

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE



SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE 20 AOUT 1955 - SKIKDA
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE



Mémoire de fin d'études
Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Informatique
Option : Systèmes Informatiques

Thème

Modélisation et Simulation basée systèmes
Multi-Agents du virus biologique VIH
(Système Immunitaire Humain)

Présenté par

- BOUATTIT Romeila
- BOULKAIBET Chadia

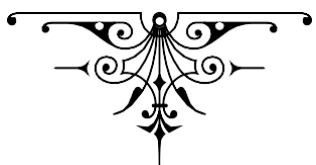
Encadré par

- Dr. BENOUDINA Lazhar

Session: Juin 2023



Remerciement



Au terme de ce travail, on tient à remercier **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné la foi et de nous avoir permis d'en arriver là.

On tient à exprimer nous profonde gratitude à notre cher professeur et encadrant **Dr.Benoudina Lazhar** pour son suivi et pour son énorme soutien, qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de la période du projet. N'adressons aussi nos vifs remerciements aux membres des jurys pour avoir bien voulu examiner et juger cetravail.

Nous ne laisserons pas cette occasion passer, sans remercier tous les enseignantes le personnel de l'université de 20 Aout 1955 Skikda, et particulièrement ceux de la section de département d'informatique pour leur aide et leurs précieux conseils et pour l'intérêt qu'ils portent à nos formation.

Enfin, nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce projet.



A decorative gold-colored geometric frame, resembling a stylized 'H' or a series of overlapping lines, surrounds the text. The frame is adorned with floral and dried plant accents. On the top left, there is a cluster of white flowers, including a large white rose and several smaller white flowers, along with dried palm fronds and other botanical elements. On the bottom right, there is a large dried palm frond and other botanical elements.

Dédicace

A mes parents ...

Mes amies ...

Ma famille ...

Tous ceux qui m'aiment ...

Et spécialement à moi

< **ROMEILA** > ...



Dédicace

Je dédie mon travail à :

Ma chère mère : *A celle qui m'a porté alors qu'ils étaient faibles, A celle qui m'a confié ses bonnes prières, grâce auxquelles je suis ici à la source de la tendresse A ce sage, ma bien-aimée, ma chère mère – que dieu te protège et prolonge ta vie-*

Mon chère père : *A celui qui a travaillé et souffert pour mes études, à celui qui a donné et n'a pas demandé, à celui qui a souhaité ma venue ici, à cet homme qui lutte et qui est inébranlable, à la prunelle de mes yeux, mon chère père –que dieu te protège et prolonge ta vie-*

*A mes chers frères **Abdelfattah, Khair-Eddine***

*A **Mon chers fiancé Mohamed** pour sa grande aide et ces précieux conseils, son encouragement toute la durée du travail et étude*

*A **Assia, Meriem, Samia, chaima, Nihad et Roummaissa** chères amies du parcours universitaire*

*A mon binôme **Romeila***

*A tout ma famille **Boulkaibet, karar et Khemise**, A tous mes amies, A tout ceux qui j'aime, A tout ceux qui m'aime, **A toute la promotion de Master 02: SI**, A tout ceux qui ont contribué de près ou de loin de ce travail, A tous, je dédie le fruit de mes efforts, demandant à dieu tout-puissant la sincérité et l'acceptation dans mon travail. A tous ceux qui par un mot m'ont donné la force de continuer Merci*

Chadia



Tables de matières

RESUME

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1_Le virus biologique VIH

I. GENERALITE SUR LE VIRUS BIOLOGIQUE VIH.....	5
1. INTRODUCTION.....	5
2. LE SYSTEME IMMUNITAIRE.....	6
2.1. LES LYMPHOCYTES T CD8+	6
2.2. LES LYMPHOCYTES T CD4+	6
3. DEFINITION DU VIH (VIRUS DE L'IMMUNODEFICIENCE HUMAINE).....	7
4. STRUCTURE DU VIRUS VIH	8
5. SYMPTOMES DU VIH.....	9
6. LES VARIETES DU VIRUS VIH	9
7. PHASES DE L'INFECTION PAR LE VIH.....	10
7.1. LA PHASE DE PRIMO-INFECTION.....	10
7.2. LA PHASE DE LATENCE (ASYMPTOMATIQUE)	10
7.3. LA PHASE DU SIDA.....	11
8. CYCLE DE REPLICATION DU VIRUS VIH	11
9. CELLULES CIBLES DE L'INFECTION PAR LE VIH.....	13
10. LES MODES DE TRANSMISSION DU VIH	13
11. TRAITEMENT DU VIH.....	14
12. LE VIH ET LE SYSTEME IMMUNITAIRE.....	14

II .CONCLUSION	16
Chapitre 2 Modélisation et simulation des systèmes complexe	
I. INTRODUCTION	18
II .LA NOTION DE SYSTEME ET ECOSYSTEME	18
1. SYSTEME COMPLEXE	18
1.1. DEFINITION.....	18
1.2 SECTION DE SYSTEME.....	19
1.2.1 Les systèmes naturels	19
1.2.2 Les systèmes artificiels	20
1.3. TYPES DE SYSTEMES.....	20
1.3.1 .Systèmes continus	20
1.3.2. Systèmes discrets.....	21
1.3.3. Systèmes déterministes	21
1.3.4 .Systèmes indéterministes (stochastiques).....	21
1.4. L'INTERACTION AVEC L'ENVIRONNEMENT	21
2. ECOSYSTEME COMPLEXE	22
2.1 .DEFINITION DE L'ECOSYSTEME	22
2.2 .TYPES DES ECOSYSTEMES	22
2.2 .1 . Les écosystèmes forestiers	22
2.2 .2 . Les écosystèmes marins	22
2.2 .3 . Les écosystèmes de montagne	23
2.2 .4. Les écosystèmes de prairies :.....	23
2.2 .5 . Les écosystèmes urbains :.....	23
III.NOTIONS SUR LA MODELISATION ET LA SIMULATION DE SYSTEMES	23
1. MODELISATION DES SYSTEMES	24
1.1. DEFINITION DU SYSTEME	24

1.2 .OBJECTIF DE LA MODELISATION.....	24
1.3. TYPES DE MODELES.....	24
1.3.1. Modèle déterministe	24
1.3.2. Modèle stochastique	25
1.3.3. Modèle par simulation	25
1.3.4. Modèle physique	25
1.3.5. Modèle mathématique	25
1.3.6. Modèle informatique	25
1.4. QUALITES D'UN MODELE.....	25
1.4.1. La simplicité.....	26
1.4.2. La fidélité	26
1.4.3. La validité	26
1.4.4. L'efficience	26
1.5. PROCESSUS DE LA MODELISATION.....	26
1.5.1. Processus globale	26
1.5.2. Définition du problème.....	26
1.5.3. Objectifs et organisations	27
1.5.4. Analyse du système	27
1.5.5. Modélisation:.....	27
1.5.6. Collecte des données	27
1.5.7. Codage/ Implantation	27
1.5.8 Vérification	27
1.5.9. Validation.....	28
1.5.10. Exécution.....	28
1.5.11. Exploitation des résultats	28
1.5.12. Rapport final.....	28
1.5.13. Mise en service / capitalisation	29
1.2. OUTILS DE MODELISATION.....	29

1.2.1. Outils de modélisation mathématique	29
1.2.2. Outils de modélisation informatique	30
2. LA SIMULATION DES SYSTEMES	31
2.1. DEFINITION.....	32
2.2. TYPES DE SIMULATION	32
2.2.1. La simulation continue	32
2.2.2. La simulation discrète.....	32
2.2.3. La simulation par objet	33
2.2.4. La simulation par agents.....	33
2.3. AVANTAGES DE LA SIMULATION	33
2.4. DOMAINE D'APPLICATION DE LA SIMULATION.....	34
2.5 .BUTS DE LA MODELISATION ET DE LA SIMULATION.....	35
2.6. LA SIMULATION MULTI-AGENTS	35
2.6.1. Méthodologie de simulation Multi-Agents:	36
2.6.2. Intérêt de la simulation Multi-Agents :	36
2.6.3. Domaines d'applications de la simulation Multi-Agents :.....	37
IV. CONCLUSION.....	38

Chapitre 3 Les systèmes Multi-Agents

I. INTRODUCTION	40
II.HISTORIQUE ET ORIGINES	40
III.LA NOTION D'AGENT.....	41
1. DEFINITION D'UN AGENT	41
2. CARACTERISTIQUES DES AGENTS	42
2.1. AUTONOMIE.....	43
2.2. OBJECTIF	43
2.3. PERCEPTION.....	43

2.4. ADAPTABILITE	43
2.5. INTERACTION.....	43
2.6 .COMMUNICATION.....	43
2.7. RAISONNER.....	43
2.8. APPRENTISSAGE.....	43
3. DIFFERENTES CATEGORIES ET MODELES D'AGENTS.....	43
3.1. AGENTS COGNITIFS	44
3.1.1. Perception.....	44
3.1.2. Raisonnement	44
3.1.3. Prise de décision.....	45
3.1.4. Communication	45
3.1.5. Apprentissage :.....	45
3.2. AGENTS REACTIF.....	46
3.3. LES AGENTS HYBRIDES	47
4.DIFFERENCE ENTRE UN AGENTS ET UN OBJETS.....	48
5. LE COMPORTEMENT D'UN AGENT	49
IV. NOTION DU SYSTEME MULTI-AGENTS.....	50
1. DEFINITION UN SYSTEME MULTI-AGENTS.....	50
2. CARACTERISTIQUES DES SMA	51
3. LES SMAS ET LES AUTRES PARADIGMES DE LA PROGRAMMATION	52
3.1. LES SMAS ET L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	52
3.2. LES SMAS ET L'APPROCHE ORIENTE OBJET.....	52
4. AVANTAGES DU SMA	53
5. COMPOSANT D'UN SYSTEME MULTI-AGENTS.....	53
6. FORMES D'INTERACTION DANS LES SYSTEMES MULTI-AGENTS :.....	55

6.1. LA COOPERATION	55
6.2. LA COORDINATION	56
6.3. LA NEGOCIATION	56
7. DOMAINES D'APPLICATION DES SMA	56
8. LA COMMUNICATION DANS LES SMA	57
8.1. LES TYPES DE COMMUNICATION	57
8.1.1. Communication directe.....	57
8.1.2. Communication indirecte.....	58
9. LA SIMULATION MULTI-AGENTS.....	58
10. MODELISATION MATHEMATIQUE VS MODELISATION MULTI-AGENTS	59
11. LES PLATES-FORMES MULTI-AGENTS	60
11.1. JACK :	60
11.2. ZEUS	61
11.3. AGENT BUILDER	61
11.4. MADKIT	61
11.5. JADE	61
V. CONCLUSION	63

Chapitre 4 Conception et Implémentation

I.INTRODUCTION	65
II.MODELISATION MATHEMATIQUE (LE MODELE 3D)	65
III.MODELE MULTI-AGENTS	67
IV.IMPLEMENTATION	71
1. LA PLATE FORME MAD-KIT	71
2. LES AGENTS SOUS MADKIT	74

3. LE SCHEDULING	76
4. STRUCTURE ALGORITHMIQUE DES AGENTS	78
5. INTERFACE DU SIMULATEUR	79
6. RESULTATS :.....	83
6.1. EVOLUTION DES CD4 SANS INFECTION :.....	83
6. 2. MODELISATION DE L'INFECTION :.....	85
CONCLUSION GENERALE.....	89

Bibliographie

Liste des figures

01: le virus biologique VIH

Figure 01 : Schéma organisationnel du virus VIH.....	8
Figure 02 : Evolution de l'infection par le VIH.....	11
Figure 03 : Cycle de réplication du virus VIH.....	13

02 : Modélisation et Simulation des Systèmes Complexe

Figure 04 : Vue d'ensemble de la simulation informatique.....	32
---	----

03 : Les Systèmes Multi-Agents

Figure 05: Principes de fonctionnement d'un l'agent.....	42
Figure 06 : Structure d'un agent cognitif.....	46
Figure 07 : Structure générale d'un agent réactif dans un système Multi-Agents.....	48
Figure 08 : Modèle d'agents hybrides.....	49
Figure 09: Les trois phases du comportement d'un agent.....	50
Figure 10 : Systèmes Multi-Agents.....	52
Figure 11 : Communication par envoi de messages.....	58
Figure 12 : Communication par tableau noir.....	59

04 : conception et Implémentation

Figure 13 : Résultats de l'approche mathématique pour le modèle 3D.....	67
Figure 14 : Processus de l'infection.....	69
Figure 15 : Interactions entre les Agents cellules.....	70
Figure 16: Concepts (Agent/Groupe/Rôle) du modèle Aalaadin	71
Figure 17: Le Desktop de MADKIT.....	72
Figure 18 : Scheduling des agents du simulateur.....	77
Figure 19: Interface du simulateur.....	80
Figure 20 : Exemple d'évolution de l'infection.....	82
Figure 21 : Evolution des CD4 sans infection.....	83
Figure 22 : Extinction des CD4.....	84
Figure 23 : Résultats de l'approche Multi-agents pour le modèle 3D.....	86

Liste des tableaux

Tableau 01 : Domaine d'application de la simulation.....	34
Tableau 02: Comparaison entre agents cognitifs et agents réactifs.....	48

Glossaire

IDS: Intrusion Détection Systems

CTL : Cytotoxique T Lymphocyte

VIH : Virus de l'Immunodéficience Humaine

SMA : Le système Multi-Agents

IA : Intelligence Artificielle

DF: Directory Facilitator

ACC: Agent Communication Channel

AMS: Agent Management System

Résumé

Employée depuis longtemps comme modèle de simulation et modélisation, l'approche de modélisation Multi-Agents semble maintenant prometteuse en termes de sa capacité à gérer la complexité des systèmes étudiés. Dans cette étude, nous essayons de simuler la population cellulaire qui se développe pendant l'infection par le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) afin de démontrer l'efficacité de la technique Multi-Agents en la contrastant avec l'approche mathématique. Les résultats recueillis ont permis de démontrer comment les nombreuses cellules étudiées interagissaient et se comportaient conformément aux rapports biologiques.

Nous avons adopté une approche de simulation Multi-Agents afin d'obtenir des résultats satisfaisants. Nous avons utilisé l'outil logiciel MadKit comme plate-forme pour développer et exécuter notre simulateur.

Mots clés : Simulation Multi-Agents, simulation et modélisation, infection au VIH, bio-informatique, l'immunodéficience humaine, MadKit.

Abstract

Used for a long time as a model for simulation and modeling, the multi-agent modeling approach now seems promising in terms of its ability to manage the complexity of the systems studied. In this study, we try to simulate the cell population that develops during human immunodeficiency virus (HIV) infection to demonstrate the effectiveness of the multi-agent technique by contrasting it with the mathematical approach. The results collected demonstrated how the many cells studied interacted and behaved according to biological reports.

We have adopted a multi-agent simulation approach to obtain satisfactory results. We used the MadKit software tool as a platform to develop and run our simulator.

Key words: Multi-Agent Simulation, Simulation and Modeling, HIV infection, bio-informatics, human immunodeficiency, MAD-Kit.

الخلاص :

يستخدم لفترة طويلة كنموذج للمحاكاة والنمذجة ، يبدو نهج النمذجة متعددة العوامل الآن واعداد من حيث قدرته على إدارة تعقيد الأنظمة المدروسة. في هذه الدراسة ، نحاول محاكاة مجموعة الخلايا التي تتطور أثناء الإصابة بفيروس نقص المناعة البشرية (فيروس نقص المناعة البشرية) لإثبات فعالية تقنية العوامل المتعددة من خلال مقارنتها بالنهج الرياضي. أظهرت النتائج التي تم جمعها كيف تفاعلت الخلايا العديدة التي تمت دراستها وتصرفت وفقا للتقارير البيولوجية. لقد اعتمدنا نهج محاكاة متعدد العوامل للحصول على نتائج مرضية. استخدمنا أداة البرمجيات ميدكيت كمنصة لتطوير وتشغيل جهاز محاكاة لدينا.

الكلمات المفتاحية: محاكاة متعددة العوامل ، محاكاة ونمذجة ، عدوى فيروس نقص المناعة البشرية ، المعلوماتية الحيوية ، نقص المناعة البشرية ، جنون كيت.

Introduction générale

L'espèce humaine est l'une des populations qui coexistent dans ce monde. Elle n'est pas isolée mais a des liens étroits avec d'autres espèces, qu'elles soient végétales ou animales. C'est pourquoi l'homme a continuellement cherché à rechercher, à examiner, à comprendre et à prédire le développement de ces derniers afin d'améliorer les différentes facettes de sa vie quotidienne.

Le VIH est un virus biologique qui infecte les cellules du système immunitaire humain et est responsable du syndrome de l'immunodéficience acquise (SIDA). Il est un rétrovirus qui contient de l'ARN comme matériel génétique et utilise une enzyme appelée transcriptase inverse pour convertir son ARN en ADN. Le VIH peut être transmis par contact direct avec certains fluides corporels infectés, rapports sexuels non protégés, l'utilisation de seringues contaminées lors de l'injection de drogues et la transmission de la mère à l'enfant pendant la grossesse, l'accouchement ou l'allaitement. La prévention continue de l'infection, l'accès universel aux soins et traitements, ainsi que la recherche d'un vaccin efficace et d'un remède curatif sont des priorités pour la lutte contre le VIH/SIDA.

La modélisation et la simulation des systèmes complexes et des systèmes Multi-Agents sont des domaines de recherche et d'application qui permettent d'étudier et de comprendre le comportement et les interactions de systèmes complexes, composés d'entités autonomes et interconnectées.

La modélisation des systèmes complexes vise à représenter les différents éléments d'un système, ainsi que leurs relations et interactions, de manière à capturer les caractéristiques essentielles du système dans un modèle abstrait. Ces systèmes peuvent être issus de domaines variés tels que la biologie, l'économie, l'écologie, la physique, la sociologie, etc. Les modèles utilisés peuvent prendre la forme de graphes, d'équations mathématiques, de règles ou de processus informatiques, selon la nature du système étudié.

La simulation des systèmes complexes consiste à exécuter ces modèles dans un environnement informatique afin d'observer le comportement global du système et d'explorer les conséquences de différentes configurations et interactions. Les simulations permettent de tester des hypothèses,

Introduction Générale

d'anticiper les effets de décisions ou de politiques, et d'analyser les dynamiques temporelles et spatiales des systèmes complexes.

Les systèmes Multi-Agents (SMA) sont un type particulier de systèmes complexes dans lesquels les entités autonomes, appelées agents, interagissent entre elles pour atteindre leurs objectifs individuels et/ou collectifs. Chaque agent possède ses propres connaissances, capacités de perception et d'action, et peut prendre des décisions en fonction de son environnement et des interactions avec les autres agents. Les SMA sont utilisés pour modéliser et simuler des phénomènes tels que le trafic routier, la dynamique sociale, les marchés financiers, les systèmes écologiques, etc.

La modélisation et la simulation des systèmes complexes et des systèmes Multi-Agents sont des outils puissants pour étudier et comprendre des phénomènes complexes, émergents et non linéaires. Ils permettent d'explorer des scénarios alternatifs, de tester des stratégies, d'évaluer des politiques et de prendre des décisions éclairées dans des domaines variés. Ces approches sont utilisées dans la recherche académique, la planification urbaine, la gestion des risques, l'analyse des politiques publiques, l'optimisation des systèmes industriels, et bien d'autres domaines encore.

Nous sommes intéressés par l'application potentielle de l'approche Multi-Agents à la modélisation et à la simulation dans ce travail. Nous proposons la modélisation et la simulation d'une communauté de cellules composée de la population cellulaire de lymphocytes CD4 et la population du virus du VIH. Cette communauté de cellules représente la population cellulaire du système immunitaire. Pour ce faire, un environnement virtuel est créé dans lequel les différentes particules évoluent. Ce modèle répliquera le phénomène d'infection et permettra de prédire l'évolution de l'état d'un patient infecté par le virus. Cette prévision aidera à identifier les échecs thérapeutiques tôt, à prévenir les difficultés à l'avenir et à mieux guider le traitement.

Nous avons utilisé le modèle concept Aalaadin, qui est basé sur l'idée d'organisation (Modèle d'Organisation), qui a été développé dans le laboratoire LIRMM de l'Université de Montpellier et s'adapte à la Plateforme Mad-Kit, pour mettre en œuvre notre simulateur de chaudière à l'aide de systèmes Multi-Agents.

Introduction Générale

Notre thèse se compose de quatre chapitres disposés comme suit :

a. Le virus biologique VIH :

Expliquez le phénomène qui est discuté, à savoir l'idée d'un système immunitaire et de ses divers composants, le virus du SIDA, et le cours de l'infection...

b. Modélisation et simulation des systèmes complexe :

Ce chapitre sert d'introduction à notre travail en exposant les idées fondamentales derrière nos domaines de recherche. Il discute de l'idée d'un système en général, des différents types de systèmes, ainsi que des avantages et des méthodes de modélisation et de simulation.

c. Les systèmes Multi-Agents:

Ce chapitre présente les systèmes Multi-Agents et leurs caractéristiques. Il aborde également la nécessité de la simulation Multi-Agents, ses méthodologies, ses caractéristiques et ses domaines d'application, ainsi que certains formulaires fréquemment utilisés.

d. Conception et Implémentation :

Dans ce chapitre, nous allons présenter notre modèle en utilisant le système Aalaadin. Il décrit ensuite les résultats de notre travail et l'application du modèle en utilisant la plate-forme Mad-Kit. Ainsi que la présentation et critique des résultats obtenus.

Cet essai se termine par une conclusion et quelques implications.



Chapitre 1

Le virus biologique VIH



I. Généralité sur le virus biologique VIH

1. Introduction

Le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) est un virus biologique qui affecte le système immunitaire de l'homme. Il se transmet principalement par contact sexuel non protégé, l'utilisation de seringues non stérilisées, la transfusion sanguine ou de la mère à l'enfant pendant la grossesse, l'accouchement ou l'allaitement.

Une fois que le VIH infecte une personne, il attaque les cellules immunitaires appelées CD4, ce qui affaiblit progressivement le système immunitaire de la personne et la rend vulnérable à d'autres infections et maladies. Le VIH peut être traité avec des médicaments antirétroviraux, qui empêchent la multiplication du virus dans le corps et peuvent aider à réduire la charge virale à des niveaux indétectables. Cependant, il n'y a pas de remède pour le VIH et le traitement doit être maintenu tout au long de la vie.

La prévention reste le meilleur moyen de se protéger contre le VIH, notamment en utilisant des préservatifs lors des rapports sexuels, en évitant de partager des seringues et en suivant les protocoles de dépistage recommandés.

Le VIH (virus de l'immunodéficience humaine) est un virus biologique qui attaque le système immunitaire humain, entraînant une diminution de la capacité du corps à combattre les infections et les maladies. Le VIH se transmet principalement par contact sexuel non protégé, par le partage d'aiguilles infectées lors de l'utilisation de drogues injectables, et de la mère à l'enfant pendant la grossesse, l'accouchement ou l'allaitement.

L'infection par le VIH peut conduire au développement du SIDA (syndrome d'immunodéficience acquise), une maladie qui affaiblit le système immunitaire et peut causer des infections opportunistes et des cancers. Bien qu'il n'y ait pas encore de remède pour le VIH/SIDA, des traitements antirétroviraux efficaces sont disponibles pour aider à contrôler la propagation du virus et améliorer la qualité de vie des personnes vivant avec le VIH/SIDA.

2. Le système immunitaire

Le système immunitaire est un ensemble complexe d'organes, de cellules, et de molécules. Il est responsable des défenses de l'organisme contre les agents infectieux. Les principaux composants du système immunitaire auxquels nous allons nous intéresser sont les lymphocytes T CD4+ et les lymphocytes T CD8+. Les modèles mathématiques que nous utiliserons mettent à contribution les dynamiques de ces cellules. [10]

2.1. Les lymphocytes T CD8+

Les lymphocytes T CD8 (ou T8) sont produits par le thymus. Ils possèdent des protéines CD8 sur leurs membranes et sont responsables de la destruction des cellules tumorales ou des cellules infectées par des virus. Lorsqu'une cellule CD4 est infectée par un agent infectieux, elle est capable de produire et de présenter un antigène à sa surface pour signaler aux autres cellules qu'elle est infectée. Toute détection de cet antigène par une cellule T CD8 naïve entraîne l'activation de cette cellule T CD8 puis l'expression de son pouvoir cytotoxique. Pour cette raison, les cellules CD8 sont aussi appelées cellules CTL (pour Cytotoxique T Lymphocyte) ou encore lymphocytes Tc. La cellule CTL nouvellement activée (appelée CTL précurseur) devient donc le siège de modifications morphologiques et se transforme en donnant naissance par prolifération à des cellules CTL effectrices et des cellules CTL mémoires. Les cellules effectrices ont pour but direct de détruire toutes les cellules infectées qui expriment l'antigène reconnu. Les cellules mémoires (qui ont une durée de vie plus longue) persistent dans le temps et permettent d'avoir une réponse immunitaire (dite réponse secondaire) plus rapide et plus intense en cas de nouveau contact avec le même antigène. [10]

2.2. Les lymphocytes T CD4+

Les lymphocytes T CD4 (ou T4), appelés aussi lymphocytes T helpers (Th) ou T auxiliaires, sont les cellules responsables de la coordination et de l'activation de la réaction immunitaire. Ces cellules sont aussi produites par le thymus et possèdent des protéines CD4 sur leurs membranes. Ces cellules helpers, comme leur nom l'indique, sont la clef du système immunitaire. Elles aident au déclenchement de la réaction et de la réponse immunitaire en cas d'infection, c'est à dire l'activation des T CD8, des macrophages, ou la production de la cytokine et par exemple. Après contact avec un antigène, les T4 s'activent, entrent en prolifération et orientent la réponse immunitaire vers une immunité dite à médiation cellulaire

(stimulation des lymphocytes Tc) pour une destruction directe des cellules infectées ou, une immunité dite à médiation humorale pour une production d'anticorps f. En détruisant les T4, le VIH inhibe le mécanisme de défense immunitaire à sa source. Toute activation des principales défenses immunitaires devient donc impossible. [10]

3. Définition du VIH (Virus de l'Immunodéficience Humaine)

Le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) est une infection qui attaque le système immunitaire de l'organisme, en particulier les globules blancs appelés cellules CD4+. Le VIH détruit ces cellules, affaiblissant l'efficacité du système immunitaire du patient contre des infections telles que la tuberculose et certains cancers.

L'OMS recommande que toute personne à risque de contracter le VIH ait accès au dépistage. En cas de diagnostic positif, les personnes séropositives doivent se voir proposer et suivre un traitement antirétroviral le plus rapidement possible. S'il est pris de manière régulière, ce traitement prévient également la transmission du VIH à d'autres personnes.

Si le nombre de cellules CD4+ de la personne séropositive tombe en dessous de 200, son immunité est gravement compromise, ce qui la rend plus vulnérable aux infections. Une personne présentant un taux de CD4+ inférieur à 200 est décrite comme ayant le sida (syndrome d'immunodéficience acquise).

Le VIH peut être diagnostiqué à l'aide de tests de diagnostic rapide, qui sont simples et abordables, ainsi que par une auto dépistage. Il est important que les services de dépistage du VIH suivent les 5C : consentement, confidentialité, conseil, résultats corrects et connexion avec un traitement et d'autres services. [17]

4. Structure du virus VIH

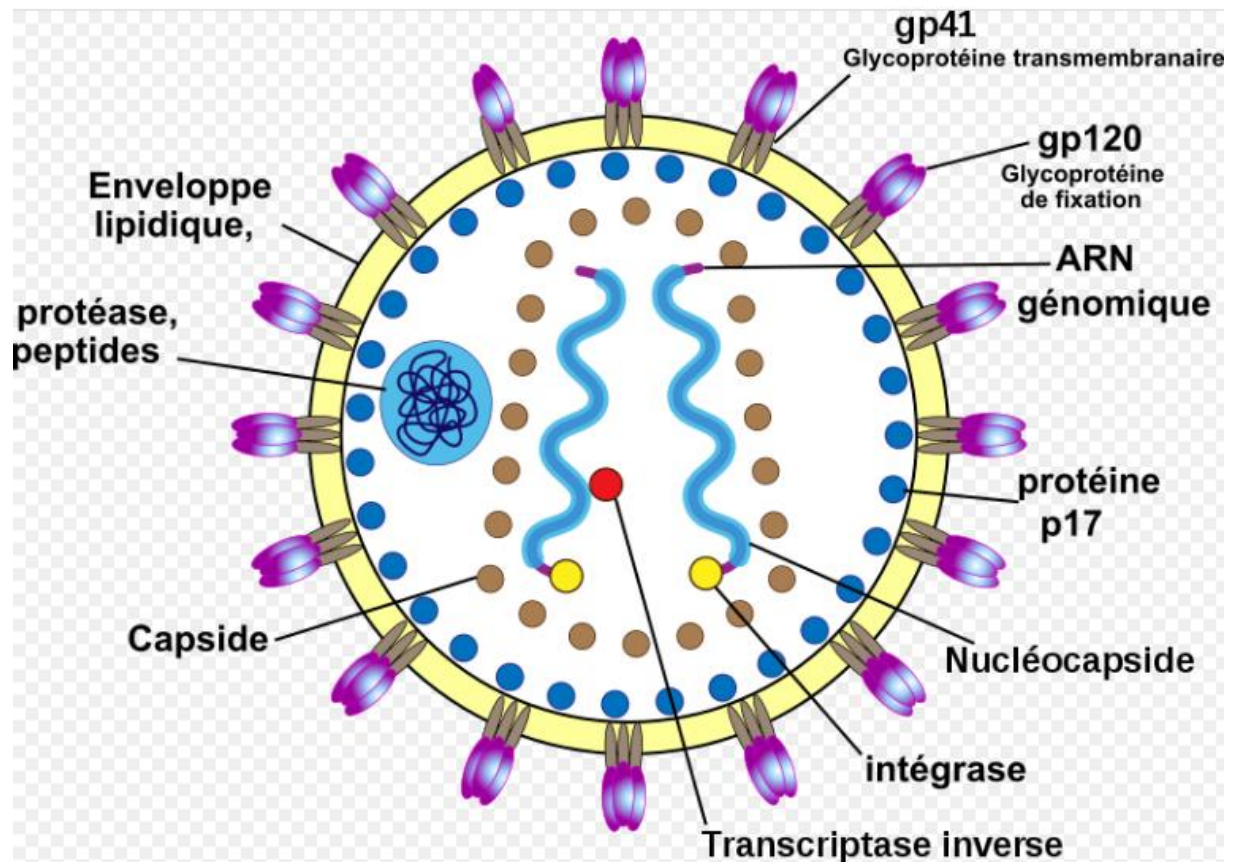


Figure 01. Schéma organisationnel du virus VIH [18]

Le VIH est un virus sphérique de 100 à 120 nanomètre de diamètre, il se compose principalement de trois entités structurales (Figure 1) :

- L'enveloppe sous forme d'une membrane phospholipidique.
- La coré virale est entouré par l'enveloppe. Il renferme la troisième entité structurale. Il est aussi cytopathogène à travers ses protéines.
- La nucléocapside qui renferme le génome viral sous forme d'ARN est un ensemble d'enzymes parmi lesquelles se retrouve la transcriptase inverse qui constitue réellement l'enzyme clé pour le transfert de l'information génétique [6].

La molécule d'ARN des VIH est constituée de 3 gènes principaux :

- Le gène GAG codant pour la synthèse des protéines de capsid (nommée p13, p18, p24)

- Le gène POL codant pour les protéines de réplication.
- Le gène ENV codant pour les protéines d'enveloppe (appelée gp 41, gp 110, gp 160) [15].

5. Symptômes du VIH

Beaucoup de gens ne ressentent pas les symptômes du VIH dans les mois qui suivent immédiatement l'infection et parfois ne savent pas qu'ils sont infectés. D'autres personnes peuvent éprouver des symptômes de la grippe, tels que la fièvre, les maux de la tête ou de la gorge, les éruptions cutanées et les maux de gorge. Ou, le virus est à son plus dangereux au cours de ces premiers mois.

Au fur et à mesure que la maladie progresse, les symptômes seront plus nombreux et plus prononcés. Le patient sera alors susceptible d'avoir des ganglions lymphatiques gonflés, une perte de poids, de la fièvre, des diarrhées et de la toux. Le VIH affaiblit la capacité de l'organisme à lutter contre d'autres infections, et sans traitement, les patients deviendront plus vulnérables aux autres maladies graves telles que la tuberculose, la méningite cryptocoque, les infections bactériennes et certains cancers, y compris le lymphome et le sarcome de Kaposi.

Le diagnostic du VIH est effectué à l'aide de tests rapides dont les résultats sont disponibles le jour même et qui peuvent être effectués à la maison, bien qu'un test de laboratoire soit ensuite nécessaire pour confirmer l'infection. Ce dépistage précoce améliore considérablement les options de traitement et réduit le risque de transmission à d'autres personnes, y compris en cas de rapports sexuels ou de partage de drogues [19].

6. les variétés du virus VIH

IL existe deux types de VIH :

VIH1 et VIH2, On peut classer les VIH en sous types :

- ❖ VIH1 : Le sous -type M (Majeur) 10 variétés (A, B, C, D, E, F, G, H, I et J), le sous-type O (Outlier) (endémique au Gabon et au Cameroun).
- ❖ VIH2 : cinq sous-types (A, B, C, D et E), Endémiques en Afrique de l'ouest, sporadique au Etats-Unis, Brésil et Inde) [55].

7. Phases de l'infection par le VIH

En l'absence de traitement, l'infection par le VIH passe par trois stades successifs entre le moment de l'infection et l'apparition du sida. Chaque stade dure plus ou moins longtemps selon les personnes. C'est pourquoi la durée pendant laquelle une personne séropositive peut vivre sans rencontrer de problèmes particuliers varie considérablement: de quelques mois à plus de quinze ans [14].

7.1. La phase de Primo-infection

La charge virale augmente rapidement au cours des premières semaines suivant l'infection. Cette phase se caractérise par l'apparition fréquente de symptômes similaires à ceux d'un refroidissement ou d'une grippe légère: fièvre, éruptions cutanées, fatigue, maux de tête, etc. Souvent, les personnes touchées ou même les médecins ne remarquent pas ces symptômes ou ne font pas le lien avec une possible infection par le VIH. Le risque de transmission s'avère particulièrement élevé durant la primo-infection en raison de la forte charge virale à ce stade de l'infection.

Les premiers signes de la maladie disparaissent spontanément après quelques semaines, car le système immunitaire réagit à l'agression des virus. L'infection par le VIH évolue ensuite sans qu'on ne la remarque [14].

7.2. La phase de latence (asymptomatique)

En général, les personnes séropositives ne rencontrent aucun problème particulier pendant des années et peuvent mener une vie normale. Pourtant, le virus se propage insidieusement dans l'organisme et malmène le système immunitaire en permanence. En raison de sa sollicitation constante, le système immunitaire s'affaiblit toujours davantage jusqu'à ne plus arriver à se défendre contre tous les agents pathogènes. L'organisme commence à montrer plus fréquemment des signes de déficience immunitaire. Il peut s'agir de maladies de la peau, de gonflements permanents des ganglions lymphatiques, de fortes sueurs nocturnes ou d'autres symptômes [14].

7.3. La phase du SIDA

A ce stade, le système immunitaire est tellement affaibli qu'il ne peut plus empêcher l'apparition de maladies graves, voire mortelles. On parle de sida en présence de certaines associations spécifiques de maladies. L'éventail de ces maladies est vaste. Il va de différents cancers à l'invasion de l'œsophage par le champignon *Candida albicans*, en passant par certaines formes de pneumonie. Après déclenchement du sida et en l'absence de traitement, l'espérance de vie ne va plus que de quelques mois à trois ans [14].

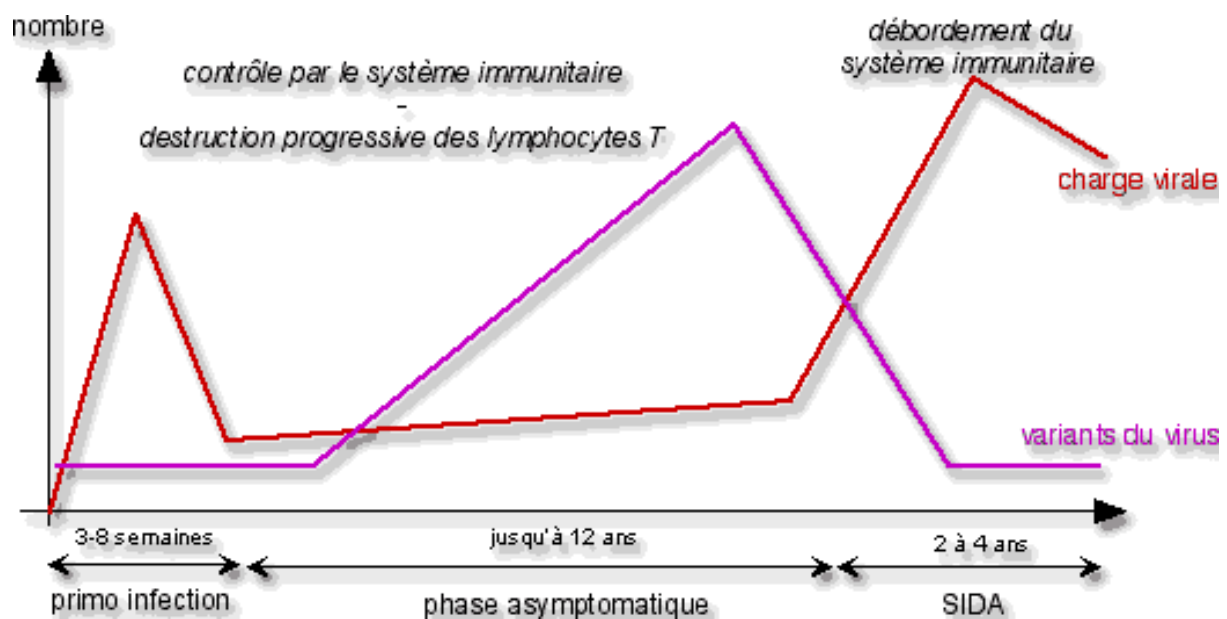


Figure 02 : Evolution de l'infection par le VIH [16]

8. Cycle de réplication du virus VIH

Le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) est un virus à ARN qui infecte les cellules du système immunitaire, en particulier les lymphocytes T CD4+. Le cycle de réplication du VIH implique plusieurs étapes :

- **Attachement** : le virus se lie à la surface de la cellule hôte en se fixant à des récepteurs spécifiques, tels que le récepteur CD4 et le corécepteur CXCR4 ou CCR5.
- **Fusion** : une fois attaché, le virus fusionne avec la membrane cellulaire de l'hôte et libère son contenu, y compris le génome viral, dans la cellule hôte.

- **Reverse transcription** : le génome viral à ARN est converti en ADN par l'enzyme transcriptase inverse (reverse transcriptase) présente dans le virus.
- **Intégration** : l'ADN viral nouvellement synthétisé est intégré dans le génome de la cellule hôte par l'enzyme intégrase, formant ainsi une forme provirale.
- **Réplication** : la cellule hôte utilise ses propres mécanismes de réplication pour produire des copies de l'ADN proviral.
- **Assemblage** : les nouvelles particules virales sont assemblées à partir des composants viraux produits par la cellule hôte.
- **Libération** : les nouvelles particules virales quittent la cellule hôte en bourgeonnant à travers la membrane cellulaire, entraînant la mort de la cellule hôte.

Le cycle de réplication du VIH est complexe et implique de nombreuses interactions avec la cellule hôte. Il offre plusieurs cibles pour le développement de médicaments antiviraux qui peuvent bloquer différentes étapes du cycle de réplication et ainsi empêcher la propagation du virus [16].

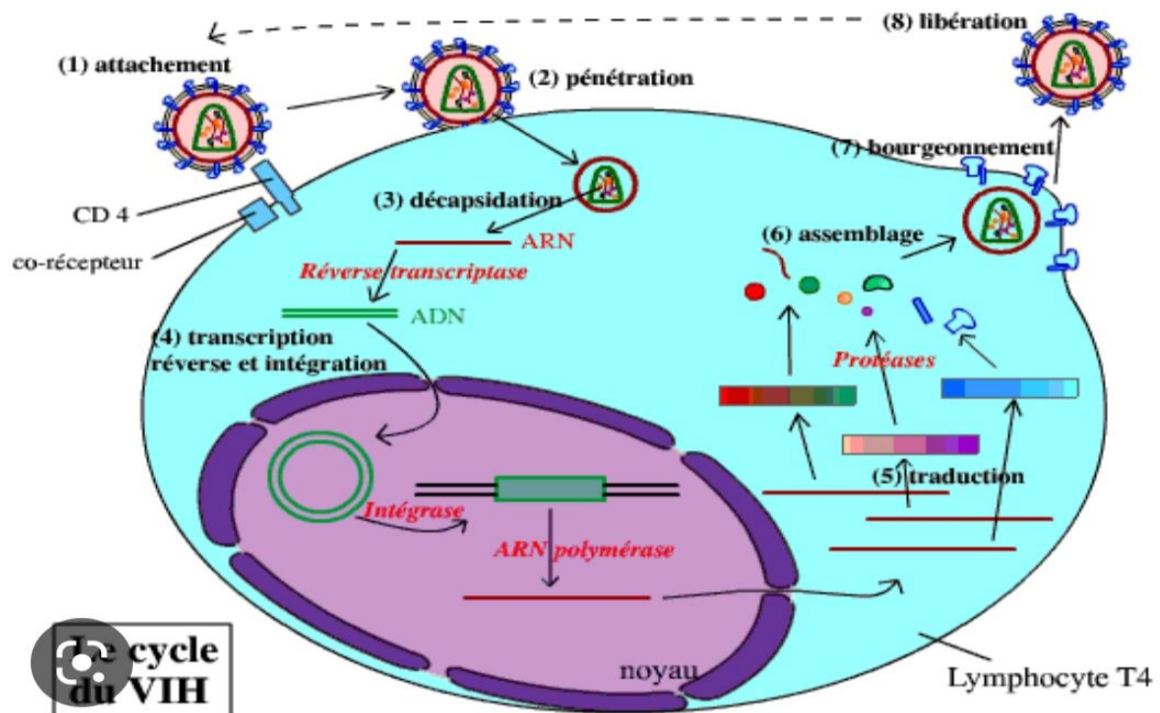


Figure 03 : Cycle de réplication du virus VIH [16]

9. Cellules cibles de l'infection par le VIH

Il s'agit : Des lymphocytes CD4 qui possèdent le récepteur CD4 et les corécepteurs nécessaires à la pénétration du virus dans la cellule. Ces cellules cibles du VIH constituent la clé de voûte du système immunitaire ; leur destruction progressive conduit à une immunodépression majeure ; d'autres cellules telles que les monocytes /macrophages, les cellules dendritiques, les cellules de Langerhans dans la peau et les cellules microgliales dans le cerveau [59].

10. Les modes de transmission du VIH

Le VIH (Virus de l'Immunodéficience Humaine) peut se transmettre de différentes manières :

- ❖ **Par contact sexuel** : le VIH peut être transmis par voie sexuelle lors des rapports vaginaux, anaux ou oraux avec une personne infectée. Le virus se trouve dans le sang, le sperme, les sécrétions vaginales et le lait maternel. Les personnes les plus à risque sont celles qui ont des relations sexuelles non protégées avec des partenaires infectés [20].
- ❖ **Par contact sanguin** : le VIH peut être transmis par le partage de seringues ou d'aiguilles contaminées lors de l'injection de drogues. Le virus peut également être transmis par le partage de matériel pour le piercing, le tatouage ou l'acupuncture non stérile [34].
- ❖ **De la mère à l'enfant** : le VIH peut être transmis de la mère à l'enfant pendant la grossesse, l'accouchement ou l'allaitement maternel. Les traitements antirétroviraux peuvent réduire considérablement le risque de transmission [56].
- ❖ **Par transfusion sanguine** : le VIH peut être transmis par transfusion de sang ou de produits sanguins contaminés. Cependant, depuis les années 1980, des tests de dépistage du VIH sont effectués sur tous les dons de sang et les produits sanguins pour éviter toute transmission.

Il est important de noter que le VIH ne se transmet pas par contact quotidien comme par exemple la toux, les éternuements, la poignée de main ou le partage de nourriture ou d'eau.

11. Traitement du VIH

Il est possible de prévenir le VIH. La thérapie antirétrovirale efficace (TAR) empêche la transmission du virus de la mère à l'enfant pendant la grossesse, l'accouchement et l'allaitement. Une personne qui subit un traitement antirétroviral et qui a éliminé son infection virale ne transmettra pas le virus à ses partenaires sexuels. [14]

Les préservatifs peuvent être utilisés pour prévenir le VIH et d'autres maladies sexuellement transmissibles, et les médicaments antirétroviraux sont utilisés dans le cadre de la prophylaxie pour la prévention du VIH. Dans les pays d'Afrique de l'Est et du Sud avec des taux de morbidité élevés, la circoncision masculine est recommandée. La prévention du VIH et d'autres maladies transmissibles par le sang chez les usagers de drogues est rendue possible par des mesures visant à réduire les effets désagréables, tels que les programmes d'aiguilles à aiguilles et les thérapies de substitution aux opiacés [21].

Le traitement antirétroviral utilisé pour traiter le VIH peut inclure un ou plusieurs médicaments. L'ART ne guérit pas le VIH, mais il l'empêche de se reproduire dans le sang, ce qui provoque une chute de la charge virale à un niveau indétectable.

Il permet aux personnes atteintes de la maladie de mener une vie saine et active. Il fonctionne également comme un outil préventif puissant, réduisant le risque de transmission ultérieurement de 96%. Chaque jour, pour le reste de votre vie, vous devez avoir ce traitement. Les patients peuvent continuer à bénéficier de cette thérapie sûre et efficace tant qu'ils suivent correctement leur plan de traitement. Les patients devront passer à d'autres médicaments pour protéger leur santé dans le cas où l'ART devient inefficace pour des facteurs tels que la perte de contact avec les fournisseurs de soins de santé ou la pénurie de médicaments [21].

12. Le VIH et le système immunitaire

Le système immunitaire est capable de repérer des éléments étrangers à notre organisme, comme les microbes (virus, bactérie, parasite) ou certaines cellules toxiques (on désigne tous ces éléments sous le nom d'«~antigène~»). Il est également capable de les reconnaître lorsqu'il les a déjà rencontrés ; c'est la mémoire immunitaire. C'est pourquoi il y a des

maladies qu'on ne fait qu'une fois dans sa vie ; de la même façon, les vaccins permettent de créer une mémoire immunitaire contre des maladies graves que l'on n'a jamais attrapées [22].

Lorsque l'antigène est identifié, le système immunitaire va développer des défenses capables de le détruire. Ces défenses sont assurées par les globules blancs du sang.

Le système immunitaire est très perfectionné, et permet de lutter contre ces antigènes de plusieurs manières :

- en fabriquant des anticorps (ce sont des protéines qui vont se coller sur l'antigène et le détruire) ; c'est le rôle des lymphocytes B ;
- en détruisant directement des bactéries (c'est le rôle des polynucléaires) ;
- en détruisant des cellules infectées par un virus (c'est le rôle des lymphocytes CD8).

Pour que la réaction puisse avoir lieu, il faut qu'une autre cellule déclenche la réponse immunitaire la mieux adaptée à l'antigène. C'est le rôle des lymphocytes CD4 (qu'on appelle aussi lymphocytes T4). Si les lymphocytes CD4 ne font pas leur travail, la réponse immunitaire ne pourra pas avoir lieu. Or, ce sont eux qui sont détruits par le VIH. Ce qui explique que, quand ils viennent à manquer, le système immunitaire devient moins capable de protéger l'organisme contre des microbes que l'on peut déjà avoir mais qui ne rendaient pas malades [22].

II. Conclusion

Nous avons succinctement introduit les concepts biologiques qui sont importants pour le reste de cette thèse dans ce chapitre d'introduction. Le chapitre suivant décrit la modélisation et simulation des interactions entre Les agents cellulaires (que nous allons décrire) sont impliqués dans le processus d'infection.



Chapitre 2

Modélisation et simulation des systèmes complexe



I. Introduction

La modélisation et la simulation des systèmes complexes est un domaine interdisciplinaire qui englobe des concepts de mathématiques, d'informatique, d'ingénierie et de sciences naturelles. Elle consiste à créer des modèles mathématiques ou informatiques qui représentent un système complexe du monde réel, et à utiliser ces modèles pour simuler le comportement du système dans différentes conditions.

Les systèmes complexes sont des systèmes qui ont de nombreuses composantes interconnectées et interdépendantes, qui peuvent avoir des comportements imprévisibles ou émergents, et qui peuvent évoluer dans le temps. Les exemples de systèmes complexes incluent les réseaux sociaux, les écosystèmes, les systèmes de transport, les systèmes économiques et les systèmes de santé.

La modélisation et la simulation des systèmes complexes peuvent aider à comprendre comment ces systèmes fonctionnent et comment ils peuvent être améliorés ou optimisés. Elles peuvent également aider à anticiper les effets de différentes interventions ou changements sur le système. Les outils de modélisation et de simulation peuvent également être utilisés pour concevoir de nouveaux systèmes ou pour améliorer des systèmes existants.

Les techniques de modélisation et de simulation des systèmes complexes comprennent des méthodes mathématiques telles que les équations différentielles et les méthodes numériques, ainsi que des méthodes informatiques telles que la simulation par ordinateur et la modélisation basée sur des agents. Ces techniques peuvent être appliquées à une grande variété de systèmes complexes dans de nombreux domaines différents, de l'ingénierie à la biologie en passant par l'économie et les sciences sociales.

II. La notion de système et écosystème

1. Système complexe

1.1. Définition

En général, on peut dire qu'un système est une collection de composants qui travaillent ensemble pour atteindre un objectif spécifique. Ces composants se développent dans une

variété d'environnements et travaillent ensemble pour produire un tout ; ils ont chacun des rôles à jouer et un certain degré d'indépendance. Ce groupe interagit avec le temps ; il existe dans un environnement qui a un impact sur lui et qu'il peut influencer [35].

Il existe de nombreuses définitions [33], bien qu'elles soient toutes généralement d'accord sur des choses différentes. Un système est avant tout un ensemble de composants. Ces composants peuvent être appelés constituants, composants, organismes ou agents en fonction du champ. Le composant lui-même peut être un système. Dans ce cas, nous allons ensuite parler des caractéristiques hiérarchiques du système. Cette collection de composants au sein d'une structure détermine le type de connexions (relations, interfaces, etc.). Ils interagissent les uns avec les autres, ce qui signifie qu'ils peuvent échanger des informations, des matériaux et de l'énergie. Parce que les systèmes ne sont jamais physiquement isolés, ils interagissent aussi avec l'environnement. En conséquence, le système peut être contacté par son environnement et réagir. En conséquence, il peut effectuer diverses tâches et inclure une variété d'activités.

1.2. Section de système

On peut distinguer deux grandes sections :

1.2.1. Les systèmes naturels

Ces systèmes sont utilisés pour décrire des phénomènes naturels et leurs propriétés. On peut citer :

- Le système nerveux,
- Le système immunitaire,
- Le système nuageux,
- Le système moléculaire,
- Le système solaire,
- Le système cellulaire,
- L'écosystème (interactions entre espèces) [43].

1.2.2. Les systèmes artificiels

Dans ce cas, le système sert à décrire des concepts que l'activité humaine a imaginés dans divers domaines.

✚ En sciences mathématiques et physiques :

- Le système métrique ;
- Le système de coordonnées ;
- Les systèmes d'équations (différentielles, aux différences finis, ...) ;
- La dynamique des systèmes (turbulence, phénomènes chaotiques, attracteur, ...) [43].

✚ En sciences de technologie de l'information et de la télécommunication :

- Le système informatique ;
- Le système expert ;
- Le système de télécommunications ;
- Le système de contrôle commande.

✚ En sciences économiques et financières :

- Le système monétaire international ;
- Le système de gouvernement ;
- Le système de management de la qualité.

Dans tous les cas, le système a une logique organisationnelle très sophistiquée qui est souvent complexe et au-delà de notre compréhension.

1.3. Types de systèmes

1.3.1. Systèmes continus

En tant que système ouvert, le système est soumis à des variables externes, souvent appelées conditions environnementales. (Which may include the pH of the soil, air temperature or humidity, atmospheric pressure, etc.)? En outre, le système est caractérisé par un ensemble de valeurs connues sous le nom de traits, et ces caractéristiques changent avec le temps. Si l'attribut est numérique et sujet à changement en fonction de plusieurs facteurs, tels

que le passage du temps, des conditions environnementales particulières ou d'autres caractéristiques. On dit qu'il est continu si les paramètres par lesquels il diffère des variables du monde réel peuvent être compris et si la caractéristique est assimilable à une fonction continue de ces variables. Comme nous pouvons le voir, cette définition est liée à l'idée purement mathématique de la continuité des fonctions. Par conséquent, il est possible de penser à un certain nombre de processus temporels à cette échelle comme en cours, tels que le mouvement et la croissance d'une population considérable [43].

1.3.2. Systèmes discrets

L'évolution de la fonctionnalité peut entraîner des événements discrets ou des interruptions. Par exemple, en termes de processus temporels, des événements qui ont leur survenance à un moment donné sont considérés: Arrêt ou début du mouvement, changement "immédiat" de la vitesse ou de la direction suivant l'impact. Un attribut peut être classé comme discret s'il ne change que dans des événements séquentiellement distincts [43].

1.3.3. Systèmes déterministes

On dit qu'un système est déterminé s'il se comporte de la même manière dans des circonstances identiques à chaque fois.

1.3.4. Systèmes indéterministes (stochastiques)

D'autre part, un système qui se comporte différemment sans explication apparente est appelé un système arbitraire (ou même stochastique), et ce manque apparent de cause est connu comme le hasard. La théorie des probabilités fournit la formalisation mathématique de ces systèmes.

1.4. L'interaction avec l'environnement

Un système fermé est un système dont les composants interagissent uniquement les uns avec les autres, et non avec d'autres entités externes. La majorité des systèmes qui ont été observés et étudiés dans la nature ou la société sont les systèmes ouverts, c'est-à-dire qu'ils interagissent avec leur environnement. Il est difficile de trouver des systèmes complètement fermés. Pour définir un système ouvert, il est nécessaire de distinguer entre les relations qui lient les composants du système au sein du système lui-même et les relations potentielles qui pourraient lier ces composants à l'environnement.

2. écosystème complexe

2.1. Définition de l'écosystème

Un écosystème complexe est une collection dynamiquement interconnectée d'êtres vivants (plantes, animaux et micro-organismes) et de leur environnement physique. (climate, soil , and water). Elle se caractérise par de nombreuses interactions, souvent complexes, entre les différentes espèces qui y vivent, ainsi que par des facteurs environnementaux abiotiques.

Des écosystèmes complexes peuvent être trouvés dans les forêts, les océans, les zones humides, les prairies, les déserts, les récifs coralliens et une variété d'autres écosystèmes naturels. Chaque écosystème est différent en raison de ses caractéristiques géographiques, climatiques et spécifiques aux espèces.

La compréhension des relations entre les différentes espèces et leurs environnements ainsi que l'identification des facteurs pouvant perturber l'équilibre écologique de ces systèmes peuvent tous deux être aidés par la recherche sur les écosystèmes complexes. Ces connaissances peuvent aider à sauvegarder et à restaurer des écologies complexes ainsi qu'à encourager l'utilisation durable des ressources naturelles.

2.2 .Types des écosystèmes

Différentes formes d'écosystèmes complexes existent selon leur emplacement, les espèces qui y vivent et les interactions entre ces espèces. Voici quelques exemples :

2.2 .1 . Les écosystèmes forestiers

Ces écosystèmes sont caractérisés par la présence de diverses espèces d'arbres, d'oiseaux, de mammifères, de reptiles et d'insectes. Ils jouent un rôle important dans le maintien de la biodiversité et la régulation du climat.

2.2 .2 . Les écosystèmes marins

Ces écosystèmes peuvent être trouvés dans les océans, les mers et les estuaries. Ils abritent une grande variété d'espèces, y compris les poissons, les mollusques, les crustacés, les mammifères marins et les oiseaux. Ils sont essentiels à la fois pour l'oxygénation de l'atmosphère et pour la régulation du climat.

2.2.3. Les écosystèmes de montagne

Ces écosystèmes montagneux se caractérisent par la présence d'un large éventail d'espèces animales et végétales adaptées aux conditions climatiques et topographiques extrêmes.

2.2.4. Les écosystèmes de prairies :

Ces écosystèmes se trouvent dans des zones de plaines et se caractérisent par la présence d'une grande variété de plantes et d'herbes ainsi que d'animaux comme les herbivores et les prédateurs.

2.2.5. Les écosystèmes urbains :

Ces écologies se trouvent dans les zones urbaines et se caractérisent par la présence d'un large éventail d'espèces animales et végétales qui ont appris à s'adapter aux environnements urbains, y compris les pigeons, les rats, les chats et les plantes sauvages.

Il est crucial de garder à l'esprit que ces écosystèmes ne sont pas statiques et peuvent subir des changements en raison de perturbations naturelles ou artificielles.

III. Notions sur la modélisation et la simulation de systèmes

Pendant longtemps, la science traditionnelle a divisé l'étude d'un système donné en un certain nombre de sous-parties plus simples. En conséquence, le résultat global a été fourni par la divulgation des différents résultats. Malheureusement, cette approche n'est pas toujours réalisable. En fait, il y a certains phénomènes qui peuvent être observés dans une variété de domaines différents, tels que la biologie, la géographie, la science physique, les sciences sociales, les mathématiques, l'économie et l'informatique, où l'étude analytique traditionnelle n'est pas appropriée. Leur comportement global ne peut être expliqué par les actions de l'une quelconque de leurs parties. C'est pourquoi beaucoup se sont tournés vers la modélisation et la simulation du système sous-étudié.

La modélisation et la simulation de systèmes complexes constituent actuellement un défi majeur dans un large éventail de domaines de la société humaine. Elle permet de tester les hypothèses, leur transmission, leur exposition et la formulation ultérieure de nouvelles. Quel que soit le domaine étudié, cet outil fournit aux scientifiques un moyen unique d'étude.

1. Modélisation des systèmes

1.1. Définition du système

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité qui nous aide à comprendre comment un système fonctionne en réponse à une requête particulière. Chaque modèle se compose de deux parties : une description de la structure du système, qui comprend des spécificités sémantiques (telles que la nomenclature et les règles de signification pour les sources, la largeur et la profondeur du consensus social fournissant un sens dans le cas des représentations d'acteurs), et une description des fonctions et dynamiques régulières (ou irrégulières) qui changent cette structure au fil du temps. De même, un modèle

- Il doit avoir un caractère qui ressemble étroitement au système du monde réel,
- doit aider à la compréhension du système du monde réel.

1.2 .Objectif de la modélisation

L'objectif principal d'un modèle est souvent de rendre un groupe d'informations largement implicites claires et apparentes. De nombreuses ambiguïtés doivent être éliminées lors de la création du modèle. Un modèle de système antérieur permet une meilleure compréhension du fonctionnement du système. C'est aussi un bon moyen de contrôler sa complexité et d'assurer sa cohérence. Dans le domaine de l'ingénierie logicielle, le modèle permet une meilleure division des tâches et l'automatisation de certaines de ces tâches. C'est aussi un facteur dans la réduction des dépenses et des temps de lead. Le modèle est également nécessaire pour assurer un niveau élevé de qualité et une maintenance efficace [44].

1.3. Types de modèles

Il existe plusieurs types de modélisation, voici les principaux :

1.3.1. Modèle déterministe

Ce modèle est basé sur le développement d'équations précises, ce qui rend le système entièrement prévisible.

1.3.2. Modèle stochastique

Ce modèle introduit des phénomènes aléatoires et explique la « hâte » que nous rencontrons fréquemment dans les écosystèmes.

1.3.3. Modèle par simulation

Il a généralement l'avantage d'être en mesure d'utiliser une modélisation mathématique complexe, et il permet la représentation d'environnements avec de nombreux types différents d'acteurs. C'est le modèle progressif du temps.

1.3.4. Modèle physique

Un modèle physique est une représentation de la réalité ; cependant, en raison de leur capacité à prendre en compte des contraintes complexes ainsi que de sa matérialité, qui attire souvent les auteurs, des modèles réduits sont encore fréquemment utilisés.

1.3.5. Modèle mathématique

Pour pouvoir utiliser des outils mathématiques, des procédures et des théories, la réalité doit être traduite en un modèle mathématique. Par conséquent, ce modèle est composé d'équations, qui sont composées de variables. Il est utilisé pour prédire des événements ou des situations, telles que l'estimation du prix potentiel des actifs financiers, la prévision de la météo à l'aide de données météorologiques, etc.

1.3.6. Modèle informatique

Dans ce modèle, un ensemble de programmes informatiques qui, lors de l'exécution, décrivent l'évolution de la variation d'un ensemble de variables au fil du temps [30] sont utilisés pour représenter la réalité.

Le modèle le plus populaire actuellement utilisé est le modèle informatique.

Dans certains systèmes complexes, tels que ceux utilisés dans la fabrication d'avions ou d'automobiles, des prototypes du monde réel du système sont généralement utilisés, sur lesquels des simulations informatiques sont exécutées.

1.4. Qualités d'un modèle

Le modèle « idéal » d'un système ne peut pas être déterminé en termes absolus car il dépend des besoins du système. Cependant, il existe un certain nombre de qualités de bases qui peuvent être identifiées qui permettent l'évaluation de l'applicabilité de ce modèle:

- ✓ Le plus simple et le plus claire possible ;
- ✓ Valide ;
- ✓ Le plus fidèle possible par rapport aux besoins de la simulation ;
- ✓ Le plus efficace par rapport au but poursuivi.

1.4.1. La simplicité

La simplicité est la priorité d'être simple et non combiné. C'est qualité essentielle.

1.4.2. La fidélité

La fidélité d'un modèle est le niveau de similitudes fonctionnelles et physiques entre ce modèle et le système réel qu'il présente.

1.4.3. La validité

La validité est la qualité d'un modèle à représenter le monde réel de façon suffisamment précise et exacte pour remplir les besoins d'une utilisation des données.

1.4.4. L'efficience

L'efficacité décrit la capacité d'un modèle à atteindre l'objectif fixé. Donc, l'efficience désigne le fait de réaliser un objectif avec le minimum des moyens engagés possible. Un modèle efficient sera efficace à moindre coût.

1.5. Processus de la modélisation

Nous allons citer ci-dessous les principaux processus de la modélisation:

1.5.1. Processus globale

Sert à déterminer toutes les phases du processus de modélisation.

1.5.2. Définition du problème

Prend en compte tous les besoin du système à modéliser, Cherche et précise les méthodes et les architectures à appliquer.

1.5.3. Objectifs et organisations

Dans cette phase, on doit définir ce que l'on veut obtenir à l'issue du projet, à savoir les objectifs que l'on se fixe: réduction des coûts, mesure d'impact... etc.

1.5.4. Analyse du système

Se compose de deux principales analyses:

- l'analyse statique du système ;
- l'analyse dynamique du système

1.5.5. Modélisation:

La modélisation du système est influencée par le contexte :

- ❖ l'objectif : il déterminera, par exemple, la précision requise par le modèle ;
- ❖ les ressources à disposition ;
- ❖ la disponibilité de composants réutilisables.

1.5.6. Collecte des données

Cette phase se base sur trois parties indiquées ci-dessous :

- ✚ destination des données ;
- ✚ sources de données ;
- ✚ vérifications et validation des données.

1.5.7. Codage/ Implantation

Ce processus est nécessaire pour qu'on puisse traduire un modèle abstrait en instructions dans un langage de programmation. Il nous faut donc deux critères:

- choix d'une architecture: le choix d'une architecture est déterminant pour la qualité et les performances de l'application, ainsi que son exploitabilité et sa capacité à être réutilisée ;
- qualité logicielle: la qualité logicielle est définie par la vérifiabilité, efficacité, réutilisation et la pérennité.

1.5.8 Vérification

La vérification est le processus par lequel on s'assure que l'implantation d'un modèle conforme à ses spécifications.

1.5.9. Validation

La validation est un processus visant à s'assurer qu'un modèle ou une simulation représente le monde réel d'une façon suffisamment précise pour remplir les besoins d'une utilisation.

1.5.10. Exécution

L'exécution diffère suivant le type de modèle :

- si la simulation est numérique fermée, l'application va lire en entrée les données du modèle, exécuter ses calculs sur une certaine durée et produire des résultats sur des fichiers sans interventions humaine.
- A contrario des simulations numériques fermées, les simulations interactives prennent en compte des entrées de l'utilisateur. Dans le cas extrême des simulations pilotées, les résultats des entrées de l'utilisateur sont dans la foulée rebouclées sur les sorties, avec un délai qui constitue l'un des points les plus délicats des simulateurs pilotés temps réel.

1.5.11. Exploitation des résultats

L'exploitation des résultats est une activité très technique, vise à déterminer principalement les éléments suivants :

- les paramètres en entrée de la simulation qui engendrent les plus grandes variations des sorties ;
- les éventuelles instabilités ;
- les paramètres qui n'ont pas d'influence significative sur les résultats ;
- l'impact sur l'incertitude sur un paramètre ;
- les influences éventuelles des paramètres entre eux.

1.5.12. Rapport final

Le rapport final doit exprimer en des termes métier, les conclusions étayées de la simulation.

1.5.13. Mise en service / capitalisation

C'est la dernière phase du processus de modélisation qui assure la mise en œuvre du modèle [51].

1.2. Outils de modélisation

Nous allons nous pencher sur quelques outils de modélisation mathématique et informatique dans ce qui suit.

1.2.1. Outils de modélisation mathématique

❖ Equations différentielles :

Une équation différentielle mathématique est une relation entre une ou plusieurs fonctions inconnues et leurs dérivations. La modélisation mathématique des systèmes à l'aide d'équations différentielles est actuellement bien établie en biologie et en sciences physiques. Elle a quelques avantages clés qui sont essentiels:

- L'approche est formalisée. En fait, une équation mathématique est universellement compréhensible, des solutions analytiques peuvent être trouvées, et si ce n'est pas le cas, des simulations numériques peuvent se réaliser.
- Un système d'équations différentielles permet de décrire l'évolution d'un système avec de nombreuses formes différentes d'interactions entre différents ensembles d'éléments.

❖ Chaînes de Markov :

Une chaîne de Markov est un processus qui permet de modéliser un système à partir d'un ensemble de probabilités qui correspondent à la transition de l'un des états du système au moment t à un autre état au temps $t + 1$. Cet outil probabiliste est le résultat de voir l'entité étant modélisée puisque l'information réelle est utilisée pour calculer les probabilités de transitions.

Une chaîne de Markov est une idée mathématique qui a été développée par des mathématiciens, et en tant que telle, il peut être défini mathématiquement.

❖ Les réseaux de Pétri :

Les réseaux de Pétri sont l'une des nombreuses représentations mathématiques d'un système. Un réseau Pétri explique graphiquement la structure d'un système distribué sous forme de graphique bipartite droit avec des annotations. Il a des emplacements de nœuds et des transitions de nodes, ainsi que des arcs pointant dans la direction de ces transitions. Lorsqu'une transition est effectuée, un réseau Pétri change parce que les jetons sont envoyés aux endroits où la transition sort et reçus aux lieux où elle entre.

Un réseau de Pétri évolue lorsqu'on exécute une transition : des jetons sont pris dans les places en entrée de cette transition et envoyés dans les places en sortie de cette transition. L'exécution d'une transition (on parle alors de son franchissement) est une opération indivisible qui est conditionnée par la présence de jeton sur la place d'entrée. L'exécution d'un réseau de Pétri est non déterministe, car il peut y avoir à un instant donné autant de possibilités d'évolution que de transitions franchissables à cet instant.

❖ Les Files d'attente :

La théorie des listes d'attente est une notion stochastique qui peut être utilisée pour simuler l'utilisation d'une ressource limitée. Une zone critique est, par définition, un emplacement physique ou logique qui ne peut être accessible que par une personne à la fois. Un client entre dans la zone d'attente lorsqu'il souhaite utiliser une zone critique qui est déjà opérationnelle.

1.2.2. Outils de modélisation informatique**❖ Le modèle entité / association**

L'un des modèles conceptuels de données les plus anciens et les plus populaires est le modèle d'entités-associations. Ce modèle, que Chen a proposé pour la première fois en 1976, permet une description naturelle du monde réel en utilisant les idées d'entité et d'association. Il est universel (réservé par l'ISO) et répond à l'objectif de l'indépendance des données-programmes.

❖ Le modèle relationnel

CODD a formalisé le modèle de relation en 1970. Ce modèle permet une représentation table par table des données, où les données sont organisées en tables (relations). La force et la simplicité des concepts du modèle relationnel, qui les rendent simples à comprendre par les utilisateurs, sont responsables de sa popularité auprès des chercheurs, des développeurs de concepts et des utilisateurs.

❖ Le modèle orienté objet :

Le modèle orienté objet considère le système comme un groupe d'objets distincts et distinctifs avec des propriétés. Une caractéristique est soit un attribut (une donnée qui décrit l'état de l'objet ou de l'attribut), soit un comportement de cet objet.

(a fonction or méthode). La fonctionnalité du système résulte alors de la façon dont ses nombreux composants interagissent les uns avec les autres. Une des caractéristiques uniques de cette approche est qu'elle intègre les données associées et le traitement dans un seul objet. La méthode UML, qui est actuellement considérée comme la norme d'or dans les méthodologies orientées objet, exploite pleinement le potentiel de cette idée [53] [48].

❖ Le modèle orienté agents :

Depuis quelques années, les exigences du logiciel en termes de méthodes de représentation et de conceptualisation ont changé. La tendance est vers un plus grand pouvoir de représentation et de traitement pour traiter les énormes quantités d'informations, qui sont généralement contaminées et diffusées. Cela nécessite des outils puissants qui peuvent s'adapter à diverses circonstances sans nécessiter toujours une aide extérieure. (From the programmé). Il nécessite des outils qui possèdent une certaine intelligence, qui sont capables de « raisonner », « prendre l'initiative », et capables d'interagir dans divers environnements. L'émergence du paradigme de l'agent orienté programmation remplit les lacunes laissées par les approches conventionnelles à la programmation. L'approche axée sur les agents offre un moyen beaucoup plus naturel de conceptualiser les systèmes. Elle s'intéresse à la façon de diviser un problème en un groupe d'entités distribuées et coopératives, ainsi qu'à la manière de partager des connaissances sur le problème afin de trouver une solution. Ce champ a été initialement créé pour résoudre les problèmes d'intelligence distribuée (IAD) [36] [57] [12].

2. La simulation des systèmes

En raison de notre incapacité à collecter des données ou à mener des expériences pertinentes sur un phénomène, il est parfois difficile ou tout à fait impossible de l'étudier, ce qui nous pousse à employer la simulation.

2.1. Définition

La simulation se réfère généralement à "représenter la réalité de toutes les manières possibles". Un peu plus spécifiquement, le fonctionnement d'un modèle qui est une représentation du système ou de l'organisme constitue la simulation d'un système ou un organisme. Le modèle se prête à des manipulations qui seraient impraticables, trop coûteuses ou impossibles à effectuer sur le système [34].

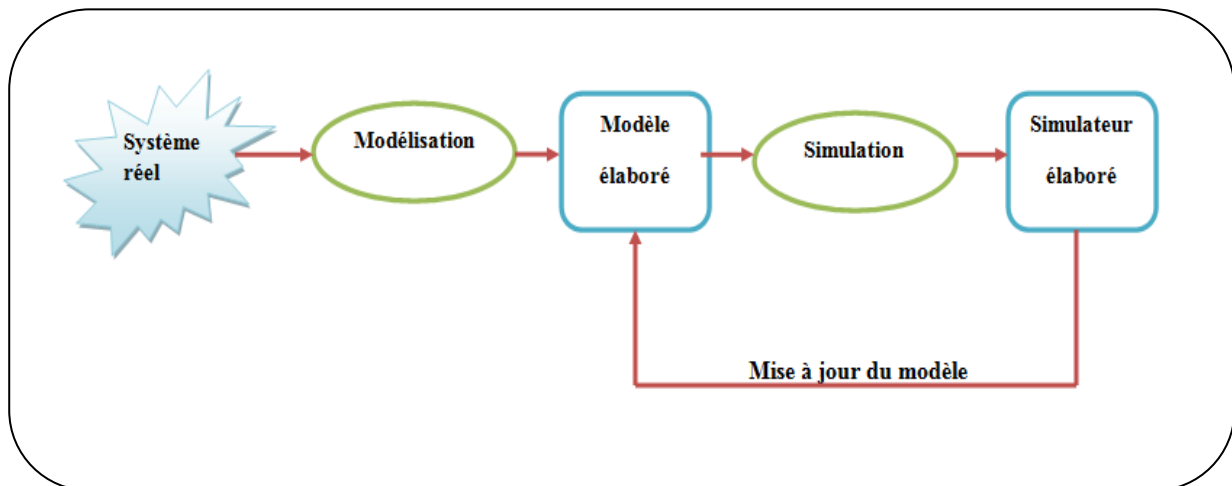


Figure 04 : Vue d'ensemble de la simulation informatique.

2.2. Types de simulation

On peut distinguer trois catégories de simulations :

2.2.1. La simulation continue

Le système est présenté comme résolvant des équations différentielles. Lorsque la résolution analytique n'est pas réalisable, elle permet la substitution. Elle a été effectuée à l'origine sur des calculatrices analogiques, mais a depuis été réalisée sur des ordinateurs, des machines hybrides, et une troisième forme de calculatrice qui n'a pas encore été inventée: les calculatrice stochastique.

2.2.2. La simulation discrète

Le système est soumis à une série d'événements qui le modifie. L'objectif de ce type de simulation est d'appliquer des principes de base aux systèmes à grande échelle. Les deux principales catégories de simulation discrète sont :

- **Asynchrone** : Le passage d'une unité de temps est simulé à plusieurs reprises sur l'ensemble du système.
- **synchrone ou séquencèrent des événements** : on prédit l'arrivée de l'événement suivant et on simule simplement des événements individuels, permettant souvent des simulations rapides mais étant légèrement plus difficiles à mettre en œuvre.

2.2.3. La simulation par objet

Ce type de simulation s'appuie sur les concepts d'objet et de classe, et utilise des idées liées à ces concepts comme l'encapsulation et l'héritage pour modéliser et simuler des programmes. Cette idée est la base de la méthodologie UML ; de puissants langages de programmation tels que DELPHI et JAVA font usage de ces idées.

2.2.4. La simulation par agents

Où la simulation est divisée en différentes entités qui communiquent entre elles. Bien qu'elle se concentre initialement principalement sur les sphères économiques et sociales, où chaque agent représente soit une seule personne, soit un groupe de personnes, elle est maintenant utilisée dans presque tous les domaines. Son fonctionnement est asynchrone par nature [3].

2.3. Avantages de la simulation

Bien que la simulation soit un outil utile pour l'analyse dans une variété de contextes, l'analyste doit pondérer ses avantages avant d'appliquer la méthodologie dans un cas particulier.

Ce qui suit sont quelques-uns des principaux avantages de la simulation:

- Il peut être utilisé à plusieurs reprises pour analyser les conceptions et les politiques proposées une fois que le modèle a été construit;
- On peut l'utiliser même si les données considérées sont en quelque sorte superficielles et résumées;
- Le coût de l'analyse de simulation est souvent inférieur à celui du système réel parce que le système véritable n'est pas affecté par les diverses expériences de simulations ;
- La simulation est souvent plus facile à mettre en œuvre que les modèles et méthodes analytiques. Contrairement aux modèles analytiques, qui nécessitent souvent une hypothèse simplifiée pour résoudre le problème, la simulation n'impose pas de telles contraintes ;

- La simulation permet d'obtenir un aperçu des facteurs qui ont le plus d'impact sur la performance d'un système ainsi que leurs relations ;
- Le processus de création du modèle de simulation nous permet d'apprendre plus spécifiquement sur le système étudié et peut même nous permettre de démontrer que le système peut fonctionner différemment de ce que la plupart des gens pensent ;
- La simulation permet de contrôler le temps.

2.4. Domaine d'application de la simulation

Le tableau suivant répertorie quelques domaines d'application liés à la simulation :

Région	Domaines d'application de la simulation
Systèmes informatiques	Les composants « hardwares », les logiciels, le réseau du « hardware », les bases de données et la gestion, le processus d'information, la fiabilité des « hardwares » et des logiciels, etc.
Domaines manufacturiers	Systèmes de manutention, les lignes d'assemblage, les installations De production automatisées, les installations de stockage, les Systèmes de contrôle d'inventaire, l'étude de fiabilité et de Maintenance, le plan d'aménagement, le design des machines, etc.
Les affaires	Analyse des stocks et des commodités, la politique des prix, les stratégies de marketing, les études d'acquisition, les « cash flow », les prévisions, les alternatives de transport, la planification de la main d'oeuvre, etc.
Gouvernement	Les armes militaires et leurs utilisations, les stratégies militaires, planification de la population, l'utilisation des terres, la distribution des soins médicaux, la protection contre les feux, services de polices, etc.

Bio-sciences	Les analyses des performances du sport, le contrôle des maladies, les cycles de vie biologiques, les études biomédicales, etc.
--------------	--

Tableau 01 : Domaine d'application de la simulation.

2.5 .Buts de la modélisation et de la simulation

Plusieurs buts peuvent être réalisés par la simulation :

- Meilleure compréhension du système ;
- Mesure de performance du système ;
- Dimensionnement/optimisation de systèmes de production (avant/après réalisation) ;
- Expérimentation du comportement dynamique des systèmes à l'aide de modèles Informatiques ;
- Réalisation d'un modèle et son utilisation économique (plus simple, moins chère, moins dangereuse, possible, etc.) à la place du système ;
- Identification des facteurs critiques (Panne, Blocage) ;
- Réponse aux questions « Que se passe-t-il...si ...? » ;
- Outil d'aide à la décision en « temps réel » (durant exploitation) ;
- Outil de formation du personnel (simulateurs de vol, simulateurs de choix...).

2.6. La simulation Multi-Agents

Dans notre travail, nous nous concentrerons sur la simulation des agents car cela semble approprié dans une situation où plusieurs robots tentent de réaliser un objectif commun.

La simulation Multi-Agents convient bien aux systèmes complexes composés de plusieurs entités ; elle fonctionne en divisant les entités qui seront représentées par les agents et en définissant leurs divers comportements et interactions, permettant aux agents de changer au fil du temps, et en étudiant et en analysant comment le système dans son ensemble se développe à la suite des actions des agents et de leurs interactions [54].

Un système de simulation Multi-Agents se compose d'un certain nombre d'agents et de règles d'interaction. Chaque agent a la capacité d'évaluer sa position sur une base individuelle et de prendre des décisions sur la base d'un ensemble de règles. Il peut effectuer une variété

d'actions liées au système modélisé. Les agents peuvent alors être en mesure de changer, permettant aux comportements inattendus de se manifester [54].

2.6.1. Méthodologie de simulation Multi-Agents:

La définition d'une théorie de la modélisation sert de base à la méthodologie de la simulation.

La traduction d'un modèle de phénomène en perspective Multi-Agents est :

- **Une décomposition du phénomène :** Dans un groupe d'éléments autonomes et discrets dont les interactions reproduisent le phénomène. Cette étape est comparable au processus des méthodes de conceptualisation orientée objet intervenant objet-réification. Il convient de noter que ce préliminaire nécessite une perspective déjà distribuée du phénomène à modéliser [8].
- **La modélisation de chacun de ces éléments par un agent :** Dans cette étape, une décision doit être prise en ce qui concerne la théorie à utiliser afin de définir les connaissances de l'agent, ses capacités fonctionnelles, ses modèles de comportement et ses modes d'interaction avec d'autres agents. Il sera utile de regarder l'intelligence artificielle et les modèles d'agents qui sont présentés pour comprendre à quel point cette décision peut être difficile. C'est à ce stade que le modèle de théorie du comportement individuel mis en avant par le domaine de recherche où la modélisation est effectuée est converti en un modèle informatique [8].
- **La définition de l'espace :** Ces personnes et les lois qui les contrôlent évoluent dans cet environnement. Cette zone sera appelée l'environnement de l'agent. Les agents et l'environnement seront souvent définis en tandem à la suite de sa définition permettant d'affiner la description des actions que les agents peuvent entreprendre ainsi que celle de leurs moyens de communication [8].
- **La définition des objets inertes :** Les agents du système seront considérés comme des objets inactifs car ils manquent à la fois de la capacité d'agir et de communiquer.

2.6.2. Intérêt de la simulation Multi-Agents :

- Étude des sociétés naturelles ;
- Modéliser de façon isomorphe les objets d'étude des sciences humaines et naturelles ;
- Choisir le niveau d'analyse du domaine ;
- Combiner plusieurs types d'expertise ;

- Modéliser les comportements eux-mêmes, voire les représentations, et non seulement leurs effets observables ;
- Réalisation de sociétés artificielles ;
- Étudier des modes d'organisation ;
- Étudier des méthodes de résolution collective de problèmes ;
- Découvrir de nouvelles analogies ou métaphores pour des algorithmes distribués.

2.6.3. Domaines d'applications de la simulation Multi-Agents :

Les travaux sur la simulation Multi-Agents s'appliquent à de nombreux domaines, Comme la modélisation de phénomènes sociaux, biologiques, économiques, etc....

Exemples de la simulation Multi-Agents :

- Une colonie d'insectes ;
- Un embouteillage ;
- Un ensemble de robots autonomes ;
- Un système social (exemple : une ville, la bourse) ;
- Un ensemble de cellules ;
- Un écosystème.

IV. Conclusion

La modélisation et la simulation de systèmes complexes sont essentielles pour comprendre le comportement des systèmes complexes, telles que ceux dans les domaines de l'économie, l'environnement, la biologie et les technologies de l'information. Les avancées dans ces techniques ont permis à surmonter des défis d'ingénierie et scientifiques, tels que prédire le comportement des matériaux à des températures élevées, concevoir des structures résistantes aux tremblements de terre, modéliser la fonction du cerveau humain, créer des systèmes de transport efficaces et prévoir les effets du changement climatique sur les écosystème.



Chapitre 3

Les systèmes Multi-Agents



I. Introduction

Le système Multi-Agents (SMA) est un ensemble de méthodes et de techniques qui permettent à plusieurs agents autonomes de coopérer et/ou de concurrencer pour atteindre un ou plusieurs objectifs communs. Un agent est une entité autonome, capable de percevoir son environnement, de prendre des décisions et d'agir sur cet environnement pour atteindre ses objectifs.

Dans un SMA, les agents peuvent être de différents types, tels que des agents logiciels, des robots, des capteurs, etc. Ils peuvent avoir des connaissances différentes et des objectifs différents, mais ils sont tous connectés les uns aux autres et interagissent pour accomplir une tâche commune.

Les SMA sont largement utilisés dans de nombreux domaines, tels que la robotique, la finance, la sécurité, la logistique, les jeux vidéo, etc. Ils sont également utilisés pour modéliser des phénomènes complexes tels que le trafic routier, la dynamique des foules et les systèmes écologiques.

Les SMA présentent plusieurs avantages par rapport aux systèmes centralisés, tels que la flexibilité, la robustesse, la sociabilité et la capacité à gérer des environnements dynamiques. Cependant, ils peuvent également présenter des défis tels que la coordination, la communication et la sécurité. Les recherches actuelles se concentrent sur la conception de méthodes efficaces pour résoudre ces défis et améliorer les performances des SMA dans différents domaines d'application.

Les systèmes Multi-Agents sont souvent utilisés pour résoudre des problèmes complexes qui nécessitent une collaboration et une coordination entre plusieurs entités. Ils sont également utilisés pour modéliser des phénomènes complexes, tels que les systèmes sociaux, économiques ou biologiques.

II. Historique et origines

Le domaine de l'intelligence artificielle distribuée et de la vie artificielle a vu l'émergence de systèmes Multi-Agents. Ces systèmes ont été développés à partir de modèles organisationnels ou de raisonnement qui ont été empruntés aux domaines de la vie et de la société.

Le but de l'IA est d'examiner les différentes formes de raisonnement en utilisant des systèmes virtuels. Ces systèmes ont la capacité de résoudre un problème en utilisant des symboles, ou un langage simplifié. Au début, le concept était de disperser les connaissances ou l'intelligence à travers une assemblée virtuelle d'experts. En utilisant une zone de mémoire partagée, les spécialistes ont pu coordonner leurs efforts. Chaque spécialiste peut y ajouter, éditer et supprimer des données ; la solution apparaîtra finalement sur la table à la suite des actions des différents spécialistes.

Une autre méthode qui a été simulée a été le développement d'une équipe d'experts, chaque expert ayant les connaissances nécessaires pour résoudre le problème. Hewitt a souligné l'importance du contrôle des interventions spécialisées en 1991. Il déplace l'attention vers le contrôle distribué plutôt que le contrôle basé sur le choix. En envoyant des messages aux différents acteurs, il a développé ce contrôle distribué. Le langage de l'acteur a été construit autour de cela.

L'IAD peut alors être décrite comme la branche de l'IA qui est concernée par la modélisation du comportement intelligent par la collaboration des agents. D'une certaine manière, l'IAD a élargi l'IA traditionnelle en incluant une dimension sociale.

III. la notion d'agent

1. Définition d'un agent

Dans le domaine de l'informatique et de l'intelligence artificielle, un agent est un programme informatique ou un système qui est capable de percevoir son environnement, d'analyser les informations qu'il reçoit, et de prendre des décisions ou d'agir en conséquence pour atteindre un ou plusieurs objectifs prédéfinis [23].

Un agent peut être conçu pour effectuer des tâches spécifiques, telles que la surveillance de systèmes, la gestion de bases de données, la planification de trajets, la recommandation de produits ou la réponse à des requêtes utilisateur. Les agents peuvent également être utilisés pour automatiser des processus d'affaires ou des tâches répétitives [29].

Dans le contexte de l'intelligence artificielle, les agents peuvent utiliser des techniques telles que l'apprentissage automatique ou l'apprentissage par renforcement pour améliorer leur capacité à prendre des décisions et à agir en fonction de leur environnement. Les agents

2.1. Autonomie

Les agents sont autonomes et capables de prendre des décisions sans intervention humaine directe.

2.2. Objectif

Les agents ont des objectifs qu'ils cherchent à atteindre en effectuant des actions dans leur environnement.

2.3. Perception

Les agents sont capables de percevoir leur environnement à travers des capteurs, ce qui leur permet de recueillir des informations pour prendre des décisions.

2.4. Adaptabilité

Les agents peuvent s'adapter à des situations changeantes et peuvent modifier leur comportement pour atteindre leurs objectifs.

2.5. Interaction

Les agents peuvent interagir avec d'autres agents ou avec des humains pour atteindre leurs objectifs.

2.6 .Communication

Les agents peuvent communiquer entre eux pour coordonner leurs actions et partager des informations.

2.7. Raisonner

Les agents sont capables de raisonner pour prendre des décisions en utilisant des techniques de raisonnement logique ou probabiliste.

2.8. Apprentissage

Les agents peuvent apprendre à partir de l'expérience et améliorer leurs performances au fil du temps.
Ces caractéristiques permettent aux agents d'être très flexibles et de s'adapter à de nombreux environnements différents, ce qui les rend très utiles dans de nombreux domaines, notamment l'intelligence artificielle, la robotique et les jeux vidéo.

3. Différentes catégories et modèles d'agents

Nous présenterons les différents modèles d'agents dans cette section après avoir défini les agents et les systèmes Multi-Agents afin que vous puissiez comprendre leurs caractéristiques

et leurs modes d'exploitation. On distingue deux grandes familles d'agents : les agents réactifs et les agents cognitifs et les agents hybrides.

3.1. Agents cognitifs

Les agents cognitifs sont des programmes informatiques qui sont conçus pour simuler ou reproduire des fonctions cognitives telles que la perception, la compréhension, le raisonnement, la planification, l'apprentissage, la communication, et l'interaction sociale humaine. Les agents cognitifs peuvent être utilisés pour résoudre des problèmes complexes dans de nombreux domaines, tels que l'ingénierie, la médecine, la finance, l'éducation, le divertissement, et les jeux [50].

Les agents cognitifs utilisent souvent des techniques d'intelligence artificielle telles que l'apprentissage automatique, le traitement du langage naturel, la reconnaissance de formes, la planification et l'optimisation, ainsi que la logique et la représentation des connaissances. Ils peuvent être autonomes ou collaboratifs et peuvent interagir avec d'autres agents ou avec des utilisateurs humains.

Ces agents ont une capacité cognitive plus avancée, ce qui leur permet d'apprendre à partir de l'expérience et de prendre des décisions plus sophistiquées en fonction de leur connaissance de l'environnement [28].

Un agent cognitif est un système informatique qui utilise des méthodes et des techniques d'intelligence artificielle pour résoudre des problèmes, prendre des décisions et interagir avec des humains ou d'autres agents. La structure d'un agent cognitif peut varier en fonction de ses objectifs et des tâches qu'il est conçu pour accomplir, mais en général, elle comprend les éléments suivants :

3.1.1. Perception

Cette partie de l'agent est responsable de la collecte d'informations sur l'environnement. Les capteurs et les dispositifs d'entrée, tels que les caméras, les microphones et les capteurs de température, permettent à l'agent de percevoir l'état de l'environnement dans lequel il se trouve.

3.1.2. Raisonnement

Cette partie de l'agent utilise des algorithmes et des modèles d'apprentissage pour traiter les données perçues et générer des informations utiles. Les algorithmes peuvent être basés sur des règles, des statistiques, ou des réseaux de neurones.

3.1.3. Prise de décision

Cette partie de l'agent utilise les informations traitées pour prendre des décisions et planifier des actions. Les algorithmes de prise de décision peuvent être basés sur la logique, les probabilités ou le renforcement.

3.1.4. Communication

Cette partie de l'agent permet à l'agent d'interagir avec les humains ou d'autres agents. Les interfaces de communication peuvent inclure des interfaces vocales, des interfaces graphiques ou des interfaces de programmation d'applications (API).

3.1.5. Apprentissage :

Cette partie de l'agent permet à l'agent de s'améliorer avec l'expérience. Les algorithmes d'apprentissage automatique permettent à l'agent d'ajuster son comportement en fonction des données qu'il reçoit, ce qui lui permet d'améliorer sa performance au fil du temps.

En combinant ces différentes parties, un agent cognitif peut résoudre une grande variété de problèmes et interagir avec les humains de manière plus naturelle et efficace.

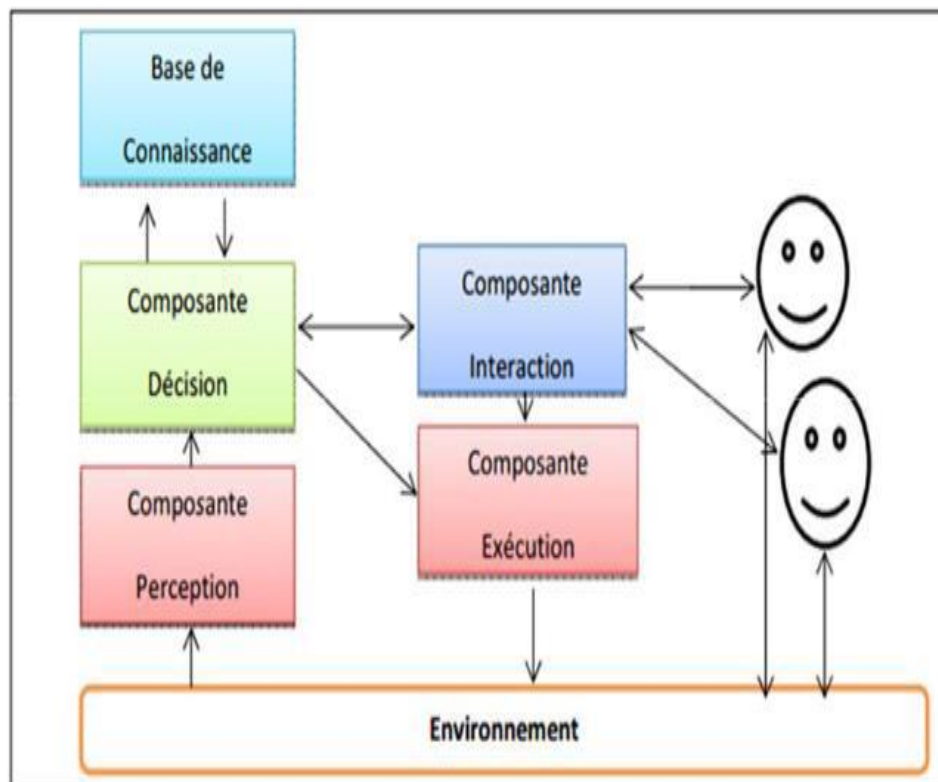


Figure 06: Structure d'un agent cognitif

3.2. Agents réactif

Un agent réactif est un type d'agent dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA) qui agit en réponse à des stimuli de son environnement sans utiliser de mémoire ou de représentation interne complexe de l'état de l'environnement.

Plus précisément, un agent réactif se base sur une fonction de transition qui lui permet de sélectionner une action appropriée en fonction des perceptions de l'environnement immédiat. Cette fonction de transition est souvent représentée sous forme de table ou d'arbre de décision.

Les agents réactifs sont souvent utilisés dans des applications telles que les systèmes de contrôle industriels, les robots autonomes et les jeux vidéo, où il est important de prendre des décisions rapides en fonction de l'état actuel de l'environnement. Cependant, ils peuvent être limités dans leur capacité à résoudre des problèmes complexes nécessitant une planification à long terme ou une représentation plus sophistiquée de l'état de l'environnement [52].

Les agents réactifs sont des agents d'intelligence artificielle qui agissent en fonction des perceptions immédiates de leur environnement. Ils ne maintiennent pas de modèle interne du monde ou ne planifient pas en conséquence, mais agissent simplement en réaction aux stimuli externes.

Il existe plusieurs types d'agents réactifs, notamment :

❖ **Les agents réactifs simples :**

Ils réagissent de manière directe à un stimulus particulier. Par exemple, une alarme de fumée réagit simplement à la présence de fumée.

❖ **Les agents réactifs basés sur des modèles :**

Ils réagissent en fonction d'un modèle interne qui représente l'état du monde. Par exemple, un système de surveillance de la qualité de l'air peut réagir en fonction des niveaux de pollution enregistrés.

❖ **Les agents réactifs basés sur des règles :**

Ils utilisent des règles simples pour déterminer leur comportement. Par exemple, un système de surveillance des feux de circulation peut réagir en fonction de règles prédéfinies sur la manière de gérer les feux de circulation.

❖ Les agents réactifs basés sur l'apprentissage :

Ils apprennent à partir de leurs expériences passées et ajustent leur comportement en conséquence. Par exemple, un système de recommandation peut ajuster ses recommandations en fonction des choix précédents de l'utilisateur.

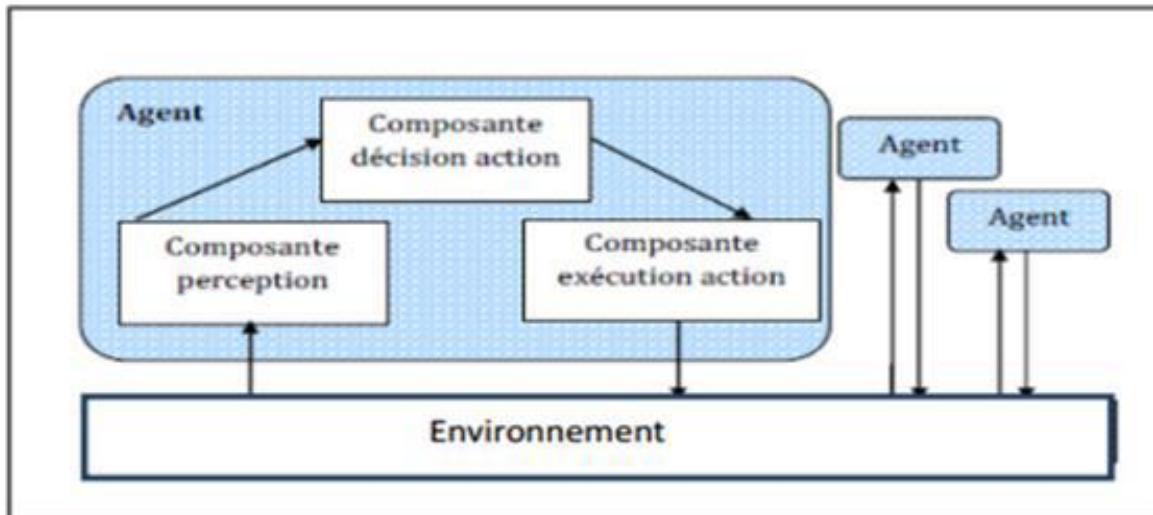


Figure 07: Structure générale d'un agent réactif dans un système Multi-Agents

Le tableau 2.1 donne quelques ordres de comparaison entre les agents cognitifs et réactifs [24] :

Systèmes d'agent cognitifs	Systèmes d'agent réactifs
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'agent réduit	Nombre d'agents élevé

Tableau02: Comparaison entre agents cognitifs et agents réactifs

3.3. Les agents hybrides

Afin de résoudre des problèmes difficiles, les systèmes de traitement de l'information appelés « agents hybrides » mélangent diverses technologies d'IA. Ces agents sont souvent

utilisés dans des situations où il est nécessaire de combiner différents champs d'IA pour résoudre le problème, tels que la traduction automatique et la reconnaissance vocale [13].

Les avantages de chaque technologie d'IA utilisée sont destinés à être exploités par les agents hybrides. Par exemple, un agent hybride qui utilise à la fois des réseaux neuronaux profonds et des règles d'experts peut bénéficier de la capacité de ces réseaux à apprendre de grandes quantités de données et de l'exactitude de règles spécialisées dans certains scénarios.

Dans les applications industrielles, y compris la robotique, la fabrication automatisée, les systèmes de contrôle de processus et les systèmes de gestion de l'énergie, les agents hybrides sont fréquemment utilisés. Ils sont également utilisés dans des applications largement utilisées telles que la traduction automatique et la reconnaissance vocale.

En conclusion, les agents hybrides sont des systèmes d'IA qui mélangent de nombreuses technologies pour résoudre des problèmes complexes dans une variété de domaines [13].

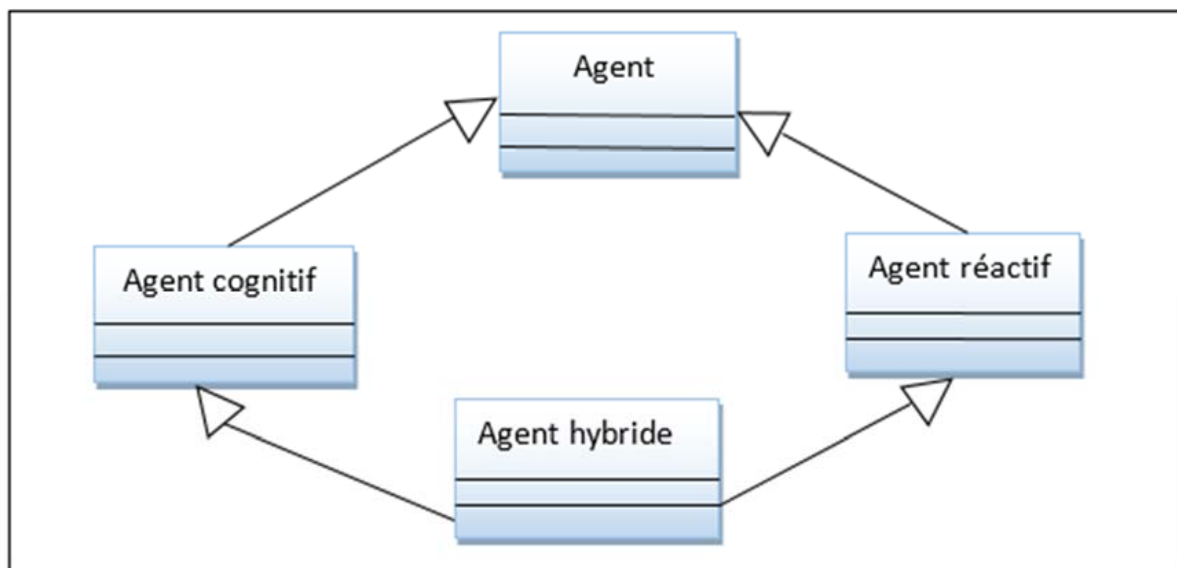


Figure 08 : Modèle d'agents hybrides

4. Différence entre un Agents et un Objets

Un ensemble de services qu'un objet offre (ses méthodes) le définit, et il ne peut pas refuser d'exécuter ces services quand un autre objet les demande. Les objets font des tâches ; ils n'ont pas d'objectifs ou cherchent à être accomplis. Les agents plus sophistiqués, cependant, ont des objectifs qui leur donnent de l'autonomie dans la façon dont ils répondent aux messages qu'ils reçoivent [25].

Les objets utilisent un mécanisme d'envoi de messages qui peut être résumé par un simple appel de méthode. Pour les agents, les interactions sont plus complexes et impliquent des communications de haut niveau. Il est crucial que l'agent choisisse comment interagir avec et répondre aux messages par lui-même.

Un agent est une entité capable de recevoir et d'émettre des messages. Ce comportement est minimaliste, et correspond d'ailleurs tout à fait à la définition d'un objet. Néanmoins, un objet est contraint de répondre aux requêtes qui lui sont soumises, contrairement à l'agent qui dispose de son propre libre arbitre. Concrètement, les objets font ce qu'on leur demande, tandis qu'avec les agents, il faut négocier. Donc, il est important que les agents contrôlent eux-mêmes leur comportement et les ressources qu'ils possèdent. C'est ce qui caractérise leur autonomie, et d'une certaine manière leur donne conscience de leurs possibilités.

Néanmoins, le lien existant entre la notion d'objet et celle d'agent reste fort. Il n'y a pas de frontière nette : un objet peut être considéré comme un agent dont le langage d'expression se résume à l'emploi de mots clés correspondant à ses méthodes comme le montre le tableau ci-dessous [25].

5. Le comportement d'un agent

Le comportement d'une personne peut être divisé en trois étapes principales : perception, délibération et action. (Figure 09). Ces trois étapes sont effectuées dans un cycle alors qu'un agent agit sur son comportement [32].

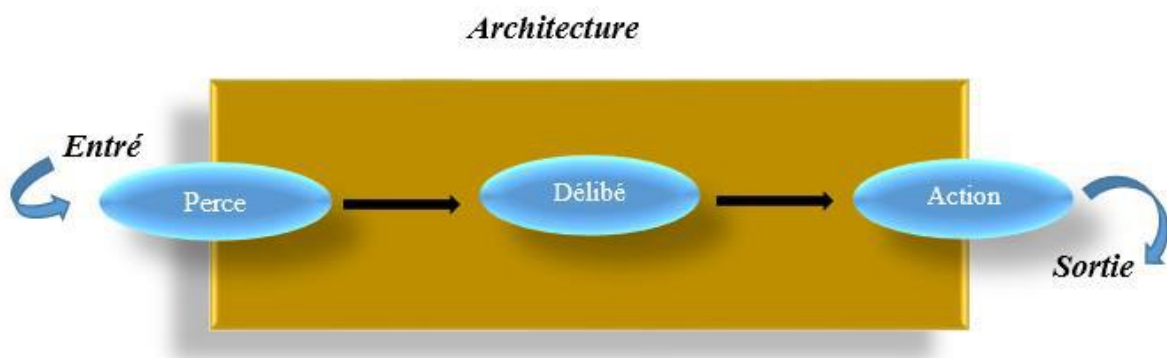


Figure 09: Les trois phases du comportement d'un agent. Heng

Ce cycle permet à un agent de voir son environnement, de prendre une décision en fonction de ce qu'il a vu et d'agir. La phase de délibération peut ne pas se produire en fonction du type d'agent [32].

IV. Notion du système Multi-Agents

1. Définition Un système Multi-Agents

Un Système Multi-Agents (SMA) comporte plusieurs agents qui interagissent entre eux dans un environnement commun. Certains de ces agents peuvent être des personnes ou leurs représentants (avatars), ou même des machines mécaniques. S'il y a moins de trois agents, on parle plutôt d'interaction homme/machine, ou machine/machine que de systèmes Multi-Agents [29].

On appelle système Multi-Agents (ou SMA), un système composé des éléments suivants [46] :

- E, c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
- 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.
- Un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers (A inclut O), lesquels représentent les entités actives du système.
- Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
- Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O.
- 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.

Donc un système multi agents (SMA) est une sorte de société d'un ensemble d'agents qui coopèrent pour un but commun, qu'un agent ne peut pas le faire seul. Il y a plusieurs tentatives pour la définition des agents et des systèmes Multi-Agents. La situation est comparable en quelque sorte avec celle rencontrée quand les scientifiques ont essayé de définir la notion d'intelligence artificielle. Pourquoi a-t-il été si difficile de définir l'intelligence artificielle (et nous nous doutons même maintenant d'avoir réussi à donner une définition

exacte) et pourquoi est-il si difficile de définir les systèmes d'agents, quand d'autres concepts de l'informatique, comme ceux d'objet et orienté-objet, calcul distribué, etc., n'ont pas rencontré une si grande résistance à être définis.

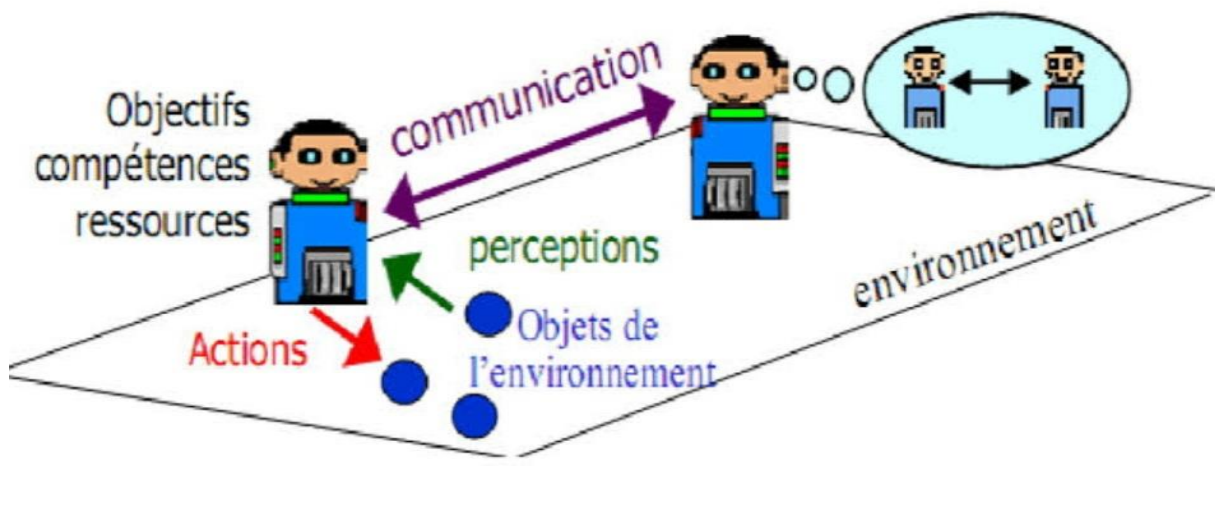


Figure 10 : Systèmes Multi-Agents [26]

Selon Wooldridge et Jennings, une SMA est un groupe d'agents travaillant ensemble pour atteindre leurs objectifs ou compléter leurs tâches. Les interactions directes par la communication et les connexions indirectes par l'activité et la perception de l'environnement sont possibles dans les rencontres. Lorsque les agents coopèrent, ou quand ils ont des objectifs communs, les interactions peuvent être utilisées pour atteindre ce qui suit. La coordination est nécessaire pour atteindre les objectifs en prévenant les conflits et en tirant le meilleur parti de leurs interactions. Compétition lorsque les agents travaillent les uns contre les autres.

2. Caractéristiques des SMA

- ✓ Chaque agent a des informations ou des capacités de résolution de problèmes limitées ;
- ✓ Chaque agent a un point de vue partiel ;
- ✓ Aucun contrôle global du système multi agent ;
- ✓ Les données sont décentralisées ;
- ✓ Le calcul est asynchrone [5].

3. Les SMAs et les autres paradigmes de la programmation

3.1. Les SMAs et l'intelligence artificielle

Les SMA sont nés dans le milieu de l'intelligence artificiel distribué (IAD), tel que le besoin des entités intelligentes qui font des tâches autonomes et peuvent être éparpillés de partout où on a besoin. Malgré les points communs qui existent entre les systèmes multi agents et les systèmes experts, surtout ce qui concerne la tentative de résoudre des problèmes qui n'ont pas de solution avec d'autres méthodes traditionnelles. Il y a certaines différences entre les deux notions :

- un système expert ne perçoit pas son environnement mais plutôt acquiert les informations de l'environnement à travers une tierce personne, bien qu'un agent a des capteurs à travers lesquels il perçoit son environnement ;
- Aussi un système expert ne réagit pas à l'environnement mais donne seulement des conseils (ou des feeds back) qui aident un expert, dans le temps où un agent a des actionneurs à travers lesquels il modifie lui-même son environnement.

3.2. Les SMAs et l'approche Orienté Objet

Un paradigme très proche des systèmes multi agents est l'approche Orienté Objet, et il n'y a pas des frontières claires entre un agent et un objet, et la preuve est que certains agents sont programmés en utilisant des langages orientés objet. Cependant on peut trouver des différences entre les deux entités objet et agent tel que :

- L'autonomie, un agent peut décider seul dans des situations de prendre l'un ou l'autre des chemins possibles, bien que l'objet fasse exactement ce qui est prévu précédemment ;
- Un objet ne peut pas refuser d'exécuter une méthode une fois invoqué par d'autres objets donc il n'a pas de contrôle sur son comportement à l'inverse un agent négocie ;
- les actions qui lui sont demandées et exécute seulement ceux que lui conviennent.

4. Avantages Du SMA

L'utilisation des SMA présente une série d'avantages:

- **Système dynamique :** les SMA héritent des bénéfices de l'IA au niveau du traitement symbolique (au niveau des connaissances). En revanche, contrairement 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.
- **Nombre important d'agents :** un grand nombre d'agents est au cœur du problème dans ce type de modélisation contrairement à la théorie des jeux où rarement plus de trois acteurs sont représentés.
- **Souplesse de l'outil informatique :** qui permet de modifier le comportement des agents, ajouter ou supprimer des actions possibles, étendre les informations disponibles à l'ensemble des agents à la différence des modèles traditionnellement utilisés en science économique.
- **Une résolution distribuée de problèmes :** Il est possible de décomposer un problème en sous-parties de résoudre chacune de façon indépendante pour aboutir à une solution stable.

5. Composant d'un système Multi-Agents

Selon la définition de l'approche Voyelle d'Yves Demazeau, un système Multi-Agents se compose de quatre composantes : Organisation, Environnement, Interaction et Agents.

- ❖ **Agents:** Les structures internes des agents dont nous avons parlé dans la section 1.
- ❖ **Environnement :** La nature du problème pour lequel le système a été conçu ou le domaine de l'application influence grandement la façon dont l'environnement est défini. Par conséquent, il est difficile de donner une définition générale. Dans un

système Multi-Agents, le terme "environnement" se réfère à l'espace partagé entre les agents du système.

- ✚ **Les environnements peuvent être accessibles ou inaccessibles :** si un agent est capable d'utiliser des primitifs de perception pour déterminer l'état de l'environnement et répondre en conséquence, par exemple. Si l'environnement est accessible, l'agent doit avoir une sorte d'aide à la mémoire afin qu'ils puissent enregistrer les changements qui ont eu lieu.
- ✚ **Déterministe /no déterministe :** Selon que l'état futur de l'environnement ne soit, ou ne soit pas fixé par son état courant et les actions de l'agent. Dans un environnement déterministe, une action a un effet unique garanti.
- ✚ **Discret / continu :** discret si le nombre d'activités faisables et les conditions environnementales sont complètes [40].
- ❖ **Interactions :** sont révélées par les définitions de l'idée d'un agent qui ont été précédemment présentées dans SMA : les interactions d'une substance avec son environnement et ses interactions avec d'autres agents au sein du système. Le premier type d'engagement se produit à travers la façon dont l'agent est perçu et à quel point il est capable d'agir. Le deuxième type d'interaction est le "Glue" qui maintient l'ensemble du groupe d'agents ensemble. Sans ce composant, un agent est coincé dans son cycle de perception, de délibération (dans le cas des agents cognitifs) et d'action. En conséquence, même si la production d'un comportement collectif est ce qu'un système Multi-Agents est censé faire, cela ne serait pas réalisable. Les interactions sont montrées par [40].
 - ✚ **Le processus de coordination :** est la collecte de tâches supplémentaires qui doivent être effectuées dans un environnement avec plusieurs agents puisqu'un seul agent poursuivant les mêmes objectifs ne serait pas réussi [38].
 - ✚ **La coopération :** Les agents qui décident de travailler ensemble acquièrent une certaine mentalité appelée coopération. Elle donne une autorisation d'agent pour [46] :

- Mettre à jour les connaissances globales du système ;
- Intégrer des informations provenant d'autres agents ;
- Interrompre son plan d'exécution pour aider les autres agents ;
- Assignez la tâche difficile à un autre agent qui possède les compétences nécessaires.

✚ **La négociation** : L'objectif de la négociation est d'améliorer les accords (en réduisant les incertitudes et les incohérences) sur les points de vue partagés ou les plans d'action par l'échange structuré d'informations importantes.

❖ **Organisation** : est un arrangement de relations entre les parties ou les personnes qui entraînent une unité ou un système avec des qualités inconnues au niveau des parties ou des personnes. Une variété de choses, de personnes ou d'événements sont organisés d'une manière interconnectée de sorte qu'ils deviennent finalement un tout. Elle garantit la solidarité relative et la solidité, ce qui donne au système une certaine longévité malgré les fluctuations aléatoires [47].

6. Formes d'interaction dans les systèmes Multi-Agents :

Plusieurs agents travaillant ensemble pour atteindre un objectif commun constituent un système Multi-Agents, mais la cohérence et l'intelligence de ce système proviennent généralement de ses interactions plutôt que de l'Intelligence des agents individuels qui le composent.

Selon Jacques Ferber, l'interaction est l'établissement d'une relation dynamique entre deux ou plusieurs acteurs à travers un groupe de relations réciproques. [29] Non seulement les interactions sont le résultat de plusieurs individus agissant simultanément, mais elles sont également une composante cruciale dans la formation des organisations sociales.

Les trois façons dont les agents interagissent sont les suivantes :

6.1. La coopération

Chaque agent est équipé de compétences qui leur permettent d'exécuter des tâches spécifiques ou de résoudre des problèmes spécifiés, mais parfois ces compétences ne seront

pas suffisantes pour gérer des situations complexes. Dans ces cas, l'agent aura besoin de l'aide d'autres agents pour déplacer le système dans la direction qu'ils veulent qu'il va. Par conséquent, la coopération est la collaboration de plusieurs agents pour atteindre un objectif personnel ou collectif.

6.2. La coordination

Lors de l'utilisation de ressources partagées, qui sont généralement rares, ou lorsque les agents du système effectuent des tâches qui sont liées et complémentaires les unes aux autres, la coordination entre les acteurs du système est essentielle. Les agents sont alors tenus de coordonner leurs plans et leurs tâches, soit pour une meilleure utilisation des ressources et éviter les conflits d'accès, soit en vue d'une meilleure collaboration, ce qui exige que les agents synchronisent leurs actions et échangent les résultats qui sont essentiels au fonctionnement des autres agents.

6.3. La négociation

Dans un système Multi-Agents, les objectifs des agents peuvent être en conflit les uns avec les autres, et ils peuvent avoir des exigences contradictoires. En conséquence, une solution doit être trouvée qui permet à chaque agent de continuer à faire ce qu'il fait, ou les agents doivent négocier la solution.

La pratique d'améliorer les accords (en réduisant les désaccords et les incertitudes) sur les points de vue partagés ou les plans d'action par l'échange structuré d'informations importantes sont connus sous le nom de négociation.

7. Domaines d'application des SMA

Les systèmes Multi-Agents sont à l'intersection de plusieurs domaines scientifiques tels que l'information répartie, le génie logiciel, l'intelligence collective, l'intelligence artificielle. Par conséquent, ils font appel à plusieurs autres disciplines, telles que la sociologie, la psychologie sociale, les sciences cognitives, la biologie, etc. Il en découle que les SMA sont appliqués dans divers domaines, comme l'industrie, le commerce, le divertissement et la médecine. Parmi les applications industrielles nous pouvons citer le pilotage des Système de production, la télécommunication comme le contrôle de réseaux, le contrôle de trafic aérien et la gestion du trafic et du transport. Parmi les applications commerciales à base d'agent, on

trouve la gestion de l'information, et le commerce électronique. Un grand domaine d'application des SMA est celui des divertissements, comme dans les jeux, le théâtre interactif et la réalité virtuelle.

8. La communication dans les SMA

Dans SMA, les interactions (avec leurs différentes formes, telles que la coopération et la coordination) et l'organisation sont basées sur la communication. Une définition de la communication est une forme localisée de l'action d'un agent vis-à-vis d'autres agents. L'interview suivante peut être utilisée pour résumer les questions traitées par un modèle de communication [39].

8.1. Les types de Communication

La communication entre les agents peut être détaillée comme suit :

8.1.1. Communication directe

Agent à agent, exemple : communication des fourmis moyennant leurs antennes. Communication par envoi de message :(unicast, broadcaste, ou multicast), ici on considère deux cas :

- Envoi synchrone de messages (le message est traité dès sa réception) ;
- Envoi asynchrone de message (le message peut être conservé à un traitement ultérieur).

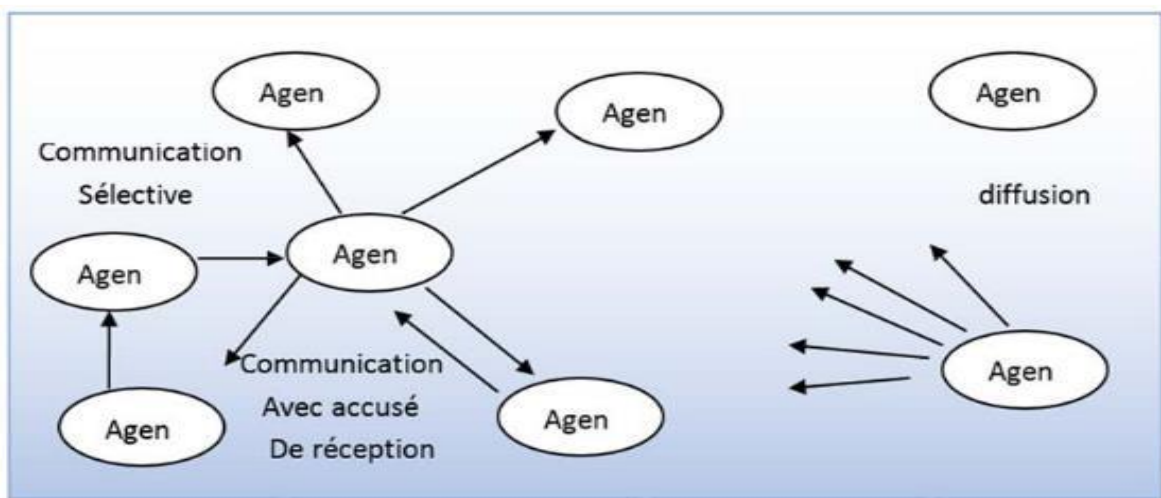


Figure 11 : Communication par envoi de messages

8.1.2. Communication indirecte

- Via un tableau noir ;
- Via l'environnement : ici l'environnement joue le rôle d'un médiateur, exemple : la phéromone déposée par les fourmis dans l'environnement.

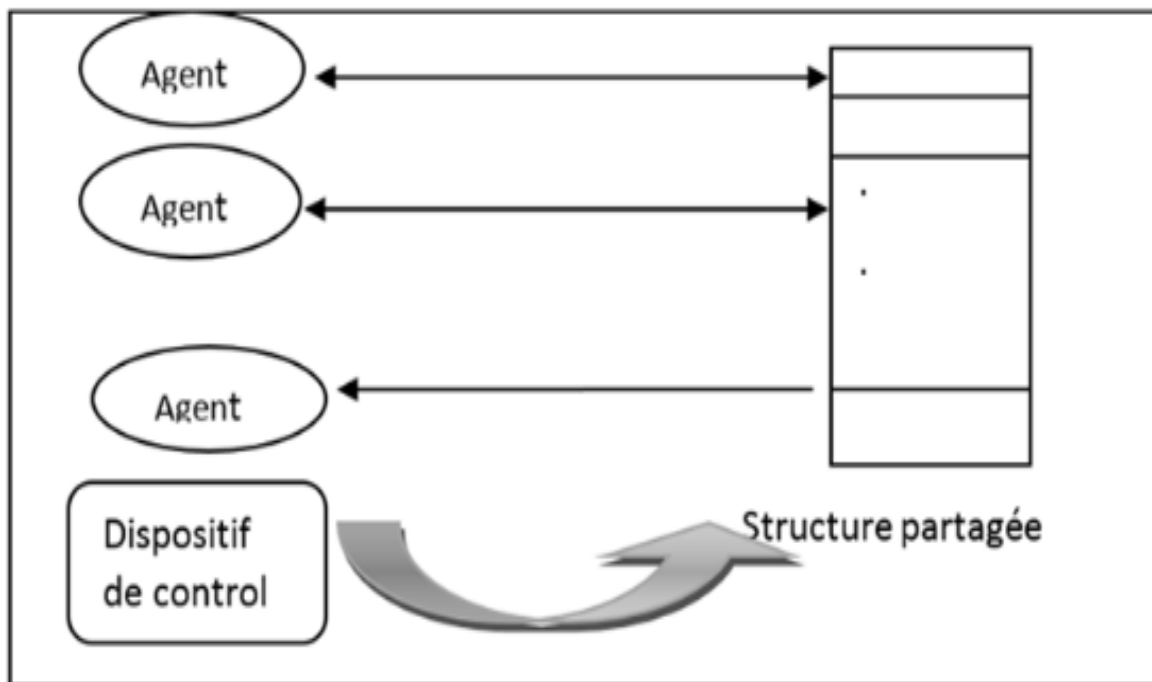


Figure 12 : Communication par tableau noir

9. La simulation Multi-Agents

La simulation Multi-Agents est une méthode de modélisation et de simulation informatique qui permet de représenter des systèmes complexes composés d'entités individuelles (les agents) interagissant entre elles et avec leur environnement. Cette approche permet de simuler des phénomènes sociaux, économiques, écologiques, biologiques et autres, en mettant l'accent sur les interactions entre les agents plutôt que sur des règles globales et abstraites [42].

Dans une simulation Multi-Agents, chaque agent est programmé pour prendre des décisions autonomes en fonction de son état interne et des informations qu'il reçoit de son environnement et des autres agents. Les interactions entre les agents peuvent être modélisées de différentes manières, selon le type de système étudié et les hypothèses que l'on souhaite

tester. Les résultats de la simulation permettent d'observer les comportements émergents du système, c'est-à-dire les tendances et les propriétés globales qui émergent de l'interaction des agents individuels.

La simulation Multi-Agents est utilisée dans de nombreux domaines, tels que la sociologie, l'économie, l'écologie, la biologie, la physique, la robotique, les jeux vidéo, la planification urbaine, la logistique et la défense. Elle permet de tester des hypothèses et de prédire les effets de différents scénarios, d'explorer des systèmes complexes difficilement modélisables autrement, et d'aider à la prise de décision dans des situations où l'on dispose de peu de données empiriques [42].

10. Modélisation Mathématique Vs Modélisation Multi-Agents

La modélisation mathématique et la modélisation Multi-Agents sont deux approches distinctes de la modélisation et de la simulation. Bien qu'elles partagent des similitudes, elles ont également des différences importantes [49].

La modélisation mathématique consiste à utiliser des équations mathématiques pour décrire le comportement d'un système. Cette approche est basée sur des hypothèses simplificatrices et des lois mathématiques pour décrire les relations causales entre les variables du système. Les modèles mathématiques sont souvent utilisés dans les domaines de la physique, de la chimie et de l'ingénierie, où les systèmes peuvent être décrits en termes de variables quantitatives et de relations déterministes.

En revanche, la modélisation Multi-Agents est une approche de modélisation basée sur la simulation informatique, qui utilise des agents individuels pour représenter les entités et les comportements d'un système. Cette approche est souvent utilisée pour modéliser des systèmes complexes et adaptatifs, tels que les systèmes socio-économiques, écologiques et biologiques. Les agents sont programmés pour interagir les uns avec les autres et avec leur environnement, et les résultats de la simulation peuvent révéler des comportements émergents du système.

Une des différences les plus importantes entre les deux approches est que la modélisation mathématique est basée sur des relations causales déterministes, alors que la modélisation Multi-Agents peut inclure des éléments stochastiques et des interactions non linéaires entre les agents. Les modèles mathématiques sont souvent plus simples à construire, mais ils peuvent être limités dans leur capacité à représenter des systèmes complexes et adaptatifs. La

modélisation Multi-Agents, en revanche, peut être plus flexible et capable de capturer des phénomènes plus complexes, mais elle peut également être plus difficile à construire et à valider.

En fin de compte, le choix entre la modélisation mathématique et la modélisation Multi-Agents dépendra des caractéristiques du système étudié, des questions de recherche posées, des données disponibles et des ressources disponibles pour construire et valider le modèle. **Dans certains cas**, une combinaison des deux approches peut être utilisée pour combiner les avantages des deux approches [11].

11. Les plates-formes Multi-Agents

Il existe de nombreuses plates-formes Multi-Agents disponibles qui sont adaptées à différents types d'agents. Les formes de plaques fournissent une couche d'abstraction qui facilite la mise en œuvre des idées de système Multi-Agents.

D'autre part, elle permet également de déployer ces systèmes. Ils servent de conteneur pour le mouvement et l'exécution des agents en conséquence. En fait, les plateformes fournissent un environnement dans lequel les agents peuvent gérer leurs cycles de vie et avoir accès à des services spécifiques.

Cinq catégories peuvent être utilisées pour regrouper les plates-formes système Multi-Agents :

- Des outils de simulation permettant la fourniture d'une collection d'outils et de bibliothèques pour aider dans le développement de la simulation Multi-Agents ;
- Des outils pour la mise en œuvre d'architectures basées sur les agents ;
- Les outils pour la conceptualisation basée sur un modèle de composant ;
- Les outils de conception et de mise en œuvre fournissent une collection d'outils pour définir un groupe d'agents ;
- Le développement, la mise en œuvre et les outils de validation.

11.1. Jack :

Selon sa description, Jack est un environnement basé sur Java pour développer, exécuter et intégrer des systèmes Multi-Agents commerciaux qui utilisent une approche basée sur des

composants. Elle a été créée par la société australienne Agent Oriented Software Pty. Les agents sont basés sur le modèle de croyance, de désir et d'intention (BDI) créé par l'Institut australien d'intelligence artificielle (AAIL).

11.2. ZEUS

Développé par le Programme de recherche sur les agents du British Telecom Intelligent System Research Laboratory, il est un environnement intégré. Cette plate-forme est organisée autour des concepts suivants : les agents, leurs objectifs, leurs tâches (ce qu'ils doivent faire pour atteindre leurs buts), et les faits (ce que les agents considèrent comme étant vrai). Une version open source de la Platform est disponible.

11.3. Agent Builder

La plate-forme Réticuler System Inc. a créé l'environnement de développement JAVA connu sous le nom Agent Builder. This commercial tool enables the creation of intelligent agents based on the BDI model that use the AGENT-0 language for communication.

11.4. MADKIT

La méthodologie Aalaadin ou AGR (agent/groupe/rôle) est la base de l'environnement MADKit. The tool offers an editor that enables the deployment and management of SMA (G-box).

La gestion effectuée à l'aide de cet éditeur offre un certain nombre de possibilités intéressantes. The tool also provides a tool for running simulations.

11.5. JADE

Jade est une plate-forme Java pour les systèmes Multi-Agents respectant le standard FIPA, JADE a été développée par l'université de Parme et C-SELT – centre de recherche télécom Italien.

Le but de JADE est de simplifier le développement des systèmes Multi-Agents en assurant la conformité des standards par un ensemble complet de services et agents. En se conformant aux standards FIPA : service de nom, service de pages jaunes, messages transportés et service d'analyse, et une bibliothèque de protocole d'interactions de FIPA, Jade

possède trois modules principaux nécessaires aux normes FIPA, Ils sont lancés à chaque démarrage de la plate-forme.

- DF « Directory Facilitator » fournit un service de « pages jaunes » à la plate-forme.
- ACC « Agent Communication Channel » gère la communication entre les agents.
- AMS « Agent Management System » supervise l'enregistrement des agents, leur Authentification, leur accès et l'utilisation du système.

V. Conclusion

En conclusion, les systèmes Multi-Agents sont des modèles informatiques basés sur la coopération et l'interaction entre plusieurs agents autonomes qui agissent ensemble pour atteindre un objectif commun. Ces systèmes sont de plus en plus utilisés dans des domaines tels que la robotique, l'intelligence artificielle, la modélisation des processus sociaux et économiques, les jeux, la sécurité et la gestion de l'environnement.

Les systèmes Multi-Agents offrent plusieurs avantages, tels que la flexibilité, la robustesse, la résilience, la scalabilité et la capacité à gérer des environnements complexes et dynamiques.



Chapitre 4

Conception et Implémentation



I. Introduction

En tant que sous-domaine de la biologie, l'immunologie concerne la compréhension du système immunitaire, qui est composé de tissus, de cellules et de molécules qui préservent l'intégrité du corps. Un système de plusieurs agents sera utilisé pour simuler un système multicellulaire.

Dans ce modèle, chaque cellule est représentée par un agent avec un ensemble de caractéristiques (vie limitée, emplacement dans l'environnement, etc.), un ou plusieurs comportements simples ou complexes (mouvement, interaction, prolifération, etc.) et des capteurs qui lui permettent de ressentir son environnement.

II. Modélisation mathématique (Le modèle 3D)

La technique de modélisation mathématique, souvent appelée modèle en trois dimensions, implique l'utilisation d'idées mathématiques pour représenter des objets tridimensionnels. Elle est largement utilisée dans une variété de domaines, y compris l'ingénierie, l'architecture, la conception graphique, la réalité virtuelle, les jeux vidéo et bien d'autres.

Le premier modèle du phénomène immunitaire a été développé en 1966 [31] et est basé sur le calcul des équations différentielles. Différents modèles ont émergé à la suite du développement de l'informatique.

Les premiers modèles mathématiques de l'infection par le VIH sont apparus dans les années 1990. ([1], [2], [58], etc.). D'autres modèles ont été réalisés récemment, y compris [7], [9], [41].

L'objectif de la modélisation mathématique des processus biologiques est de mieux comprendre les caractéristiques complexes et souvent mal comprises de ces processus. Ces modèles mathématiques sont constitués d'une collection d'équations différentielles et de systèmes d'équations partielles qui se rapportent :

- ✚ Un groupe de variables qui ensemble constituent l'état du système étudié, tels que la température corporelle, la charge virale, la pression artérielle, etc... ;
- ✚ Une collection de paramètres qui sont des constantes spécifiques au système, telles que la masse corporelle, la durée de vie virale ou la couleur des yeux. Une autre

façon de le dire est qu'un paramètre est toujours dynamiquement lent ou suffisamment lent pour que ses fluctuations soient ignorées au cours de l'étude ;

- ✚ Un ensemble de restrictions : l'espérance de vie moyenne d'un être humain est actuellement de 200 ans. Le taux de CD4 humain est de 2000 CD4 / mm³ et est continuellement positif, etc.

Le modèle fondamental de l'infection par le VIH est le modèle 3D [59] qui facilite l'identification des mécanismes clés de l'infection. Cette équation, où T , T^* , et V désignent les taux respectifs de variation dans les densités de la population CD4, la population infectée par CD4 et la population virale, décrit les interactions entre trois catégories de cellules: les lymphocytes CD4 (T), les cellules CD4 infectées (T^*), et enfin la population virus (Virale):

$$\begin{cases} T' = s - \delta T - \beta TV \\ T^{*'} = \beta TV - u T^* \\ V' = k T^* - c V \end{cases}$$

Les cellules lymphocytes CD4 sont produites par le thymus avec un taux constant égale à s CD4 par jour dans un mm^3 du sang, et meurent avec un taux de mortalité naturelle égale à δ cellules par jour.

La population des lymphocytes CD4 perd également un nombre de cellules qui se transforment en des CD4 infectées à cause de l'infection par le virus à un rythme : βTV dont β représente l'infectivité des virus VIH c'est-à-dire la probabilité qu'une rencontre entre CD4 et VIH soit infectieuse.

La vitesse à laquelle les cellules CD4 positives deviennent des cellules infectées par CD4 représente le taux auquel ces dernières cellules sont produites, avec un taux de mortalité naturel de u cellules par jour.

Le taux de VIH du virus k produit quotidiennement par un CD4 infecté est égal au taux de mortalité naturelle quotidien du virus c .

La figure (fig.13) représente les résultats de la phase de primo-infection et la phase asymptomatique dans le processus de l'infection à partir d'une population initiale comprend des CD4, virus et CD4 infectées. Avec le jeu de paramètres suivant : taux de production des

CD4=7 cellules/jour ; taux de production des virus =99 virus/jour ; infectivité des virus $\beta=4.21 \text{ E } -7$. Le système stabilise pendant la phase asymptomatique.

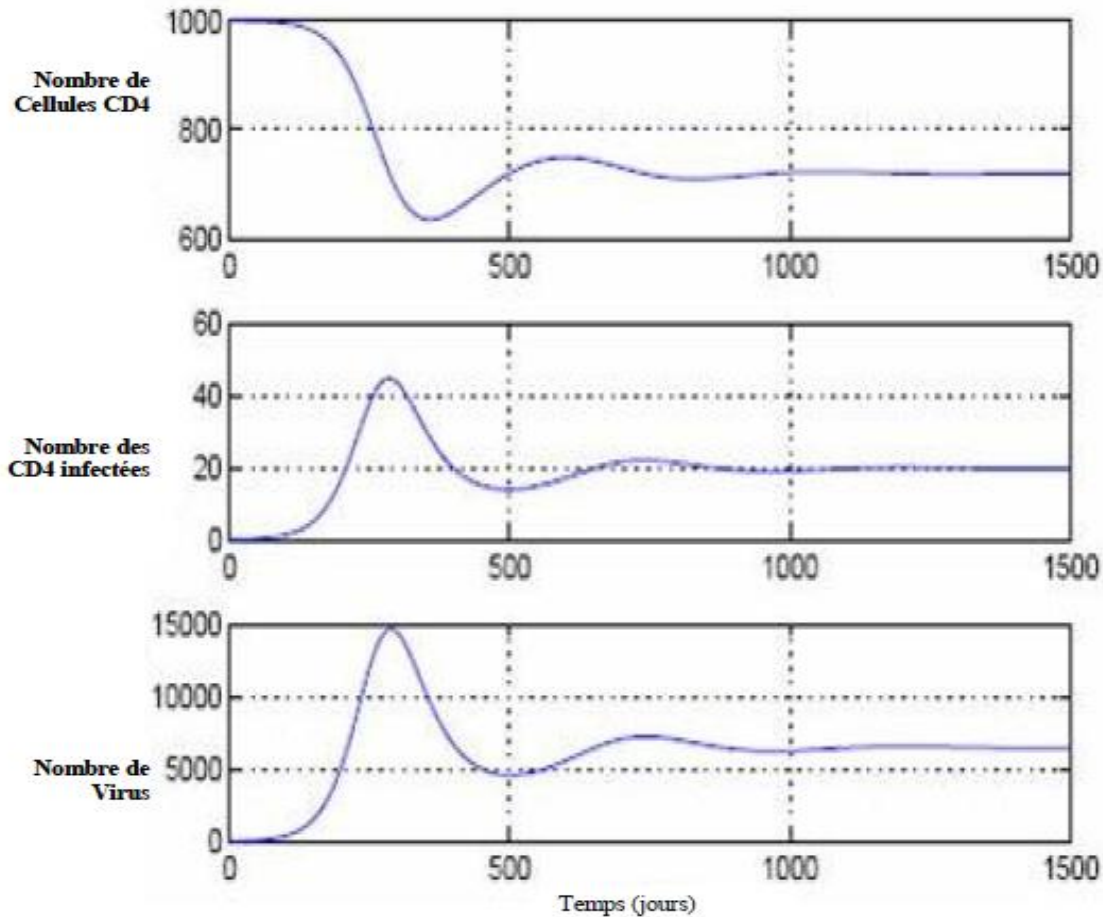


Figure 13 : Résultats de l'approche mathématique pour le modèle 3D [1chapitre 1].

III. Modèle Multi-Agents

Dans un environnement virtuel équivalent à 1 mm^3 de sang, la simulation multi-agent du phénomène d'infection est effectuée. Étant donné que un mm^3 contient entre 500 et 1500 cellules tandis qu'un litre de sang contient environ 2 milliards de cellules CD4, cette décision a été prise pour limiter le nombre d'agents de simulation. En outre, toutes les mesures et les valeurs paramétriques sont données par rapport à un seul mm^3 de sang.

L'environnement virtuel défini à 3 dimensions de taille $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ qui est égale à $1000\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$.

Trois types différents de cellules CD4 simulant l'agent, les cellulesCD4 qui sont infectées et le virus VIH se développent dans cet environnement.

Ces derniers descendent de la même classe d'Agent cellule, qui décrit le comportement général d'une cellule. Cette classe est distinguée par un ensemble d'attributs (âge, position, durée de vie maximale) et un ensemble de méthodes (création, mouvement, and disappearance).

Un autre agent unique qui apparaît dans la simulation est un agent à base d'organes qui simule le thymus, l'organe responsable de la production de cellules d'agent CD4 dans l'environnement, avec des taux de production qui correspondent au paramètre S dans le modèle 3D.

Chaque cellule agent CD4 produite par le thymus se déplace de manière aléatoire et indiscriminée dans toutes les directions grâce à la méthode déplacer () héritée de la classe parent Agent cellule.

Dans l'environnement, les agents du VIH se développent de manière similaire. Chaque cycle de simulation, chaque agent VIH détermine la distance qui les sépare des autres agents CD4 en utilisant la formule suivante: Chercher proche (CD4 []) pour déterminer la plus proche cellule.

L'infection dépend de la distance (fig.14-a). Un nouvel agent CD4 infectée sera lancé après infection avec la disparition des deux agents intervenant dans l'opération.

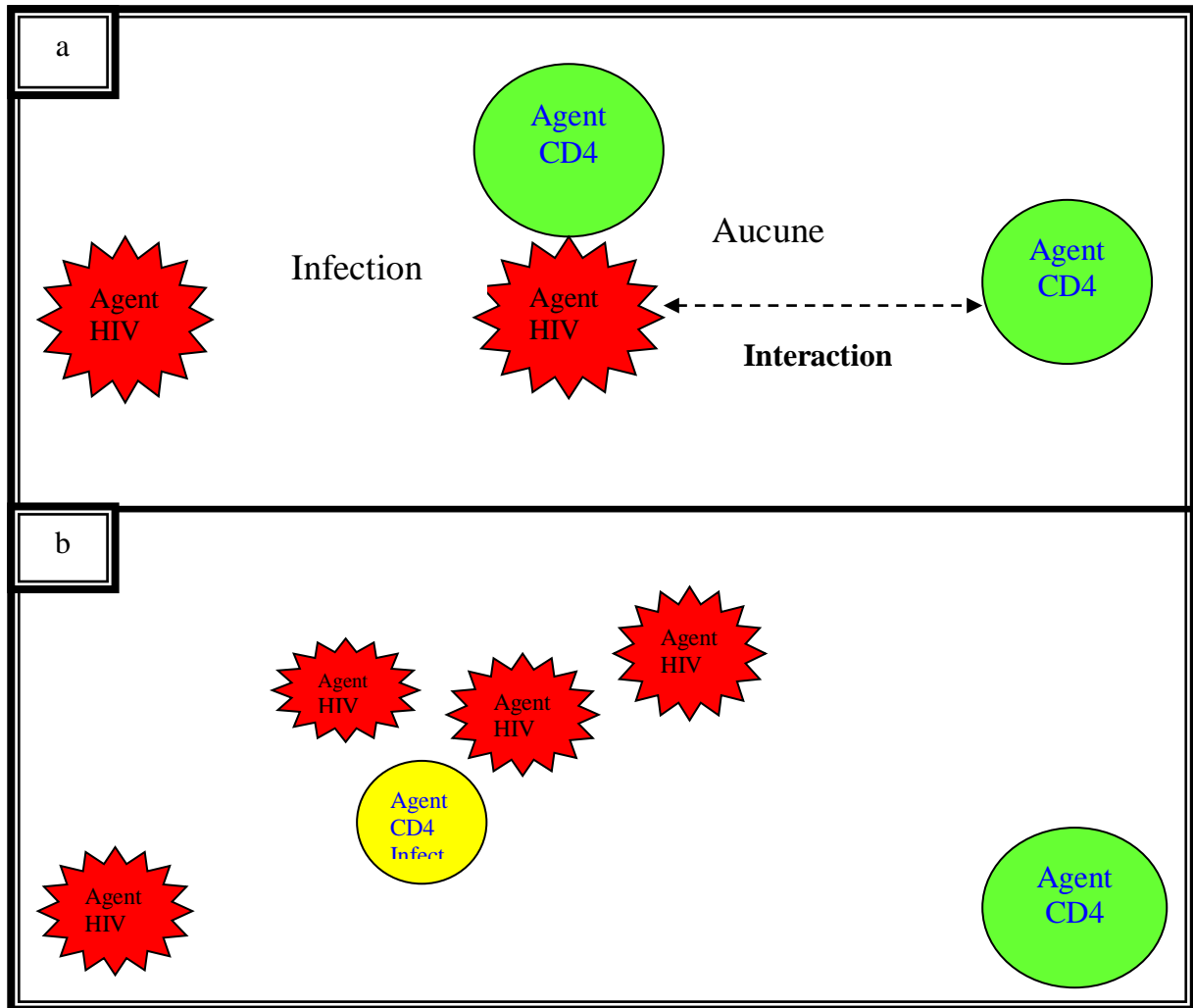


Figure 14 : Processus de l'infection

La possibilité qu'une rencontre soit contagieuse a été introduite, ce qui correspond au paramètre du modèle mathématique. La valeur de ce paramètre ((l'infectivité du virus) varie de 0 à 1. D'autres facteurs, tels que la taille du virus et le nombre de CD4, ont été pris en compte.

Un nouvel agent appelé un observateur a été introduit, dont la tâche est de recueillir toutes les données sur les états des différents agents dont la simulation a besoin et de décrire graphiquement comment les différents paramètres de simulation ont changé. Il convient de noter que la durée de vie moyenne d'une population d'agent peut varier d'un agent à l'autre ainsi que dans une seule population.

Pendant leur durée de vie, les agents CD4 infectés lancent des agents virus (fig.14-b) qui chercheront à leurs tours à infecter d'autres agents CD4. Ainsi le modèle produit est plus proche de la réalité que le modèle mathématique qui ne décrit pas fidèlement le phénomène.

Contrairement à l'approche Multi-agents, qui traite le phénomène au niveau individuel et traite chaque rencontre entre le CD4 et le virus indépendamment des autres, celle-ci aborde en fait le phénomène à un niveau élevé (manipulation de la population), permettant une représentation plus précise de la réalité.

Si on prend un exemple réel de 100 CD4 et 10 virus, le modèle mathématique produit donc $(100 \cdot 10) / 2 = 500$ CD4 infectées si $\beta = 0,5$, ce qui n'est pas vrai dans la réalité car rien ne prouve que la moitié des rencontres sera infectieuse. Ainsi, si $\beta = 1$ le nombre des CD4 infectées produites est différent de $T \cdot V$ cellules.

Les agents du système ainsi que les interactions entre eux sont décrits dans le graphe suivant :

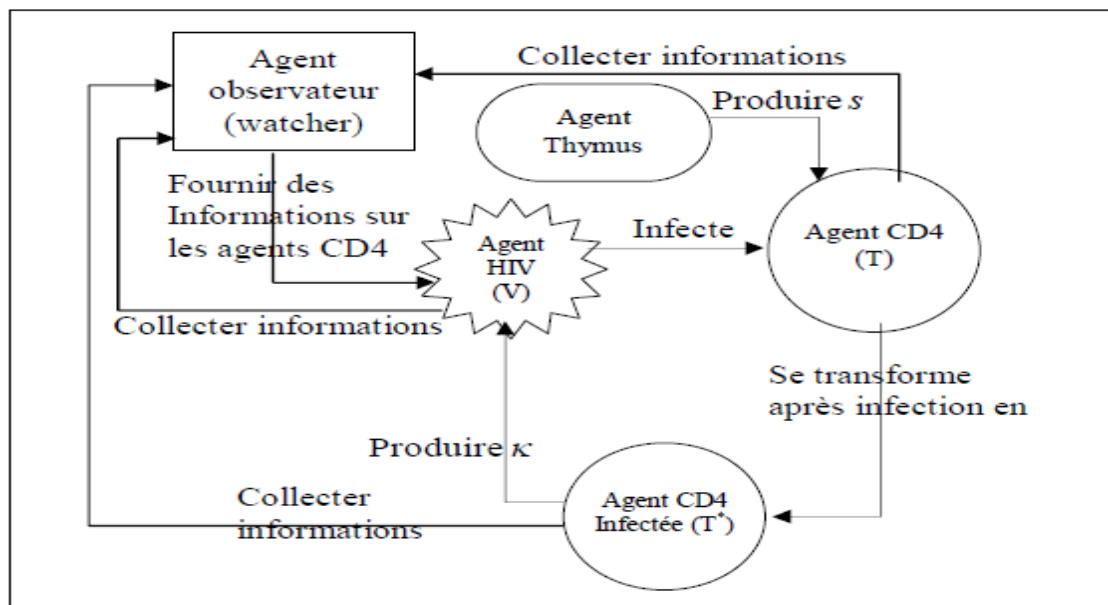


Figure 15 : Interactions entre les Agents cellulaires

IV. Implémentation

L'étape implémentation a été établie dans le langage de programmation java et sous la plate-forme Mad-Kit, dont la dynamique opérationnelle simule le phénomène biologique sous-étudié.

1. La plate forme Mad-Kit

La plate forme Mad-Kit (acronyme de Multi-Agents Développement Kit) a été conçue en 1996 par Jacques Ferber, Olivier Gutknecht et Fabien Michel au laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM).

C'est un ensemble de packages écrits en Java, qui implémentent le micro noyau agent. La plate forme Mad-Kit est développée pour exploiter les avantages de la programmation Multi-Agents. Elle forme une plate forme générique de conception et d'exécution des systèmes Multi-Agents qui se basent sur le modèle organisationnel Aalaadin (fig.16) fondé sur les concepts Agent-groupe-rôle.

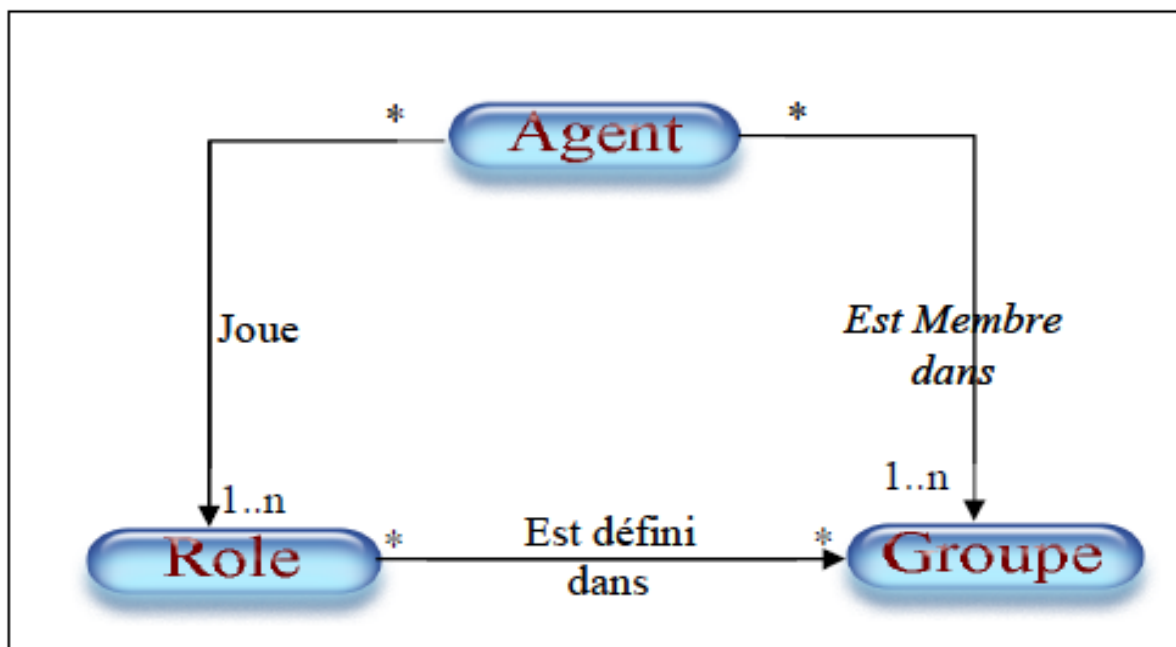


Figure 16: Concepts (Agent/Groupe/Rôle) du modèle Aalaadin

Selon le modèle d'organisation d'Aalaadin, les agents du système sont regroupés à l'intérieur de groupes. Selon l'application, un système Multi-Agents peut consister en différents groupes, chaque agent ayant la capacité d'appartenir à plus d'un groupe et d'assumer différents rôles.

Une représentation abstraite d'une fonction, d'un service ou de l'identification d'un agent à l'intérieur du groupe est connue sous le nom de rôle. Dans différents groupes, un agent peut jouer plusieurs rôles, et plusieurs agents peuvent remplir un seul rôle.

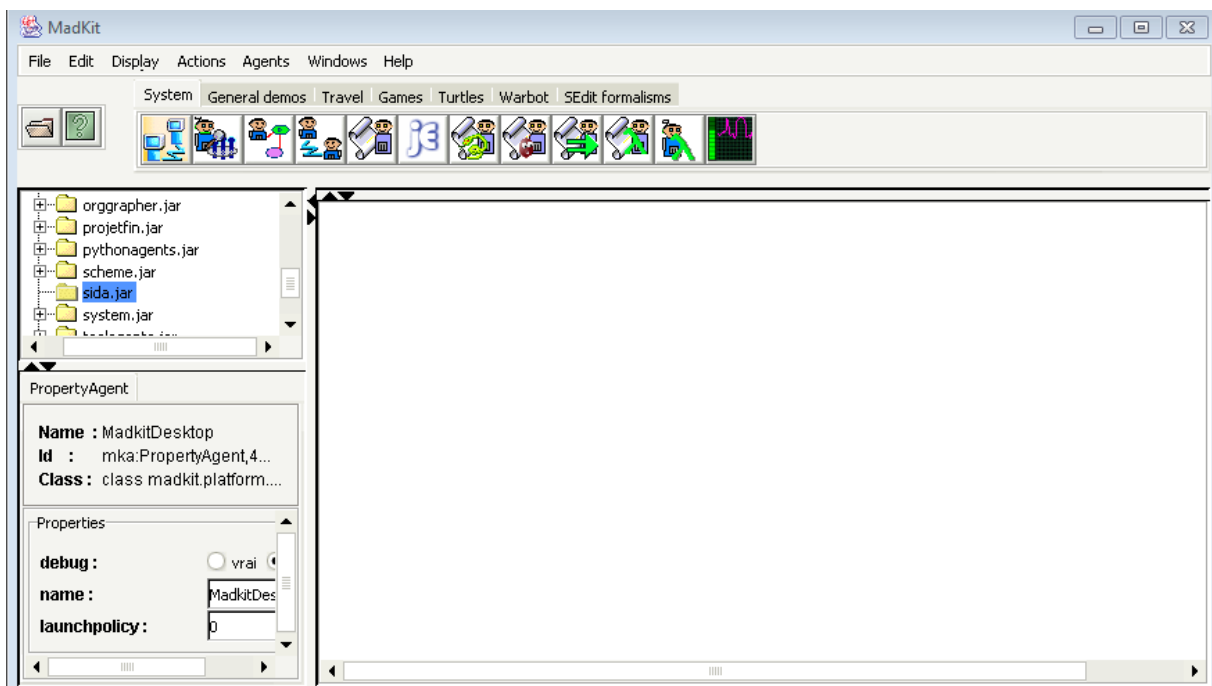


Figure 17: Le DeskTop de MADKIT

Le micro noyau Mad-Kit est un environnement pour les petits agents (moins de 50 Ko) à exécuter, et il fournit les fonctionnalités suivantes:

❖ Gestion de cycle de vie des agents :

Le micro noyau gère le démarrage et l'arrêt des agents et suit toutes les tables de référence des agents lancés. Il donne à chaque agent une adresse globale composée de l'adresse dunoyau et de l'adresse du agent dans le local. (l' AgentAddress).

❖ Passage des messages :

Le micro noyau de MadKit est responsable de la surveillance et de la distribution des messages entre les agents locaux (assumé pour être exécuté sur un nuyau), et est responsable d'assurer la communication des agents les uns avec les autres. Un message est envoyé en plaçant une copie de celui-ci dans le tampon de l'agent de réception.

❖ Gestion des groupes et rôles locaux :

Le micro noyau fournit les opérations de base de Mad-Kit au plus bas niveau, telles que la gestion de la structure organisationnelle (Agent/Groupe/Rôle), qui permet à tout agent d'utiliser des groupes et des rôles et de maintenir des informations de base précis sur les agents de chaque groupe et leurs rôles à jouer.

La méthode `createGroup(...)` est utilisée pour créer des groupes. Dans notre système, un seul groupe la simulation de groupe est employé :

```
- reateGroup(true,"simulation",null,null);
```

Chacun des agents définis joue un rôle au sein de ce groupe. Pour obtenir un rôle, utilisez la méthode `requestRole(String Nom_du_groupe, String Nom_du_role)`. Ceci permet à l'agent de jouer le rôle "Nom_du_role" au sein du groupe «Nom_du_groupe».

Si nous voulons qu'un agent joue un rôle dans un groupe qui a déjà été créé, nous utilisons la commande `foundGroup(String Nom_du_Group)` ou `joinGroup((String nom_de_Groupe)` avec le rôle étant déterminé par la méthode `requestRole(string Nom-du-Group, String nom-du_role)`:

Exemple :

```
Public class Vih extends Agentcellule

{Public void activate ()

{      JoinGroup ("simulation");

RequestRole ("simulation","virus");

}.....// le reste du code de l'agent.

}
```

Pour programmer des agents sous Madkit, des groupes et des rôles doivent être utilisés, et leur utilité varie en fonction de l'application. Ces deux idées sont employées à des fins d'identification des agents, c'est-à-dire que chaque agent est situé dans notre système en fonction de son groupe et du rôle qu'il y joue, ce qui est utile pour assurer le bon fonctionnement de la planification [§ V.7].

2. Les agents sous MadKit

La classe AbstractAgent est un composant clé de la programmation Mad-Kit ; elle spécifie les méthodes de base d'un agent (telles que la découverte de son adresse, l'interrogation de ses messages, etc.), mais pas son comportement, qui doit être déterminé par le développeur en fonction de leurs exigences.

La classe Agent hérite de cette classe et met en œuvre l'interface Runnable en ajoutant la méthode void live(), qui permet l'exécution d'agent filé. Ainsi, la structure de base d'un agent est divisée en trois sections principales:

- La section d'activation est représentée par la méthode void activate(), qui contient le code à exécuter pendant l'enregistrement de l'agent par le micronoyau. C'est à ce niveau que le groupe et les rôles de l'agent sont déterminés.
- Section finale: Il est représenté par la méthode end(), et il contient le code que le micronoyau exécutera lorsque l'agent a terminé de recevoir le traitement ou est tué.

- L'agent a un travail à accomplir et une mission à compléter au sein du système entre les deux parties précédentes. Le comportement approprié pour un agent doit être défini dans la méthode `live()` qui est prédéfinie dans la classe `Agent` et est exécutée immédiatement après la section d'activation.

Typiquement, les lignes qui suivent peuvent être utilisées pour décrire le cycle de vie d'un agent Madkit:

```
Public class Agentcellule extends Agent
```

```
{
```

```
Public void active ()
```

```
{.....}
```

```
Public void live ()
```

```
{
```

```
Do {
```

```
//.....comportement de l'agent
```

```
} While (condition)
```

```
}
```

```
Public void end ()
```

```
{
```

```
.....
```

```
}
```

nous prévoyons de construire. L'utilisation d'agents filés (sous-classe d'agent) n'est pas recommandée en raison des coûts encourus en termes d'utilisation de la mémoire, de temps de traitement, etc. Les agents utilisés sont appelés agents shédulés, et la classe cellulaire des agents est déclarée comme suit:

```
Public class Agentcellule extends AbstractAgent implements
```

```
ReferenceableAgent
```

```
{
```

```
.....
```

```
}
```

3. Le Scheduling

L'accès à des objets environnementaux dans un système Multi-Agents peut être en conflit entre les agents, conduisant à des conflits sur l'accès aux ressources, entre autres choses. Les agents qui descendent de la classe Scheduler dans Madkit sont responsables de la planification.

Un agent scheduler a pour but de coordonner l'exécution des agents via des objets outils génériques appelés Activateurs, ces derniers représentent le moyen pour le Scheduler d'identifier un ensemble d'agents.

Un Activateur est une entité qui est initialisée en fonction d'un groupe x et d'un rôle y. Son code comprend un appel aux méthodes des agents jouant le rôle y dans le groupe x, les méthodes qui seront exécutées lors de son activation par l'agent scheduler. Les méthodes invoquées par les activateurs sont celles des agents qui héritent de la classe AbstractAgent et implémentent l'interface ReferenceableAgent.

Pour chacun des agents un activateur doit être créé qui se charge de son exécution. L'ensemble des activateurs est géré par un agent Scheduler. 5 activateurs seront donc créés (figure 18).

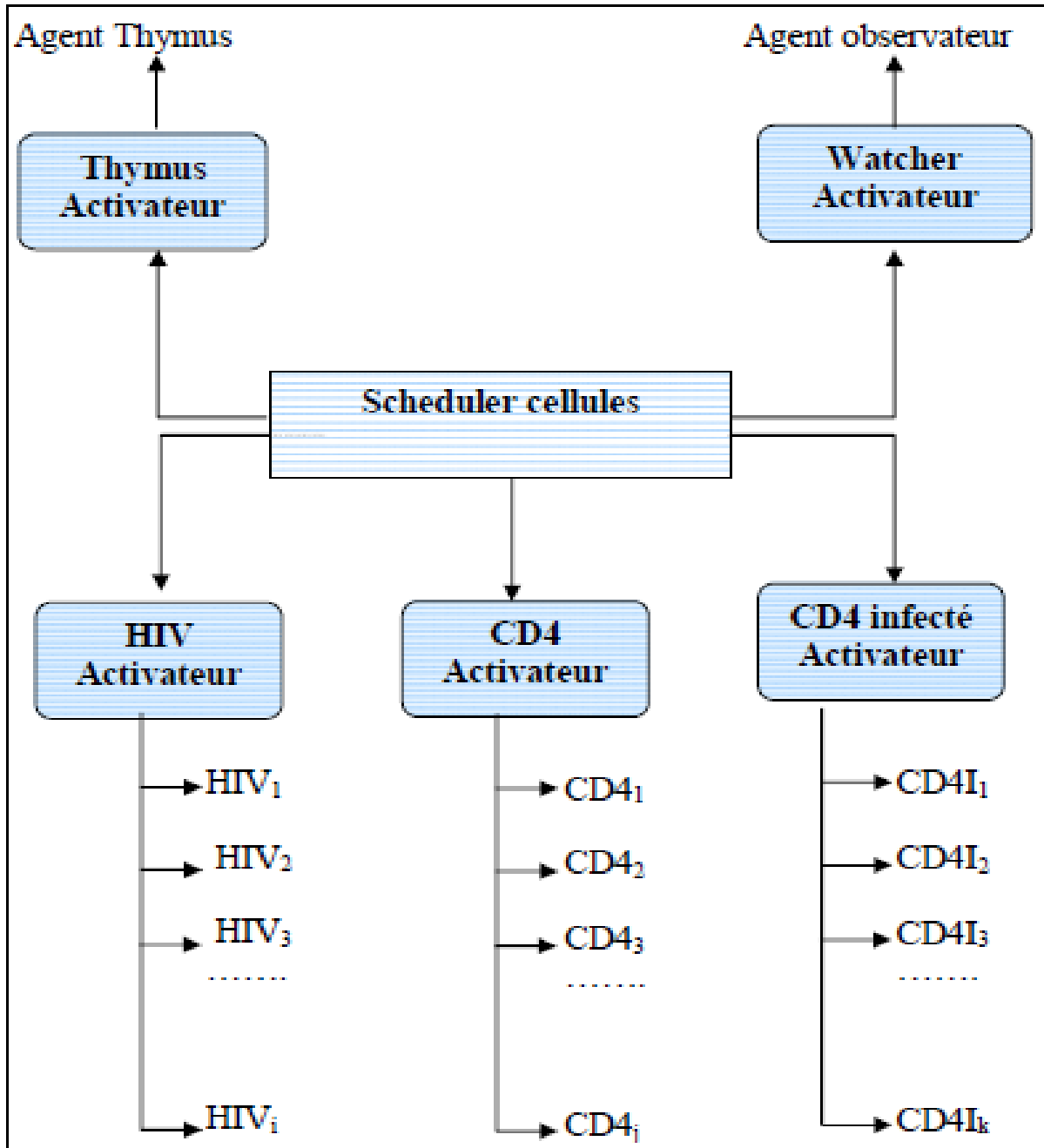


Figure 18 : Scheduling des agents du simulateur

4. Structure algorithmique des agents

Parce qu'ils proviennent de la même classe d'agent cellulaire, les trois agents cellulaires ont presque la même forme.

La première méthode est la méthode activée () qui établit le groupe et le rôle de l'agent. Le comportement de chaque agent est spécifié dans la méthode vivre (), qui inclut un appel à la méthode déplacer () pour le mouvement dans l'environnement.

L'agent infecté CD4 a une méthode appelée 'produce_VIH ()' qui lui permet de libérer des agents VIH dans l'environnement à un taux spécifié par l'instruction: launch Agent () de la classe Abstract Agent.

L'agent VIH se déplace autour de l'environnement et cherche l'agent CD4 le plus proche en utilisant la méthode chercher ([] CD4) avant d'infecter cet agent CD4 en l'utilisant(CD4). Cette dernière étape est de lancer un nouvel agent infecté par le CD4 et d'utiliser la méthode kill Agent () pour éliminer les agents du VIH et du CD4 responsables du lancement de l'infection.

L'observateur hérité de la classe prédéfinie. Il utilise des classes spécialisées appelées «probe» qui sont conçues pour suivre les agents jouant le rôle de X dans le groupe Y pour recueillir des données sur les différentes cellules d'agents.

La sonde correspondante pour chaque type d'agent au niveau cellulaire reçoit comme paramètre le groupe et la fonction de ce type :

```
Public class Vihwatcher extends Watcher implements ReferenceableAgent  
{  
CelluleVihprobVihprob;  
Public void activate ()  
{  
Vihprob=new celluleVihprob ( "simulation", "virus VIH");  
AddProbe (Vihprob);  
}  
}
```

5. Interface du Simulateur

Le simulateur a l'interface montrée dans la figure 19 Ce dernier représente l'environnement virtuel dans lequel les différents agents se développent. Visuellement, les lymphocytes CD4 sont représentés comme des boules vertes, le VIH est représenté par les boules noires, et les cellules CD4 qui ont été infectées par le virus sont représentées comme des balles jaunes, brunes ou rouges en fonction de l'âge de cellules infectées:

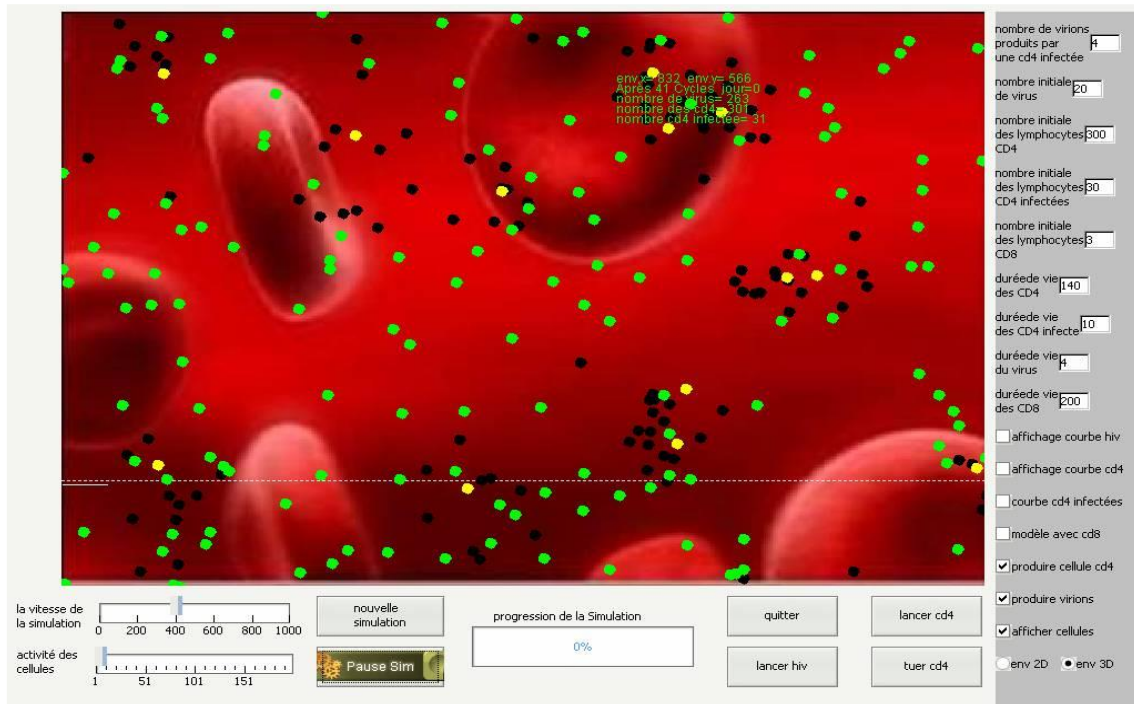
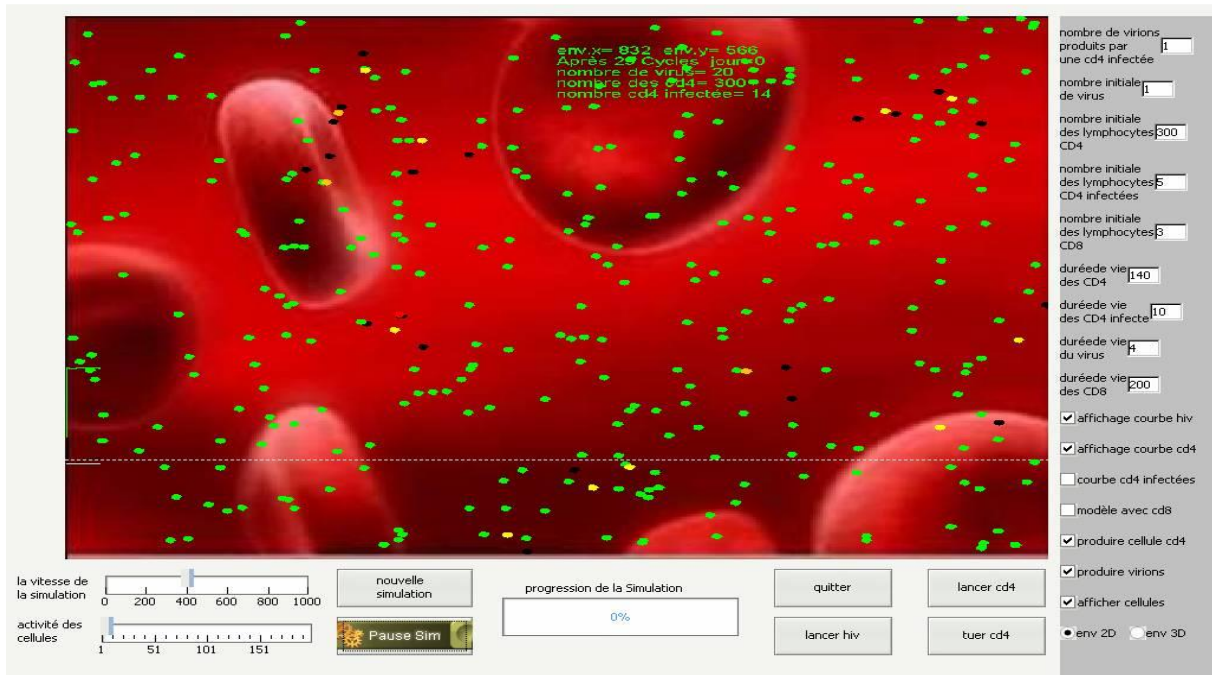
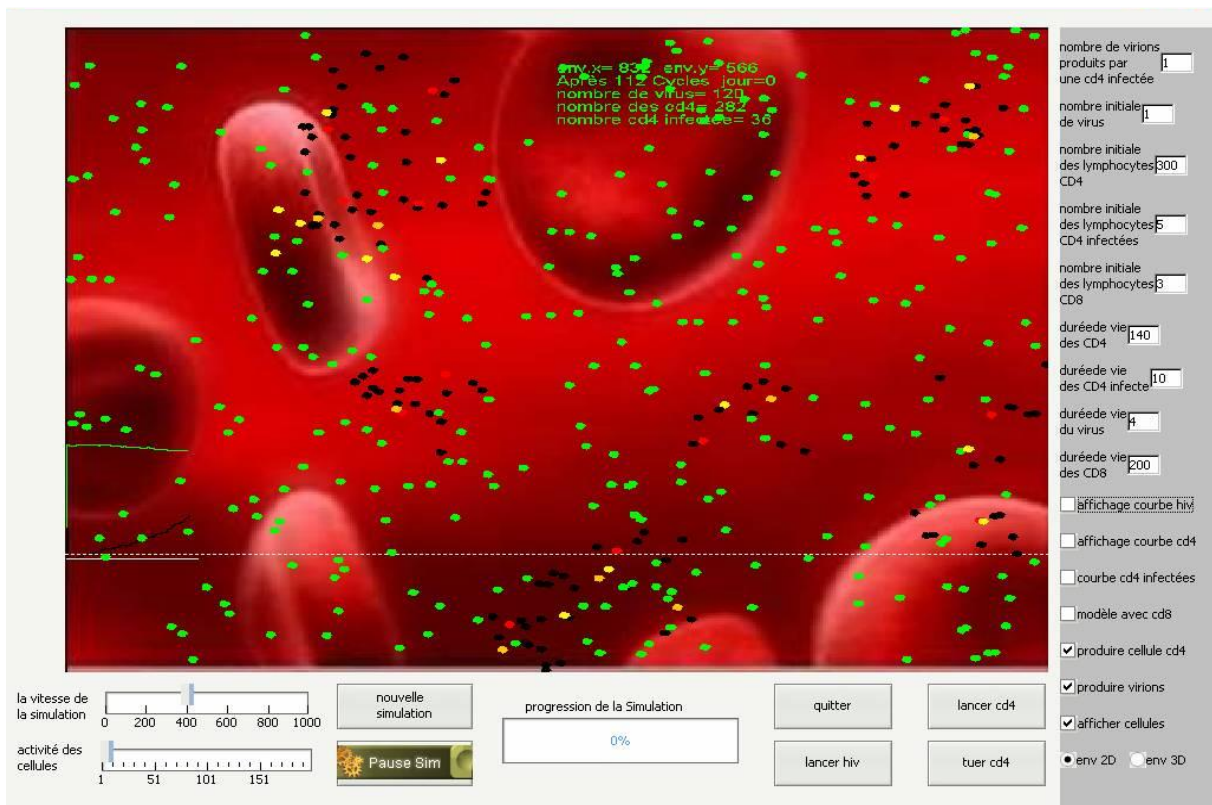


Figure 19: Interface du simulateur

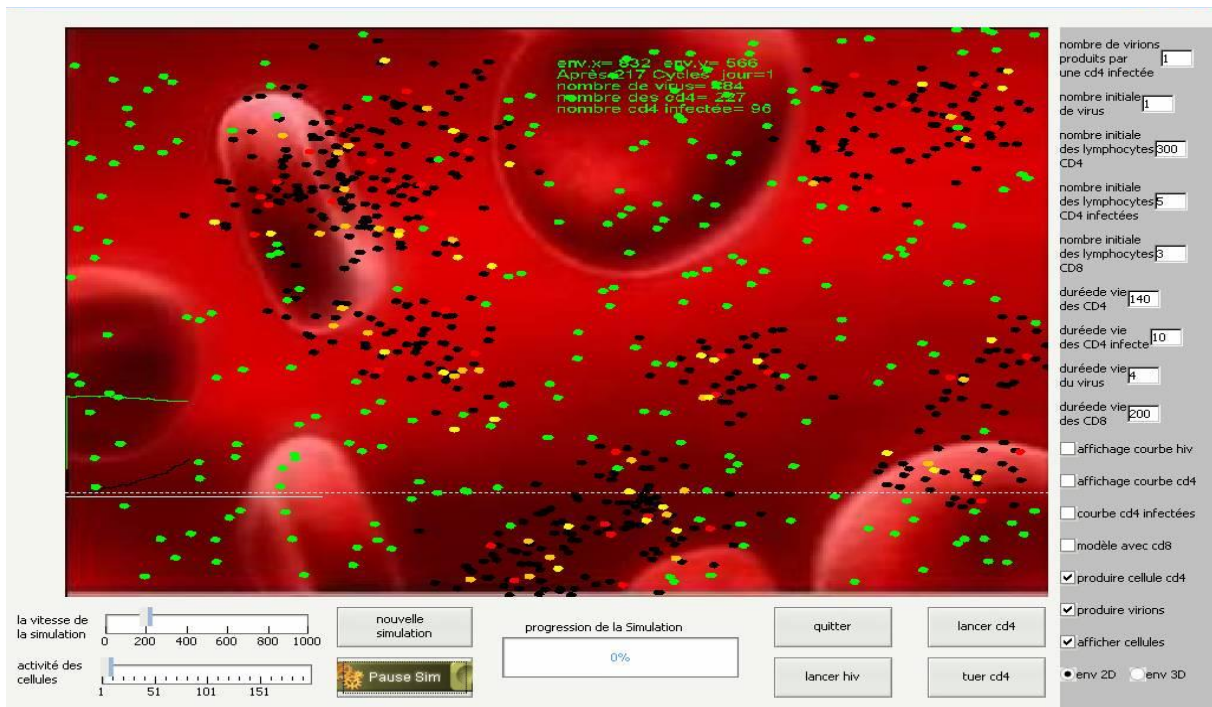
La figure 20 montre les captures d'écran qui illustrent la progression de l'infection par le VIH dans la population de cellules CD4:



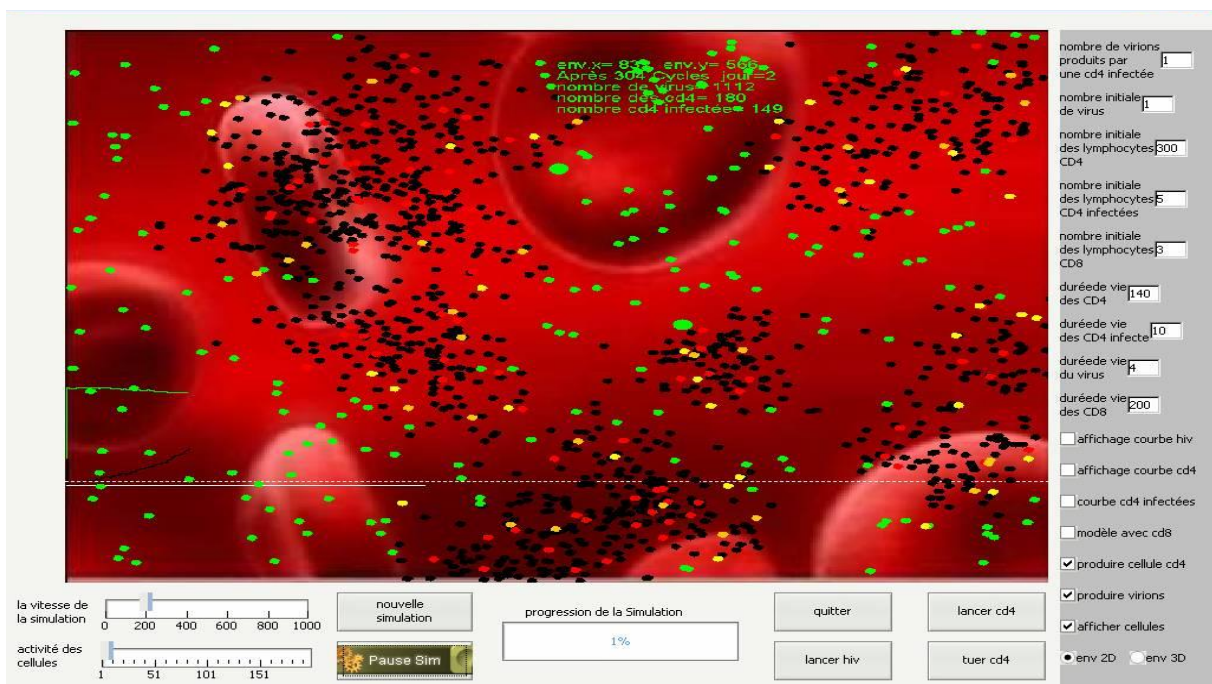
-a- Après 20 cycles de simulation.



-b- Après 110 cycles de simulation.



-c- Après 215 cycles de simulation.



-d- Après 300 cycles de simulation

Figure 20 : Exemple d'évolution de l'infection

6. Résultats :

6.1. Evolution des CD4 sans infection :

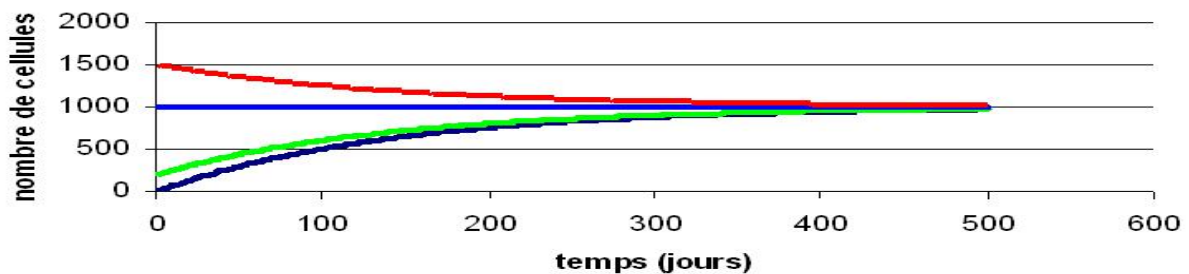
La quantité de ces lymphocytes est constante autour d'une valeur particulière en l'absence de virus. Cette valeur varie d'une personne à l'autre car elle dépend du taux auquel ces cellules sont produites par le thymus ainsi que de la durée de vie cohérente présumée des cellules.

Considérez un environnement qui a 1 mm³ de sang. Chaque jour, le thymus produit 7 cellules CD4, chacune ayant une durée de vie de 143 jours. Les deux modèles (fig. 21) montrent que la population convergera vers 1000 cellules CD4 et restera stable autour de cette valeur à partir de plusieurs états alpha-alpha initiaux, y compris 0 cellules, 200 cellules et 1500 cellules.

Pour le modèle mathématique, nous utilisons la première équation du modèle tridimensionnel qui décrit l'évolution de CD4 : $T' = s - \delta T - \beta TV$

Avec $V=0$ (pas d'infection) , $s = 7$ (taux de production des CD4 par jour) et $\delta = 0.007$ (le taux de mortalité des CD4).

a- résultat du modèle mathématique



b- résultat du modèle Multi-agents

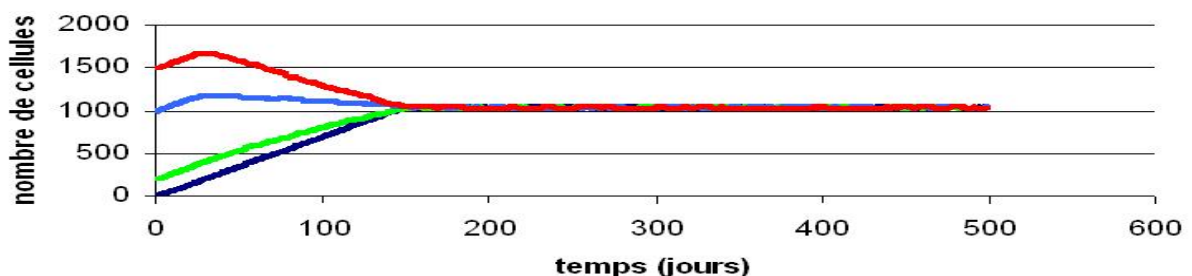
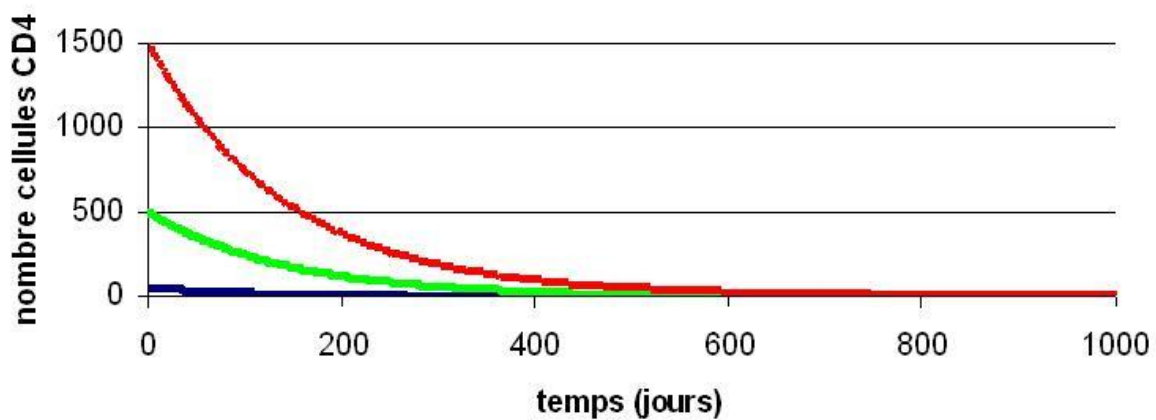


Figure 21 : Evolution des CD4 sans infection

Quel que soit son état initial, la population CD4 se stabilise toujours au même niveau. Ce résultat est obtenu en utilisant à la fois le modèle mathématique et le modèle Multi-Agents. Nous notons que le modèle Multi-Agents converge plus rapidement.

Une autre distinction entre les deux modèles peut être vue dans la façon dont une population de cellules isolantes CD4, dont le taux de production quotidien est zéro et dont le temps de survie est de 143 jours, est éliminée.

a- résultat du modèle mathématique



b- résultat du modèle Multi-agents

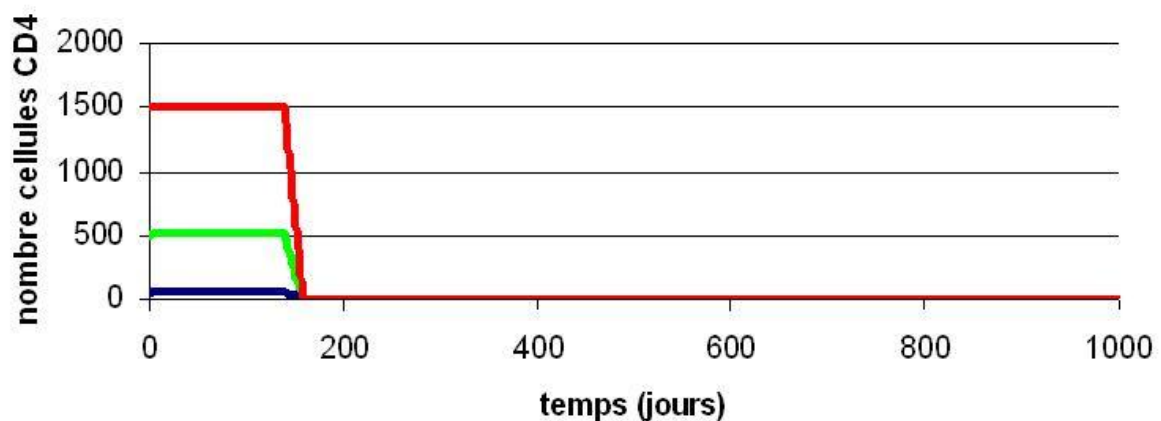


Figure 22 : Extinction des CD4

6.2. Modélisation de l'infection :

Nous avons créé une population initiale de cellules d'agent CD4 positif, CD4 infecté et VIH-positif.

La durée de vie moyenne biologique de la catégorie cellulaire et une valeur arbitraire qui varie d'un agent à l'autre sont utilisés pour déterminer les durées de vie maximales des différents agents cellulaires au moment du lancement pour chaque agent.

La durée de vie moyenne des agents est définie comme suit :

- ✓ Agents CD4 cellules: 140 jours. a un taux de production quotidien de 7 cellules CD4 du thymus.
- ✓ Agents cellules CD4 infectées: 10 jours.
- ✓ Trois jours pour les agents du VIH.

Chaque cellule CD4 infectée produit un agent du VIH. Les cycles de simulation ont été suivis pendant 10 minutes chacun. Un jour a 144 cycles de simulation (6 x 24 cycles = 144 cycle), donc tous les 15 cycles un agent infecté CD4 produit un seul agent VIH.

L'impact de l'infection virale a été étudié sur cette population initiale (fig. 23) Il s'agit de :

- ✓ Infectivité = 100 % : toutes les infections sont contagieuses.
- ✓ Infectivité = 30 % : Cela signifie que la probabilité qu'une rencontre puisse propager la maladie est égale à 30 %.
- ✓ La contagion du virus diminue avec l'âge, allant de 1 à 0.

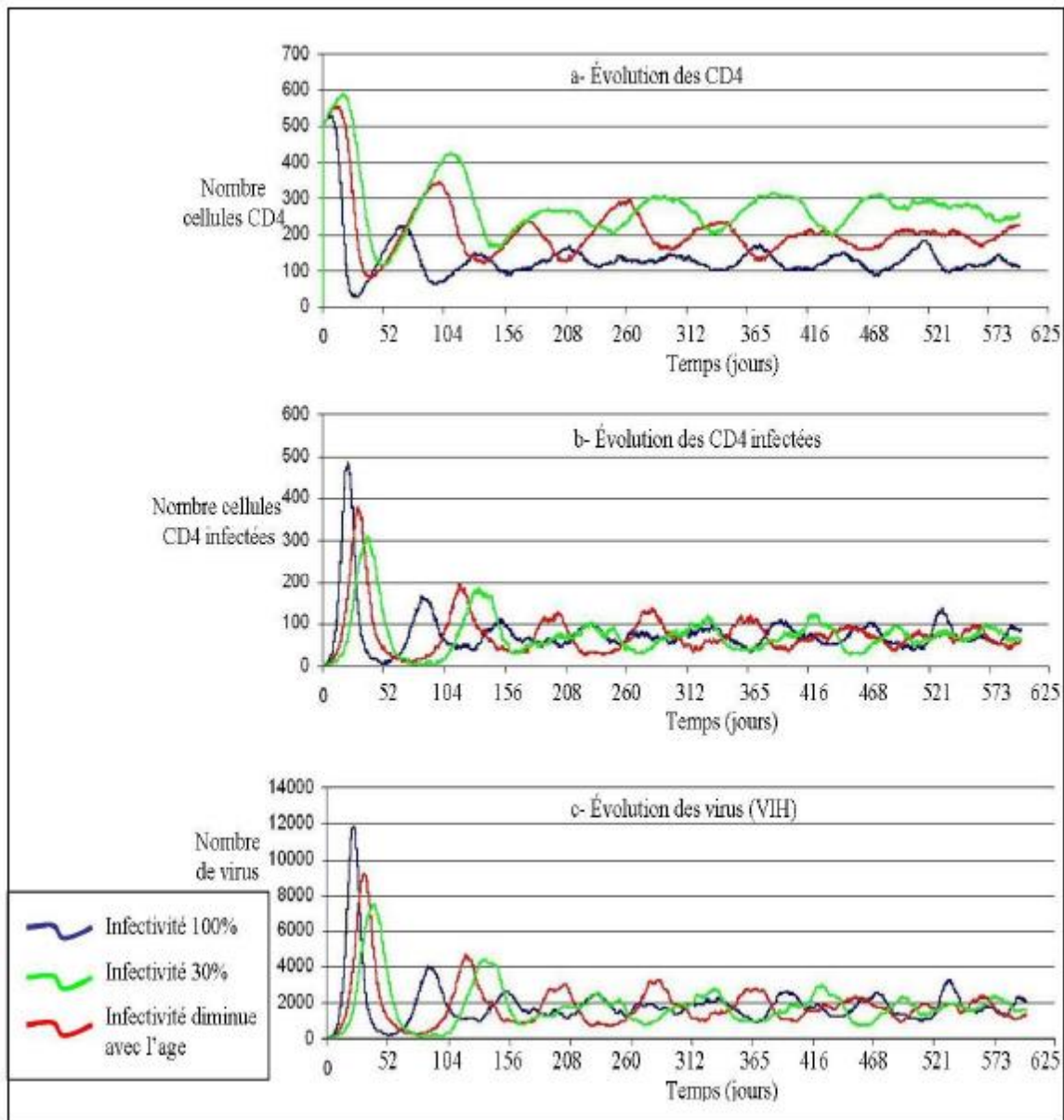


Figure 23 : Résultats de l'approche Multi-agents pour le modèle 3D

Nous constatons que les deux étapes sont clairement distinctes sur les différents résultats:

- La population virale qui a infecté les cellules CD4 augmente pendant la phase initiale de l'infection.

Cette croissance se poursuit jusqu'à un point où la faible affinité du virus pour la population CD4 en fait une ressource rare, réduisant ainsi la probabilité d'infection. À ce stade, nous constatons une diminution de la charge virale et du nombre de cellules CD4 infectées.

- Le deuxième stade de l'infection est le stade asymptomatique, au cours duquel un état d'équilibre entre les taux cellulaires des différentes cellules est établi.

La contagion virale a un impact significatif sur la façon dont le phénomène de l'infection se développe. En effet, compte tenu de la quantité de virus produite, un taux d'infection de 100% entraîne une diminution nette et rapide du nombre de cellules CD4 par rapport à un taux d'infection inférieur à 100%.

Si le taux d'infection est faible, la maladie se développe lentement. Le niveau le plus bas de CD4 atteint sera plus élevée que celui atteint avec une infectivité plus élevée car la phase primaire de l'infection commence relativement tard et se caractérise par un faible maximum de charge virale.



Conclusion Générale



Conclusion générale

En conclusion, la modélisation et la simulation basées sur les systèmes Multi-Agents du virus biologique du VIH et du système immunitaire humain offrent une approche prometteuse pour mieux comprendre et rechercher cette maladie compliquée. Ces méthodes permettent de prendre en compte les interactions entre les différents agents impliqués, y compris les cellules du système immunitaire, les médicaments antirétroviraux et les Cellules infectées par le VIH.

Les comportements et les interactions des agents individuels, ainsi que la dynamique temporelle de l'évolution de l'infection par le VIH, peuvent tous être représentés de manière réaliste par la modélisation basée sur des systèmes Multi-Agents. Cela permet la simulation de diverses stratégies de traitement, l'évaluation de leur efficacité et l'exploration de nouvelles approches thérapeutiques.

Ces modèles peuvent également être utilisés pour étudier l'influence de nombreux facteurs, tels que les comportements à risque, la prévalence du virus dans une communauté donnée et l'efficacité des programmes de prévention, sur la transmission du VIH. Ils peuvent aider à déterminer les traitements les plus efficaces pour arrêter la propagation du VIH et faire le meilleur usage des ressources disponibles pour lutter contre cette maladie.

Mais il est crucial de se rappeler que les simulations et la modélisation basées sur des systèmes Multi-Agents sont des représentations fortes mais trop simplifiées de la réalité. Ils ont besoin d'informations précises et d'hypothèses claires pour fonctionner correctement. De plus, il est essentiel de valider ces modèles afin de garantir leur exactitude et leur utilité dans la prise de décision sur la santé publique.

En conclusion, de nouvelles voies pour la compréhension, la prévention et le traitement de cette maladie ont été ouvertes à travers la modélisation et la simulation basées sur le VIH Multi-Agents et le système immunitaire humain. Ces approches favorisent la recherche et la lutte contre le VIH en utilisant les connaissances existantes et en permettant l'expérimentation virtuelle.



Bibliographie



01: Références bibliographiques

- [1] A. S. Perelson., D. Kirschner, R. DeBoer. The dynamics of HIV infection of CD4+ tCells. *Mathematical Biosciences*, 114(1): March 1993.
- [2] A. S. Perelson, P. Essunger. Modelling HIV infection of CD4+ T cell subpopulations. *J. Theor. Biol.*, 170(4), October 1994.
- [3] AGIMONT, G. (1996). *Modélisation et Simulation des Organisations Multi-agents*,
- [4] A. S. Perelson, P. W. Nelson: *Mathematical analysis of HIV-1 dynamics in vivo*. *SIAM Review*, 41(1), 1999.
- [5] B. Chaib-draa, I. Jarras et B. Moulin, *Systèmes multiagents : Principes généraux et applications*,2001.[Enligne].Disponible:<http://www.sietmanagement.fr/wpcontent/uploads/2017/2/Chaib-draa2001.pdf>
- [6] Bouchagra T.1995. *SIDA réalité et espoir*. Edition Dahlab, Algérie, p. 33.
- [7] C. H. Moog, D. A. Ouattara, et al. *Mathematical modelling of HIV infection for anaid in the early diagnosis of therapeutical failures*. In XVI International AIDS Conference, Toronto, Canada, August 2006.
- [8] DROGOUL, ALEXIS. *De La Simulation Multi-Agents A La Résolution Collective de Problèmes*. .1993.
- [9] D. A. Ouattara. *Mathematical analysis of the HIV-1 infection: Parameter estimation, therapies effectiveness, and therapeutical failures*. In 27th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medecine and Biology Society, Shanghai, China, September 2005. Ref: 616.
- [10] Djomangan Adama Ouattara. *Modélisation de l'infection par le VIH, identification et aide au diagnostic* Thèse de doctorat 2006 Spécialité : Automatique et Informatique Appliquée – Université d'Université de Nantes, 2006. Français. <https://theses.hal.science/tel-00120086/document>
- [11] D. L. DeAngelis, J. N. Holland: *Emergence of ratio-dependent and predatordependent Functional responses for pollination mutualism and seed parasitism*. *Ecological modelling*, 2005.
- [12] GASSER, L. (1992). *An overview of DAI*. In *Distributed Artificial Intelligence: Theory and Praxis*, Boston. Kluwer Academic Publishers.

Bibliographie

- [13] G. M. P. O'Hare and N. R. Jennings. Foundations of Distributed Artificial Intelligence. Wiley-Interscience, 1996
- [15] Hugard L. 2008. Infectiologie, sida et soins infirmiers. Edition Wolters Kluwer, France, pp. 190-191.
- [27] I. Jarras, B. Chaib-Draa : Aperçu sur les systèmes Multi-Agents. Série scientifique du centre inter universitaire de recherche en analyse des organisations -CIRANO-2002.
- [28] I. Jarras, B. Chaib-Draa : Aperçu sur les systèmes Multi-Agents. Série scientifique du centre inter universitaire de recherche en analyse des organisations -CIRANO-2002.
- [29] J. Ferber : Les systèmes Multi-Agents Vers une intelligence collective. Inter Edition, 1995, Paris.
- [30] Jean-Pierre Briot et Yves Demazeau : "Introduction aux agents, Principes et architecture des systèmes Multi-Agents" ; collection IC2, Hermès, 2001.].
- [31] J.S. Hege, G. Cole: A mathematical model relating circulating antibodies and antibody forming cells, Journal of Immunology, V.97, 1966
- [32] Livre Ferber, 1999: Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence
- [33] Livre Jean-Louis Le Moigne, *La modélisation des systèmes complexes*, 1990
- [34] Leghmari K. 2008. La protéine Tat du VIH induit la production de L'IL-10 et du TNF- alpha dans le monocyte/macrophage humain: Etude des mécanismes d'activation de la voie NF-Kappa B. Thèse de doctorat en immunologie. Université de Toulouse, 183 p.
- [35] Livre La relation comme forme JL Boissier - 2004 - arpla.fr Page 1. Genève, 2008 Jean-Louis Boissier La relation comme forme L'interactivité en art Nouvelle
- [36] LABIDI & LEJOUAD: Labidi, S., Lejouad, W. (1993) De l'intelligence artificielle distribuée aux systèmes Multi-Agents' INRIA N° 2004.
- [37] Leita; Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey", Engineering Applications of Artificial Intelligence22, p979–991, (2008).
- [38] Livre Malone, 1987 : INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DISTRIBUEE ET SYSTEMES MULTI-AGENTS

Bibliographie

- [39] Livre Mathieu, et al., 2005 : Modélisation de l'adaptation organisationnelle dans les systèmes Multi-Agents
- [40] Livre Müller, 2000: Formal Specification and Prototyping of Multi-agent Systems
- [41] M. A. Jeffrey, X. Xia, I. K. Graig: When to initiate HIV therapy: A control theoretic approach. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 50(11) 2003.
- [42] M Bouzid, V Chevrier, S Vialle, F Charpillat - Ingénierie des SMA ..., 1999 - hal.inria.fr
- [43] Mémoire fin d'étude magister en informatique. Université de skikda Mr. BENOUDINA
- [44] <<modélisation et simulation basées multi-agents du contrôle de processus industriels>>mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER EN INFORMATIQUE De L'Ecole Doctorale de l'informatique ENI Option Sciences et Technologie de l'Information et de la communication SKIKDA, BENOUDINA, 2009.
- [45] Mémoire doctorat en informatique. Université Marseille
- [46] *M.Dastani, A.ElFallahSghrouchni«Programming Multi Agents Systems», First International Workshop, ProMAS, 2003*
- [47] Morin 1977 : Edgar Morin, sociologue et théoricien de la complexité : des cultures nationales à la civilisation européenne Ali Aït Abdelmalek Dans Sociétés 2004/4 (no 86), pages 99 à 117
- [48] MYLO POULOS, 2001: Mylopoulos, J., Manuel, K., and Castro, J. (2001), Uml for agent-oriented software development: The tropos proposal. In Gogolla, M. and Kohryn, C., editors, conference of the 4th International Conference on the Unified Modeling Language, Modeling Languages, Concepts, and Tools, volume LNCS n°2185, pages 422-441. Springer
- [49] P. Ballet : Intérêts Mutuels des Systèmes Multi-Agents et de l'Immunologie Applications à l'immunologie, l'hématologie et au traitement d'images. Thèse de doctorat en Informatique université de Bretagne occidentale 2000.
- [50] P. Blangi : Etat de l'art sur les plates formes et les langages Multi-Agents Appliqués aux écosystèmes. Master de recherche: modélisation et simulation des systèmes complexes (2004/2005).

Bibliographie

- [51] PASCAL CANTOT, 2009: simulation et modélisation des systèmes industriels
- [52] Rao, A. and Georgeff, M. (1995). Bdi agents: from theory to practice. In conference of 1st International Conference on Multi-Agent Systems ICMAS, pages 312–319. AAAI Press.
- [53] ROQUES & VALEE: Roques, P. and Vallée, F. (2003), UML en action. Eyrolles
- [54] Treuil, Jean-Pierre and Drogul, Alexis. Modélisation et simulation à base d'agents. 2008.
- [55] Veron M. et Pebret F.1996. Pathologie infectieuse et démarche de soins VIH-SIDA. Edition Heure de France, p. 67.
- [56] Volberding P.A., Greene W.C., Lange J.M., Gallant J.E., Sewankambo N. 2012. Sande's HIV/AIDS medicine: Medical management of AIDS 2013. Edition Elsevier, Chine, p. 6.
- [57] WEISS, 1999 G. (1999). Multi-agent systems and distributed artificial intelligence. In Weiss, G., editor, Multi-agent systems: A modern approach to Distributed Artificial Intelligence. MIT Press.
- [58] X. Wei et al. Viral dynamics in human immunodeficiency virus type 1 infection. January 1995.
- [59] Yamina.BARKAT, Nouzha.ELBAH : Etude séro-épidémiologique de l'infection par le VIH/SIDA au niveau de sud Algérien cas de la wilaya de Biskra du center inter Université Mohamed Khider de Biskra, 2019

02: Références web

- [14] <https://aids.ch/fr/vivre-avec-vih/aspects-medicaux/evolution-de-linfection/>
- [16] <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/microbiologie/virologie/le-virus-du-sida>
- [17] <https://www.greenfacts.org/fr/glossaire/tuv/vih-sida.htm>
- [18] https://fr.wikipedia.org/wiki/Virus_de_l%27immunod%C3%A9ficiency_humaine#/media/Fichier:HI-Virion-fr.svg
- [19] https://www.who.int/fr/health-topics/hiv-aids#tab=tab_2
- [20] <https://www.sida-info-service.org/generalites-sur-la-transmission-du/>
- [21] https://www.who.int/fr/health-topics/hiv-aids#tab=tab_3
- [22] <https://www.sida-info-service.org/le-vih-et-le-systeme-immunitaire/>

Bibliographie

[23] <https://www.journaldunet.fr/web-tech/guide-de-l-intelligence-artificielle/1501293-agent-intelligent-definition-et-exemples/>

[24] https://www.researchgate.net/figure/A-comparison-between-a-cognitive-and-a-reactive-agent_tbl1_349934131

[25] <https://www.developpez.net/forums/d994228/general-developpement/algorithmes-mathematiques/intelligence-artificielle/agent-vs-objet/>

[26] http://www.researchgate.net/figure/Systeme-Multi-Agent-FER-95_fig47_315380814