses objectifs. »

Cette deuxième définition, proposée par Jennings et al. (1998) insiste sur l’autonomie et la finalité d’un agent qui existe dans un environnement.

Nous pouvons citer d’après ces définitions un ensemble de caractéristiques minimales qui correspondent à la définition du concept d’agent :

* **Autonomie :** les agents contrôlent leurs actions et leurs états internes. Le système dans son ensemble est capable de réagir sans l’intervention d’un humain ou d’un autre agent. Il n’y a pas de définition unique du terme agent, par contre, il y a un consensus général pour considérer l’autonomie comme notion centrale de l’agent.
* **Situé** : L’agent fait partie et participe à la modification de son environnement
* **Réactivité** *:* ils perçoivent leur environnement et réagissent aux changements qui s’y produisent dans le temps requis ;
* **Proactivité** *:* ils exhibent un comportement proactif et opportuniste pour ne pas agir uniquement par réaction à leur environnement mais prendre des initiatives selon leurs buts individuels ;
* **Sociabilité** *:* ils sont capables d’interagir les uns avec les autres quand la situation l’exige afin d’accomplir leurs tâches ou d’aider les autres agents à accomplir leurs buts.

Ces caractéristiques sont dites minimales car elles ne présupposent riens sur l’intelligence et les capacités cognitives des agents. Ces capacités cognitives permettent de distinguer des agents cognitifs et des agents réactifs.

* Un agent de type réactif est constitué d’un ensemble de comportements permettant d’accomplir une tâche donnée. Chaque comportement est une machine à états finis qui établit une relation entre une entrée sensorielle et une action en sortie
* Un agent cognitif ou délibératif suit un cycle Perception */Délibération/Action* comme le montre la Figure 5. On dit aussi que ces agents sont intentionnels car ils possèdent des buts et des plans explicites leurs permettant d’accomplir leurs buts.



Figure 5 : Cycle Perception / Délibération/ Action d’un agent cognitif [Wooldridge, 1999]

**3.2- Systèmes multi agents**

Parmi les différentes définitions des systèmes multi-agents nous retiendrons celle de Ferber [Ferber, 1995] qui le définit comme un système composé des éléments suivants (Figure 6):

1. *Un Environnement E, c’est-à-dire un espace disposant 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* ⊆*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 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.*

**

Figure 6 : Représentation imagée d’un agent en interaction avec son environnement et les autres agents [Ferber, 1995]

**Les avantages**

L’utilisation des Systèmes Multi-Agents (SMA) présente une série d’avantages:

- ***Système dynamique****. C*ontrairement aux approches traditionnelles de l’Intelligence Artificielle qui simulent, dans une certaine mesure, les capacités du comportement humain, les SMA permettent de modéliser un ensemble d’agents qui interagissent. Les agents sont structurés afin d'exercer une influence sur chacun pour faire évoluer le système dans son ensemble (système dynamique). On rencontre de nombreuses interactions entre agents telles que la **coordination** (organiser la résolution d’un problème de telle sorte que les interactions nuisibles soient évitées, ou que les interactions bénéfiques soient exploitées), la **négociation** (parvenir à un accord acceptable pour toutes les parties concernées), la **coopération** (travailler ensemble à la résolution d’un but commun). Cette approche est particulièrement bien adaptée à la simulation des systèmes complexes dont le fonctionnement global émerge des actions des individus. Les SMA permettent de faire vivre virtuellement des agents autonomes sur ordinateur et d’y effectuer des expériences difficiles, voire impossible à mener dans la réalité, d’où la qualification de laboratoires virtuels.

*-****Une résolution distribuée de problèmes****.* Il est possible de décomposer un problème en sous parties et de résoudre chacune de façon indépendante pour aboutir à une solution stable. Cette solution n’est pas forcement optimale au sens de la rationalité complète mais elle peut être « satisfaisante ».

- Les SMA peuvent « répondre » de l’échec individuel d’un des éléments, sans dégrader le système dans son ensemble.

**4- Simulation orientée Agent**

L’apport des systèmes multi-agents vient de leur capacité à représenter aussi bien les comportements individuels que leur organisation collective. La modélisation multi-agents peut fournir un puissant outil, là où la limite de la modélisation mono-agent apparait.

La construction d’une simulation à base de SMA suit plusieurs étapes:

– Un système multi-agents est construit suivant une approche de conception (abstraction, conception et implémentation) ;

– Des simulations sont réalisées à partir du simulateur construit, suivant certaines hypothèses ;

– Les résultats des simulations sont analysés ;

– Des leçons sont à apprendre par interprétation des résultats de l’analyse. Des comportements possibles du système cible peuvent émerger, des déductions peuvent être faites à partir des hypothèses de la simulation.

Les simulations multi-agents ne cherchent pas à résoudre des problèmes mais s’intéressent à des phénomènes réels. Par exemple, une simulation multi-agents conçue pour représenter et étudier les migrations intra-urbaines d’une ville.

**Simulation sociale multi-agents**

La simulation sociale à base d’agents artificiels est l’*utilisation de la technologie des agents pour simuler les phénomènes sociaux*. Dans le cadre d’une simulation sociale basée sur des agents artificiels, deux catégories de modèles peuvent être considérés. Le premier mode considère l’individu comme unité d’abstraction. Ce type de modèles est généralement utilisé pour la compréhension de systèmes multi acteurs. Les acteurs dans ce cas, peuvent représenter des humains, des robots ou des programmes. L’objectif de la simulation est de chercher à comprendre ou à évaluer l’impact des comportements individuels (niveau micro) sur le collectif (niveau macro). Le deuxième mode, considère un groupe d’individus comme unité d’abstraction. L’objectif ici est d’étudier l’émergence de structure organisationnelles ou encore l’auto-organisation.