

UNIVERSITÉ NATIONALE DU VIETNAM À HANOÏ
INSTITUT FRANCOPHONE INTERNATIONAL



Option : Systèmes Intelligents et Multimédia (SIM)

Promotion : XXI

Travail Personnel Encadré (TPE)

**Thème : Système à base d'agent pour les
systèmes biologiques complexes**

ABOUBACAR DJIBO Maman Sani

Encadrants :

Dr.(HDR) Tien Tuan Dao (Université de Compiègne France)

Dr. Ho Tuong Vinh (Institut Francophone International)

Année académique 2017-2018

Table des matières

1	Introduction Générale	5
2	Analyse du sujet	5
2.1	Synthèse du sujet	5
2.2	Définitions de quelques termes utilisées	6
2.3	Domaine d'étude	7
2.4	Pourquoi le besoin de réaliser une simulation ?	7
2.5	Problématique	8
2.6	L'objectif de notre sujet	8
2.7	Travail à réaliser	8
2.8	Résultats attendus	9
2.9	Les difficultés à prévoir	9
3	État de l'art	10
3.1	Les modèles déterministes et stochastiques	10
3.2	Les modèles connexes non liés à l'agent	10
3.3	Les Travaux connexes liés aux agent développés pour les systèmes biolo- giques complexes	10
4	Solution proposée	14
4.1	Description de la première architecture proposée	14
4.2	Description de la seconde architecture (environnement de simulation) pro- posée	16
5	Conception et modélisation de notre système	17
5.1	Description du système à développé	17
5.2	Les hypothèses	18
5.3	L'environnement de simulation	18
5.4	Les agents	18
6	Implémentation	22
6.1	Environnement matériel	22
6.2	Environnement logiciel	23
6.2.1	Langage de simulation	23
6.2.2	Les plate-formes et logiciels utilisés	23
6.3	Fonctionnement du modèle	24

7	Expérimentations	24
7.1	Les scénarios de test	24
7.2	Les paramètres d'entrées	25
7.3	Les conditions d'arrêt de la simulation	25
7.4	Les critères d'évaluation de notre travail	26
7.5	Les résultats obtenus	26
7.6	Analyse des résultats	27
8	Discussions	28
9	Conclusion	32
10	Perspectives	32
11	Références	33

Table des figures

1	Illustration du contrôle du système nerveux en interaction avec le corps humain [3]	6
2	comparaison des simulations M.Carlos et ABM [15]	11
3	Condition physiopathologique	14
4	Condition physiologique	14
5	Architecture du contrôle nerveux	15
6	Architecture réaliser sur la plate-forme QGIS	16
7	Diagramme d'activité de l'agent neuronM11	19
8	Diagramme d'activité de l'agent sensorNeuron	19
9	Diagramme d'activité de l'agent AntagonistNeuron	20
10	Diagramme d'activité de l'agent neuroTransmitter	21
11	Diagramme de classe de notre modèle	22
12	Tableau comparatif de la plateforme Netlogo et Gama [1]	23
13	Les paramètres globaux de la simulation	25
14	État initial du scénario 1	28
15	Signal généré avec une valeur de 72	29
16	Signal généré avec une valeur de 80	29
17	État initial du scénario 2	30
18	Répartition des agents après la simulation	30
19	Résultat du scénario 2 après la simulation	31

Liste des tableaux

1	Résumé des travaux connexes non liés aux agents	35
2	La description des attributs de l'agent neuronsMU11, neuronSensor et neuronAntagonist	36
3	Les états (activités) de l'agent neuronsMU11	36
4	La description des attributs de l'agent neuroTransmitter	37
5	Les états (activités) de l'agent neuronTransmitter	37
6	Les activités (comportement) de l'agent neurone moteur	38
7	Les paramètres d'entrée de la simulation	38

Remerciement

Je tiens à remercier très sincèrement Monsieur Tien Tuan Dao pour son encadrement, sa disponibilité et ses conseils très pertinentes.

Je voudrais également a remercier Monsieur Ho Tuong Vinh, également pour ses conseils et ses remarques très pertinentes.

Enfin, merci à tous ceux ou toutes celles qui m'ont assisté durant ce travail.

1 Introduction Générale

La compréhension du corps humain grâce aux méthodes et outils scientifiques est une tâche très difficile, et cette compréhension est très primordiale dans l'établissement d'un diagnostic médical idéal sur ce dernier.

Le système nerveux est un ensemble d'organes dont l'unité fondamentale est la cellule nerveuse ou neurone. Cette dernière a pour rôle fondamental la transmission d'un flux nerveux généré volontairement ou involontairement (à partir du cerveau ou d'un muscle) d'un neurone à un autre ou d'un neurone vers l'organe innervé (un muscle par exemple).

Il est très indispensable dans le fonctionnement de la motricité et du corps humain. Ainsi due à sa complexité les outils numériques de simulation et de modélisation tels que les systèmes à base d'agents qui ont gagné un grand regain d'intérêt dans la simulation des systèmes biologiques complexes en raison de leurs résultats assez réalistes peuvent être utilisés pour faciliter sa compréhension et ainsi faciliter un diagnostic médical aux médecins.

C'est dans l'optique d'apporter une solution au besoin ci-dessus que nous proposons dans le cadre de ce TPE une architecture du contrôle des muscles par le système nerveux que nous allons modéliser et simuler. L'objectif visé par cette étude qui est la première en son genre est de simuler le fonctionnement du contrôle nerveux avec plusieurs scénarios (avec un muscle normal et avec un muscle paralysé) afin de permettre aux médecins l'établissement d'un diagnostic médical précis et de faciliter la compréhension de ce processus de contrôle.

Ainsi outre l'analyse du sujet, l'étude de l'état de l'art, la solution proposée où nous allons expliquer en quoi consiste notre travail, nous exposerons dans ce rapport la conception et la modélisation de notre système. Nous y développerons en détail notre approche, l'implémentation de notre modèle, les critères de validation de nos résultats, ainsi que l'analyse des résultats issus de nos expérimentations. Nous finirons ce rapport par la conclusion et les perspectives.

2 Analyse du sujet

2.1 Synthèse du sujet

Notre sujet se focalise sur le fonctionnement du corps humain plus précisément le système nerveux (l'interaction entre le corps humain et les muscles). Ce dernier est constitué de deux parties suivantes :

1. Le système nerveux central (SNC) : est formé de l'encéphale enfermé dans le crâne et composé lui-même du cerveau du tronc cérébral et du cervelet et de son prolon-

gement dans la colonne vertébrale ; de la moelle épinière qui est le centre où arrivent les informations, où sont traitées les données et d'où partent les influx nerveux de commande. C'est donc la partie qui perçoit et décide.

2. Le système nerveux périphérique (SNP) : est fait des nerfs qui partent du SNC, se ramifient et le relient aux organes sensoriels, aux muscles et aux glandes. On distingue :

- les nerfs crâniens qui sont reliés à l'encéphale ;
- les nerfs rachidiens qui sont reliés à la moelle épinière ;

C'est par le biais de ces deux composants que sont acheminés les messages nerveux du muscle vers la moelle épinière et le cerveau.

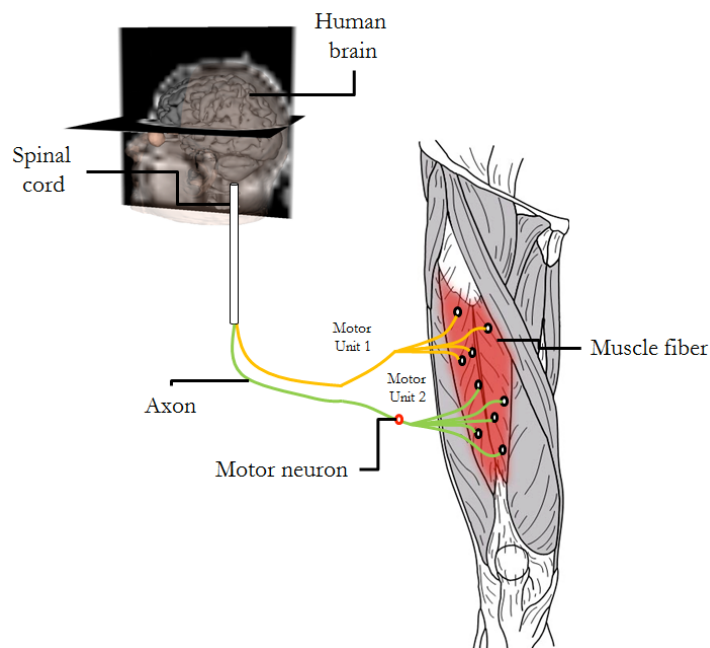


FIGURE 1 – *Illustration du contrôle du système nerveux en interaction avec le corps humain [3]*

2.2 Définitions de quelques termes utilisées

Définition de quelques termes utilisées dans ce travail.

- **Neurone** : c'est une cellule nerveuse dont le rôle fondamentale est la transmission de l'influx nerveux (message nerveux) d'un neurone à un autre ;
- **Cortex moteur** : c'est la partie du cerveau qui contrôle la motricité volontaire ;

- **Moelle épinière** : c'est une partie du système nerveux centrale sa fonction principale est la transmission des messages nerveux entre le cerveau et le reste du corps ;
- **Potentiel d'action (PA)** : c'est le signal nerveux (électrique) générée au niveau d'un récepteur sensoriel, au niveau d'une synapse ou au niveau du cortex moteur ;
- **Synapse** : c'est la zone de contact qui permet la transmission d'un signal électrique (PA) entre deux neurones.
- **Neurotransmetteur** : Substance chimique libérée par les neurones agissant sur d'autres neurones pour déclencher la génération d'un PA ;
- **Fibre musculaires** : c'est les cellules constituant le muscle.
- **Motoneurone** : c'est le neurone qui est chargé de réaliser l'intégration en faisant la sommation des messages provenant d'autres neurones qui font synapse avec lui.
- **La fente synaptique** : espace entre deux neurones qui constitue une aire de jonction par laquelle le message nerveux passe d'un neurone à l'autre, entraînant l'excitation ou l'inhibition de ce dernier.
- **Terminaison axonique** : c'est l'extrémité d'un axone. C'est à ce niveau que s'effectue le passage des influx vers un autre neurone au travers de la jonction synaptique.

2.3 Domaine d'étude

Notre sujet concerne la modélisation et la simulation informatique des phénomènes biologiques complexes. C'est un domaine d'étude qui fait appel outre à l'informatique à des connaissances très diverses en médecine plus précisément en anatomie (du corps humain). Du point de vue scientifique et clinique, il est très important de simuler le développement du fonctionnement du corps humain avec les outils informatiques afin de permettre aux docteurs et médecins d'établir un diagnostic précis sur le corps humain. Dans le contexte de ce TPE nous aurons à utiliser des notions en systèmes multiagents, en programmation orientée objet et en biologie plus précisément en anatomie du corps humain.

2.4 Pourquoi le besoin de réaliser une simulation ?

Comme nous l'avons précisé ci-haut notre sujet traite outre du concept informatique, de la biologie humaine plus précisément du fonctionnement du système nerveux. Ce dernier est très sophistiqué, très complexe, et il est indispensable au fonctionnement du corps humain, ce qui fait qu'il est nécessaire de prendre soin afin de n'est pas entraver son fonctionnement. Ainsi pour connaître les aspects qui peuvent impacter sur son fonctionnement

il est nécessaire de connaître bien son fonctionnement et de réaliser des expériences (simulation) sur son fonctionnement. Cela est possible en réduisant le nombre des neurones ou en sectionnant le lien entre le cerveau et la moelle épinière, etc. Nous constatons bien que c'est des expériences (simulations) qui peuvent porter atteinte à la vie humaine et qui sont difficiles à réaliser sur un corps humain dans la réalité. D'où la nécessité de réaliser une simulation avec l'outil informatique telle que la simulation à base d'agent avec laquelle nous pouvons réaliser toutes ces expériences sans porter atteinte à une vie humaine et à plusieurs reprises.

2.5 Problématique

Le système nerveux est un système très sophistiqué et très sensible. Mener des expériences cliniques sur ce dernier pour établir des diagnostics médicales est très risqué, car elles peuvent porter atteinte à la vie du patient. Ainsi les problématiques traitées dans ce travail sont :

- Comment peut-on réaliser une simulation du fonctionnement du corps humain sans porter atteinte à la vie humaine ?
- Comment est-il possible de réaliser plusieurs simulations sur un corps humain ?

2.6 L'objectif de notre sujet

L'objectif principal de ce TPE est de mettre en œuvre un système à base d'agent pour le contrôle du système nerveux en interaction avec le corps humain dans les conditions physiologiques (les conditions Normales) et physiopathologiques (muscles paralysés). C'est dire réaliser une simulation de comment le système nerveux contrôle la motricité (le mouvement des muscles).

2.7 Travail à réaliser

Le travail a réalisé durant notre projet est reparti sur deux volets : le volet théorique et le volet pratique.

Volet théorique : au cours de ce volet nous aurons à effectué les travaux suivant :

- Réalisation d'un état de l'art sur les systèmes à base d'agents développés pour les systèmes biologiques complexes ;
- Proposition d'une architecture du système à base d'agents pour le contrôle nerveux en interaction avec le corps humain via les muscles (ex : fig.1) ;

- Proposition d’une méthodologie pour simuler le système à base d’agents dans les conditions physiologiques (normales) ;
- Proposition d’une méthodologie pour simuler le système à base d’agents dans les conditions physiopathologiques (muscles paralysés).

Volet pratique : au cours de ce volet nous aurons à effectué les travaux suivant :

- Définition des agents et de leur comportement ;
- Création de l’environnement de simulation (architecture proposée) ;
- Définition des spécification du modèle (paramètres d’entrée et de sortie) ;
- Implementation et simulation du système modéliser ;
- Définition des conditions d’arrêt du système ;
- Définition des critères d’évaluation du modèle ;
- Analyse et interprétation des résultats ;
- Discussion et conclusion sur la satisfaction des résultats.

2.8 Résultats attendus

Il est attendus au terme de ce TPE la proposition d’une architecture d’interaction entre le centre nerveux (Système Nerveux) et le corps humain (muscles) dans les conditions physiologiques et physiopathologiques, la modélisation de cette architecture et son implémentation sur la plate-forme GAMA.

La sortie attendue de cette simulation est un signal (Potentiel d’Action) qui sera le résultat de l’intégration (sommation de tous les potentiels d’action arrivant au muscle) effectué au niveau de la moelle épinière. Ce signal va permettre la stimulation du muscle une fois qu’il aura atteint le seuil et provoqué le mouvement. Par contre il n’y aura aucune stimulation, donc aucun mouvement dans le cas ou le signal n’aura pas atteint le seuil.

Les informations issues des résultats de cette simulation devront être analysés pour faire ressortir les différentes architectures d’interactions et le degré d’importance des différentes cellules et organes intervenant dans cette interaction.

2.9 Les difficultés à prévoir

Comme tout travail scientifique notre travail sera aussi sujet à des difficultés de divers ordres et degrés. Parmi ceux-ci nous pouvons citer entre autres, les problèmes principaux liés sont les suivants :

- au manque de connaissances dans le domaine biologique ;

- à la non-maîtrise de la modélisation des systèmes à base d’agents ;
- à la non-maîtrise de la plate-forme GAMA ;
- à la définition des spécifications des modèles.

3 État de l’art

L’état de l’art étant une importante de toute recherche scientifique, nous présentons dans cette partie un résumé des études connexes à notre sujet. Nous présenterons dans une première partie les modèles non liés aux agents plus précisément les modèles mathématiques. Nous présenterons dans un second temps les modèles liés aux agents.

3.1 Les modèles déterministes et stochastiques

Les modèles déterministes ont un comportement prédictible et entièrement spécifié par les conditions initiales du système modélisé. Les modèles déterministes peuvent être décrits par des EDO (équations différentielles ordinaires) et sont relativement faciles à simuler. Ils se prêtent bien à l’analyse mathématique et à la compréhension des problèmes biologiques [13].

Par contre les modèles stochastiques font appel aux probabilités et leurs sorties sont aléatoires. Ils sont plus réalistes que les modèles déterministes car ils prennent en compte des facteurs non déterministes, mais présentent l’inconvénient d’être difficiles à simuler en raison du nombre de paramètres qu’ils intègrent. C’est pourquoi nous nous pencherons sur l’approche déterministe pour modéliser notre modèle.

3.2 Les modèles connexes non liés à l’agent

Dans cette partie nous allons présenter quatre (4) principaux travaux non fondés sur les agents pour la modélisation et la simulation de systèmes biologiques. Ces modèles sont : *la modélisation mathématique, les méthodes Monte Carlo et la simulation, les automates cellulaires et les outils Petri net.*

Le tableau 1 résume les points forts et les points faibles de ces modèles.

3.3 Les Travaux connexes liés aux agent développés pour les systèmes biologiques complexes

Dans cette partie nous présentons quatre (04) travaux qui ont été menés dans le cadre de résoudre certains problèmes biologiques complexes.

Travaux de A. Troisi et al. [15] l'objectif des travaux menés par les auteurs était de réaliser une agrégation optimale dans le processus d'autoassemblage moléculaire, c'est-à-dire de réaliser une structure organisée à plus faible énergie. Pour modéliser leurs systèmes ils ont combiné l'approche stochastique et déterministe afin de conduire un système désordonné à s'organiser et tout ceci avec moins d'efforts (moins d'énergie a dépensé). La figure 2 présente les résultats obtenus.

Les résultats de la figure 2 montre la comparaison entre la simulation de Monte-Carlo et la simulation de systèmes multi-agents. Dans le graphique qui montre l'énergie dépensée (fig. 2.a), la courbe bleue (inférieure) représente la simulation à base d'agent, et la courbe rouge (supérieure) représente la métropole, qui est une méthode de simulation de Monte-Carlo, nous constatons que la simulation à base d'agent dépense moins d'énergie que celle de Monte-Carlos. La fig. 2.b illustre le processus intermédiaire de l'assemblage et La figure 2.c illustre l'agrégation finale.

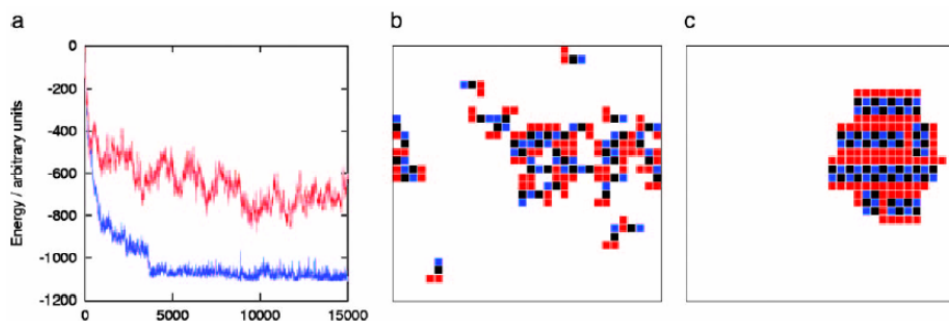


FIGURE 2 – *comparaison des simulations M.Carlos et ABM [15]*

Avantages.

- Combinaison de règles stochastiques, déterministes et adaptées qui conduisent un système désordonné à s'organiser dans une configuration ordonnée à faible énergie ;
- Amélioration de l'algorithme de Metropolis MC ;
- Utilisation du mécanisme d'apprentissage pour la division ou la fusion des agents ;
- Les résultats obtenus sont des plus satisfaisants que ceux obtenus avec la méthode de Monte Carlos (fig. 1)

Inconvénients.

- Mauvaise qualité de tentatives de déplacement car la simulation converge vers la distribution limitée ;
- Partage et modification des actions des agents lorsqu'une solution erronée est partagée vu que les agents sont synchronisés entre eux.

Travaux de S. Bandini et al. [2] Les travaux menés par Bandini et al. consistaient à modéliser système immunitaire à base d’agent afin de découvrir des modèles de sécurités novateurs et plus efficaces pour la défense du corps humain.

Avanatages.

- Utilisation du principe de similarité entre le système immunitaire et les ABM ;
- Utilisation du mécanisme d’apprentissage afin de développer et évoluer son mécanisme d’auto-protection ;
- Utilisation du modèle des agents situés afin de représenter l’interaction entre les entités dépendantes de l’espace ;
- Développement de mécanisme d’adaptation intrinsèque ;

Inconvénients.

- Ne permet pas de prédire les menaces qui prévalent en fonction de l’environnement ;

Travaux de X. Li et al. [9] Dans leurs travaux Li et al. ont modélisé un système à base d’agent permettant de gérer le renouvellement épithélial de la peau en se focalisant sur les hypothèses de cellules souches cutanées et survie de clones à long terme. Avec leur modèle les auteurs sont parvenus à expliquer les raisons de la non-régénération des cellules épithéliales de la peau au fur et mesure que nous vieillissons.

Avantages.

- Les résultats ont permis de suggérer que les cellules-souches quiescentes (phase de repos) aident à préserver l’hétérogénéité génétique dans le système en empêchant une perte de cellules irréversibles due à une division symétrique stochastique ;
- Fournis des preuves solides pour soutenir l’importance des cellules à cycle lent contribuant à la régénération tissulaire à long terme ;
- L’expérience a démontré l’importance d’une population de cellules souches à cycle lent et lent de la régénération à long terme de l’épithélium cutané et de l’homéostasie (fig. 2).

Inconvénients

- Variation du nombre de cellules qui entraîne une perturbation de la simulation due au modèle de division stochastique ;
- Nécessité d’améliorer l’algorithme de décalage pour inclure des mécanismes de rétroactions supplémentaires, pour des réponses plus rapides.

Travaux de Dao [3] Dans son travail l’auteur a développé un ensemble de modèle entièrement intégré pour simuler les processus métaboliques osseux à des échelles multiples.

Avantages.

- Utilisation de la dynamique multicorps pour estimer les limites du corps et les conditions de charge à partir de la cinématique du corps pour le modèle au niveau des organes ;
- Utilisation de la méthode des éléments finit pour estimer la déformation tissulaire et la charge mécanique dans des conditions de charge corporelle pour le modèle au niveau tissulaire ;
- Utilisation du mécanisme de remodelage osseux grâce à une simulation basée sur un agent sous chargement de tissu pour le modèle au niveau cellulaire ;
- Réalisation d’une étude de cas sur le processus de remodelage osseux situé sur la mâchoire humaine ;
- Validation des résultats avec les données de la littérature à chaque niveau anatomique.

Limites.

- Seul le modèle au niveau cellulaire a été implémenté et teste, les autres études sont théoriques.

Travaux de Michel Delcey [4] Dans ses travaux l’auteur a présente d’une manière schématique la notion de la défiance motrice et ses perturbations. Les figures 4 et 3 sont les schémas issus de son étude. La figure 4 présente une représentation schématique de la motricité volontaire et les différentes commandes intervenant dans cette action. La figure 3 quant à elle présente la représentation schématique d’une défiance motrice avec les différents avec les différents organes intervenants et agents causals de cette défiance.

Avantages.

- Présentation des différentes commandes intervenants dans la motricité volontaire ;
- Notion de la défiance motrice ;
- Présentation des différentes perturbations du mouvement volontaire ;

Inconvénients. Le principal inconvénient de ce travail est qu’aucune modélisation n’a été effectuée, c’est juste une étude théorique que l’auteur a menée.

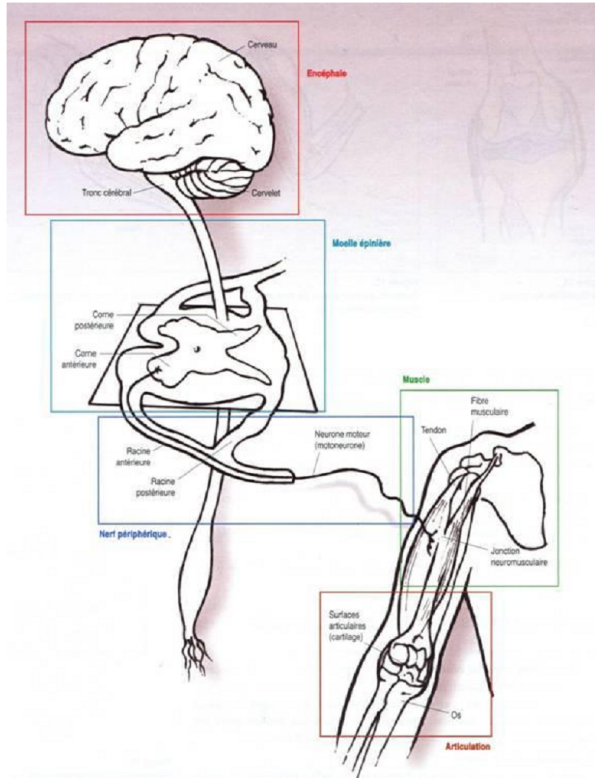


FIGURE 3 – Condition physiopathologique

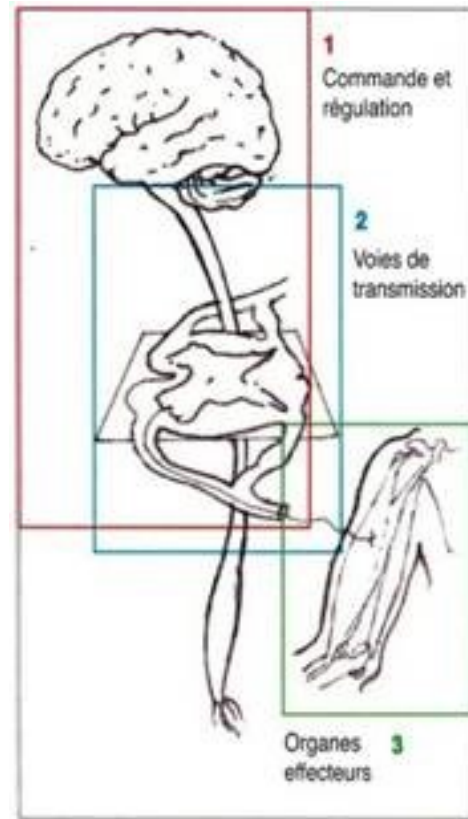


FIGURE 4 – Condition physiologique

Ainsi c'est sur ce travail de *Michel Delcey* [4] que nous nous inspirerons pour proposer notre solution. Ce choix se justifie par le fait que ce travail présente les deux cas du contrôle de la motricité volontaire (physiologique et physiopathologique), mieux encore, les auteurs traitent les différents cas qui entravent le fonctionnement de ce contrôle de la motricité (tous les cas qui causent la paralysie), ce qui nous sera très utile dans l'implémentation de notre modèle. Par contre il présente l'inconvénient d'être juste une étude théorique c'est-à-dire que le modèle n'a pas été implémenté.

Ainsi c'est cette limite (non-implémentation de l'architecture) que nous essayerons de combler dans la suite de ce travail.

4 Solution proposée

4.1 Description de la première architecture proposée

Comme expliquer précédemment, nous nous sommes inspirés du travail de *Michel Delcey* [4] pour proposer notre architecture de l'interaction entre le centre nerveux (système nerveux) et le corps humain (muscle). La figure 5 présente cette architecture du contrôle nerveux proposée.

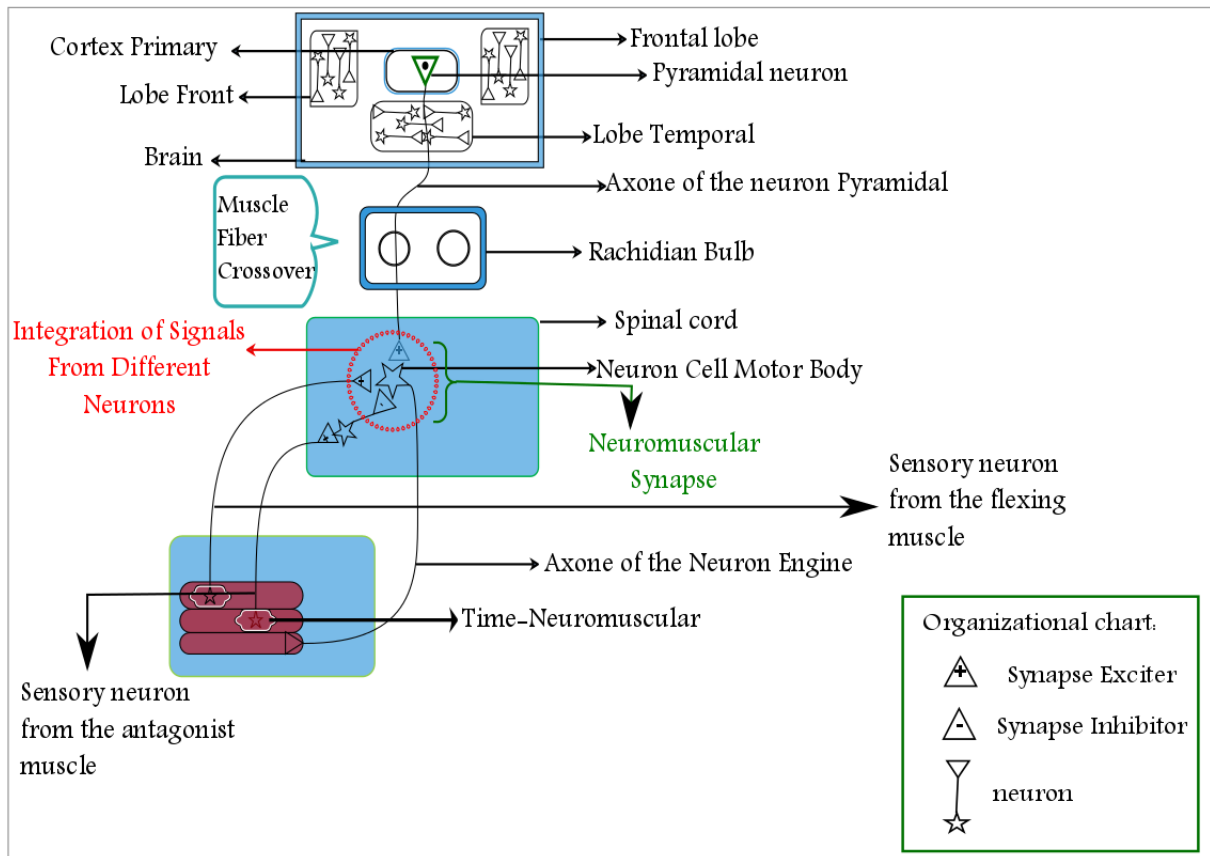


FIGURE 5 – *Architecture du contrôle nerveux*

Tout commence dans le cerveau où l'intention d'effectuer un mouvement est déclenchée par le cortex moteur qui est constitué de millions de neurones (dans notre exemple un seul) qui va émettre un signal nerveux (PA) et qui sera transmis le long de l'axone du neurone. Arrivé au niveau du bulbe rachidien l'axone du neurone change de côté (va se diriger vers le côté gauche s'il est émis à partir de l'hémisphère droit et vers le côté droit dans le cas contraire), l'axone continue son chemin pour aller réaliser une synapse avec le motoneurone. Ce dernier reçoit les messages de plusieurs neurones qu'ils intègrent en faisant la sommation temporelle de tous les messages issus des autres neurones. À l'issue de cette intégration il est généré une réponse positive ou négative selon que la valeur de la sommation a atteint le seuil ou pas.

Dans le cas de génération d'une réponse positive (résultat sommation \geq seuil) un PA est généré par le motoneurone qui ira stimuler les fibres musculaires et provoquer le mouvement. Dans le cas contraire aucun PA n'est généré donc aucune stimulation ce qui veut dire qu'aucun mouvement ne sera réalisé.

4.2 Description de la seconde architecture (environnement de simulation) proposée

Nous avons dans la section précédente, proposé une architecture pour notre modèle que nous allons simuler. Cependant cette architecture ne peut être simulée vue que nous ne pouvons pas l'importer dans un environnement de simulation (par exemple Gama) pour réaliser notre simulation. C'est pourquoi nous avons proposée une seconde architecture que nous avons conçu sur la plate-forme QGIS. La (FIGURE 6) présente notre architecture réaliser avec l'outil QGIS.

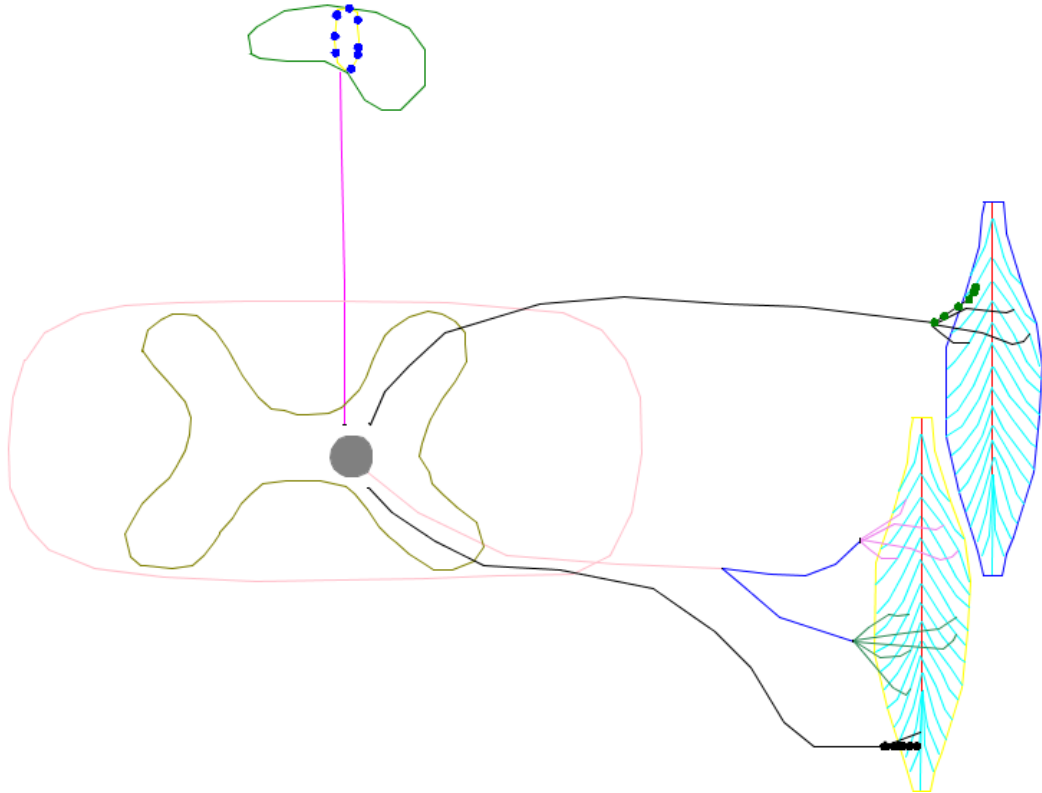


FIGURE 6 – *Architecture réaliser sur la plate-forme QGIS*

Description de l'architecture :

- La première partie de l'architecture (en haut) concerne le cerveau au sein du quel se trouve le cortex moteur. C'est à partir de ce dernier que l'initiative de réaliser un mouvement est prise. Les agents en bleue représentent les neurones (MU11) qui transportent le message de la réalisation du mouvement.
- La deuxième partie (au centre) concerne la moelle épinière qui est le centre où arrivent les informations, où sont traitées ces informations et d'où partent les influx

nerveux de commande. C'est la partie qui perçoit et décide. L'axe reliant le cerveau et la moelle épinière est le cordon spinal. Le noeud au centre de la moelle épinière (en gris) correspond au corps cellulaire du neurone moteur où sont effectuées l'intégration des informations provenant des différents neurones.

- La troisième partie (à droite) de cette architecture concerne les muscles. À ce niveau nous avons jugé utile d'utiliser deux muscles, le muscle sensitif (muscle en jaune) qui représente également le muscle qui sera innervé, et le muscle antagoniste (muscle en bleue), pour que notre simulation soit la plus proche possible de la réalité. Les agents en noire au niveau du muscle sensitif (muscle en jaune) représentent les neurones transportant l'information sensitive vers le motoneurone. Les agents en vert au niveau du muscle antagoniste (muscle en bleue) représentent les neurones transportant l'information antagoniste (information d'opposition au mouvement) vers le motoneurone.

Le muscle sensitif est constitué de plusieurs éléments appelés « **fuseau neromusculaire** (petites barres en cyan) ». Ces derniers sont des mécanorécepteurs constitués de fibres musculaires modifiées. Ils ont la capacité de traduire un stimulus mécanique en un message nerveux. Ce sont ces éléments qui rendent un muscle sensible. Tous ces muscles sont en relation avec le motoneurone par l'intermédiaire de leurs neurones à travers l'allongement de leurs axones.

5 Conception et modélisation de notre système

5.1 Description du système à développé

Notre travail consiste à développer un système à base d'agent pour simuler le contrôle du centre nerveux avec le corps humain, c'est-à-dire tous les processus intervenant dans la réalisation d'un mouvement volontaire du cerveau jusqu'aux muscles. Ce travail permettra aux novices en biologie d'avoir une vision globale des différents organes intervenants et de leurs interactions dans la réalisation d'un mouvement volontaire. En outre il permettra également de simuler (expérimenter) des cas difficiles voire dangereux à réaliser dans la réalité car ils peuvent porter atteinte à la vie humaine, comme par exemple le cas d'un accident vasculaire cérébral qui consiste à détruire tous les neurones pyramidaux dans le cortex moteur primaire, qui peut conduire à une paralysie chez le patient. De plus il permettra aux médecins d'effectuer des diagnostics très précis dans des cas de perturbation de la motricité d'un patient. La description des organes intervenant dans le processus de la réalisation du mouvement sont développés dans la (SECTION 5.4) et le fonctionnement de notre système est développé dans la (SECTION 7).

5.2 Les hypothèses

Le système nerveux est un système très complexe faisant intervenir plusieurs organes dans son fonctionnement. Ainsi face à cette complexité, et avec l’aval de notre encadrant nous avons considéré seulement le cortex moteur primaire au niveau du cerveau pour simplifier le modèle, par la suite le modèle peut être amélioré en considérant les autres organes.

Hypothèse 1 Dans notre premier modèle, nous considérons seulement le cortex moteur comme l’initiateur du mouvement volontaire.

Hypothèse 2 Dans le second modèle qui est une amélioration du premier, nous prévoyons de tenir compte des autres organes au niveau du cerveau tel que : *le lobe frontal, le lobe pariétal et le lobe temporal*.

5.3 L’environnement de simulation

Notre environnement de simulation est la seconde architecture que nous avons proposée. Nous avons conçu l’architecture sur la plate-forme QGIS pour pouvoir l’exporter sur la plate-forme GAMA pour la simulation. La description de l’architecture (environnement de simulation) est présentée dans la section 4.2. La FIGURE 6 donne un aperçu de cet environnement.

5.4 Les agents

Nous présentons dans cette section les différents agents que nous avons utilisés au cours de notre simulation. Au total nous avons utilisé cinq (05) agents pour notre simulation.

- **L’agent neuronsMU11** : représente l’agent transportant le message provenant du cortex moteur vers le motoneurone. Son rôle est de transporter les messages nerveux du cortex moteur sous forme d’un signal électrique appelé potentiel d’action (PA) vers le motoneurone où il sera en jonction. Arrivé à cette jonction il meurt pour donner naissance à un nouvel agent appelé neurotransmetteur.

Le diagramme d’activité de cet agent est représenté dans la (FIGURE 7). Les (TABLEAU 2 et 3) présentent respectivement les attributs et les activités de l’agentMU11.

- **L’agent neuronSensitif** : représente l’agent transportant le message provenant du muscle sensitif vers le motoneurone, muscle qui sera par ailleurs innervé pour effectuer le mouvement. Son rôle est de transporter les messages provenant du fuseau neurone musculaire du muscle soléaire vers le motoneurone où il sera en jonction.

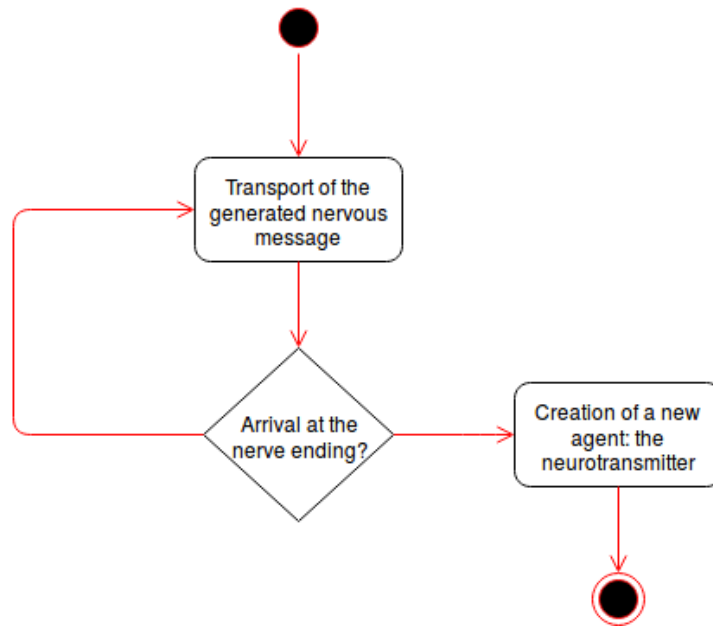


FIGURE 7 – *Diagramme d'activité de l'agent neuronM11*

Arrivé à cette jonction il meurt pour donner naissance à un nouvel agent appelé neurotransmetteur. Il présente les mêmes attributs et activités que l'agentMU11.

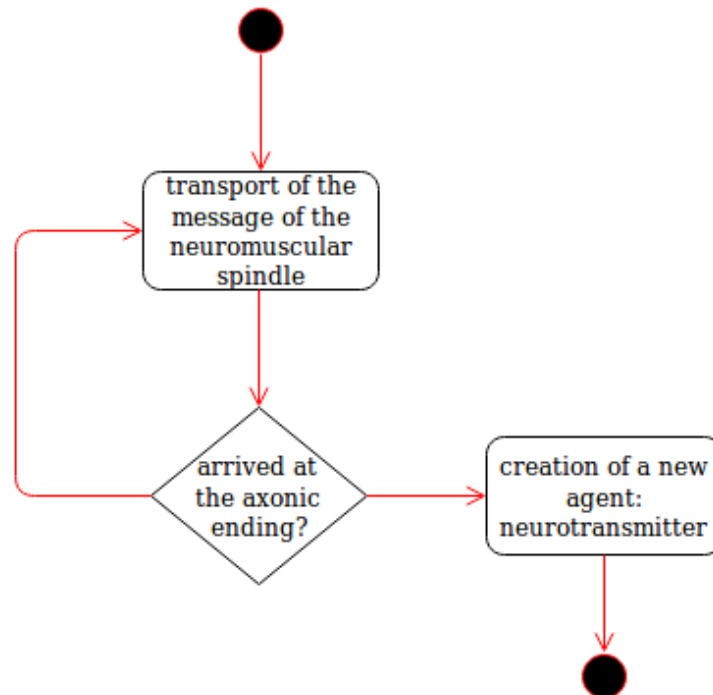


FIGURE 8 – *Diagramme d'activité de l'agent sensorNeuron*

Le diagramme d'activité, les attributs et les activités de cet agent sont respective-

ment présenter dans la FIGURE 8, le (TABLEAU 2 et 3).

- **L'agent AntagonisticNeuron** : représente l'agent transportant le message provenant du muscle fléchisseur (antagoniste) vers le motoneurone. Son rôle est de transporter les messages provenant du fuseau neurone musculaire du muscle fléchisseur vers le motoneurone où il sera en jonction. Arrivé à cette jonction il meurt pour donner naissance à un nouvel agent appelé neurotransmetteur. Il présente les mêmes attributs et activités que l'agentMU11 à une différence près, le signal qu'il transporte arrive dans le sens de s'opposer au mouvement.

Le diagramme d'activité, les attributs et les activités de cet agent sont respectivement présentés dans la FIGURE 9, le TABLEAU 2 et 3.

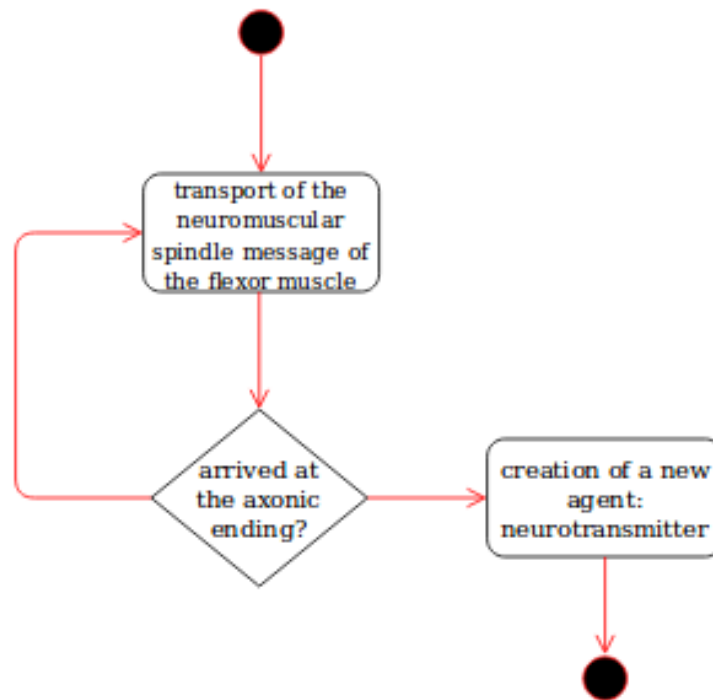


FIGURE 9 – *Diagramme d'activité de l'agent AntagonistNeuron*

- **L'agent neuroTransmitter** : représente l'agent qui achemine les informations (signal qu'il transporte) au niveau de la fente synaptique vers le motoneurone. Une fois que ces informations arrivent au niveau du motoneurone, ce dernier intègre toutes ses informations pour générer un nouveau signal. Cette intégration consiste à effectuer une sommation de tous les signaux (informations) qui arrivent à son niveau, par la suite faire la moyenne de ces signaux.

Ainsi si le nouveau signal généré dépasse la valeur seuil (70 dans notre cas), l'information (nouveau signal généré) sera transmise du motoneurone vers le muscle par

le biais des neurotransmetteurs. Arrivé au niveau du muscle, ce signal va stimuler les fibres nerveuses pour provoquer le mouvement.

Par ailleurs si le signal généré n'atteint pas cette valeur seuil de 70 aucune information ne sera transmise vers le muscle, donc aucun mouvement ne sera effectué.

Le diagramme d'activité, les attributs et les activités de cet agent sont respectivement présentés dans la FIGURE 10, le TABLEAU 4 et 5.

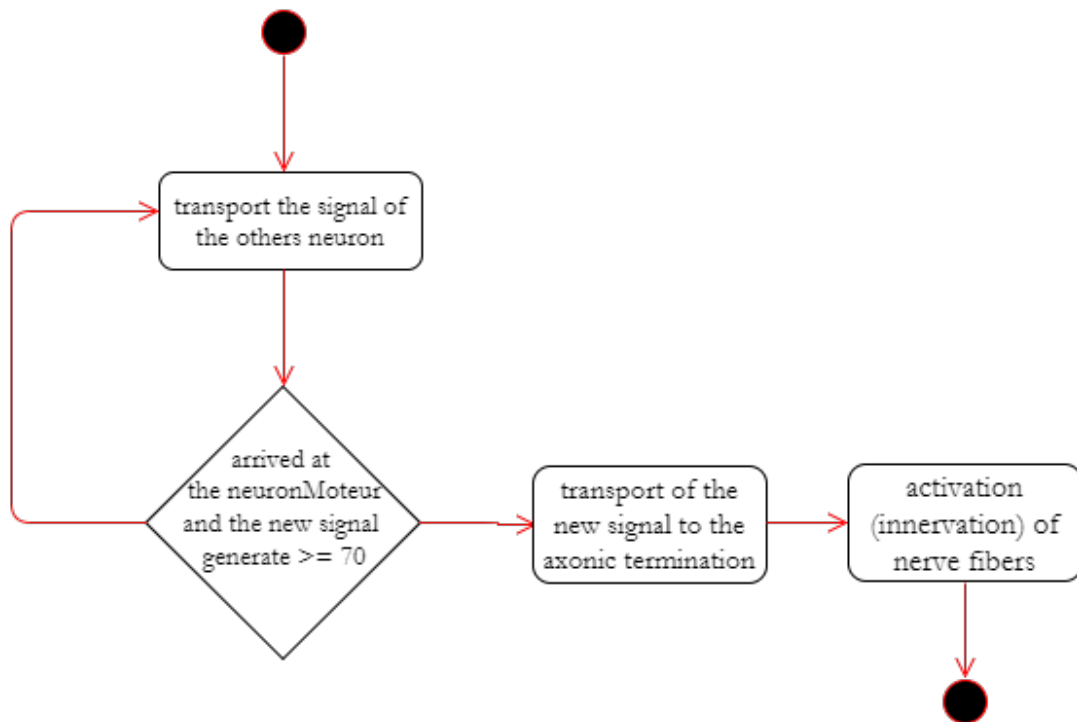


FIGURE 10 – *Diagramme d'activité de l'agent neuroTransmitter*

- **L'agent neuronMoteur** : c'est l'agent qui assure l'intégration des différents messages qui arrivent à son niveau. Il effectue la sommation des différents signaux qui arrivent à son niveau et génère un nouveau signal en effectuant la moyenne de cette sommation. Ainsi si le nouveau signal est supérieur au seuil, il sera acheminé au niveau des muscles, dans le cas échéant aucune autre action ne sera effectuée.

Le TABLEAU 6 présente les activités de cet agent.

Le diagramme de classe de notre conception est présenté à la FIGURE 11.

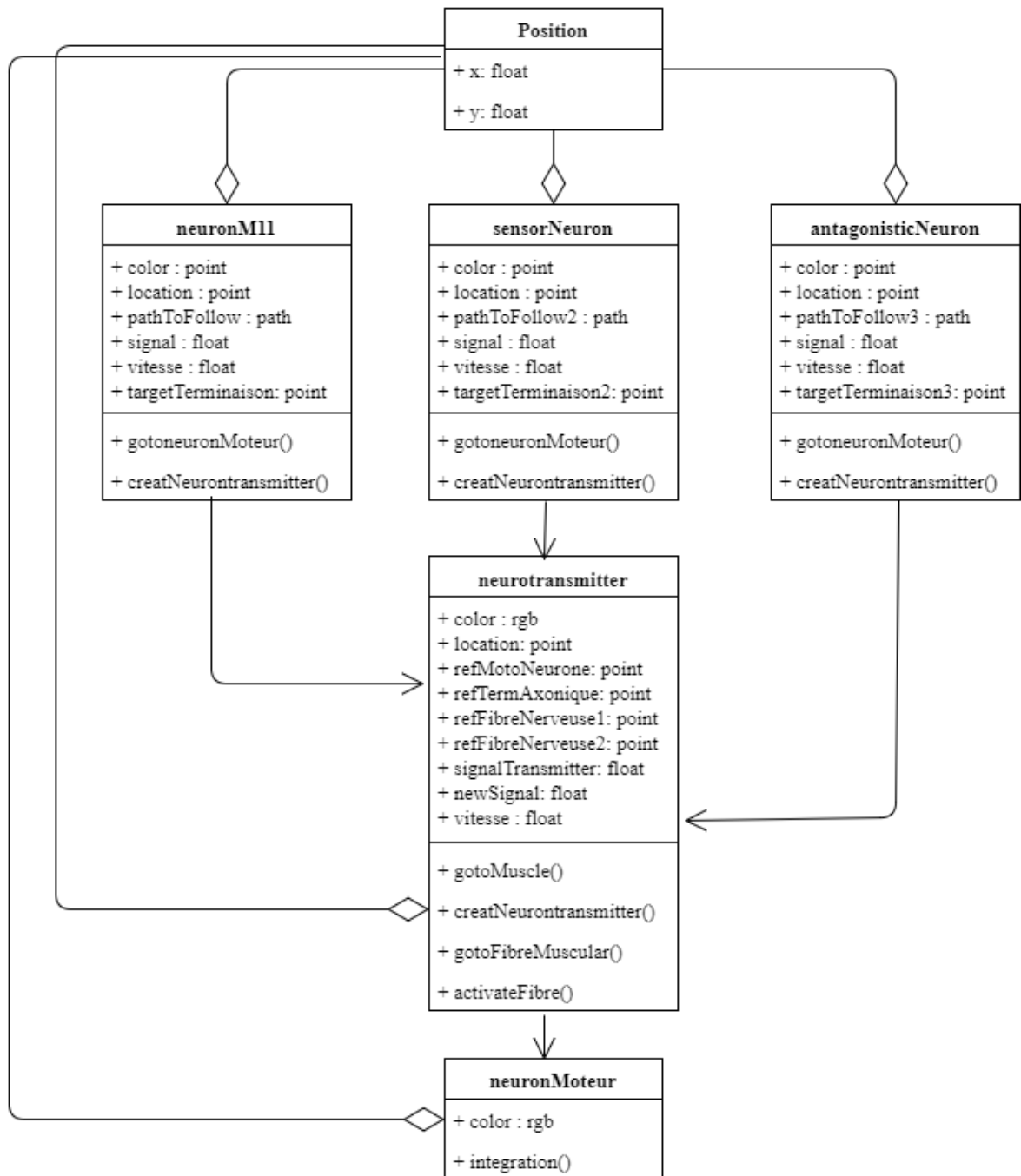


FIGURE 11 – *Diagramme de classe de notre modèle*

6 Implémentation

6.1 Environnement matériel

Pour le développement et les expérimentations nous avons utilisé un ordinateur portable avec les caractéristiques suivantes :

- Modèle : Dell N5110
- Processeur : Intel(R) CoreT M i5-M2450 @2.4 GHZ
- RAM : 8.00 Go
- OS : Ubuntu 16.04

6.2 Environnement logiciel

6.2.1 Langage de simulation

Pour l'a simulation de notre modèle nous avons utiliser le langage GAML(Gama Modeling Language). C'est un langage dédié à la simulation multi-agent sur la plate-forme GAMA. Dans le cadre du présent ce travail, nous avons utilisé la *version 1.7*.

6.2.2 Les plate-formes et logiciels utilisés

Gama. Pour la réalisation du présent travail, nous avons porté notre choix sur la plate-forme Gama. Il faut signaler cependant que ce n'est pas la seule plate-forme de simulation qui existe. Il existe également la plate-forme NETLOGO qui nous a été proposée, mais nous avons préféré la plate-forme GAMA.

Ce choix s'explique par le fait que la plate-forme GAMA est plus performante que la plate-forme NETLOGO et de surcroît open source et multi-plateforme [1]. De plus elle nous permet de faire appelle à la plate-forme QGIS ce qui a été très utile pour nous. En outre la plate-forme GAMA est utilisée dans deux modules qui sont enseignés à l'IFI à savoir : *Simulation multi-agent* et *Modélisation des systèmes complexes*. La FIGURE 12 présente une comparaison entre ces deux plates-forme.

<u>Requirement</u> <u>/ Platforms</u>	Model fit W1-4	Manipulable	<u>Generic</u>	Primitives	CPU efficient
<u>Netlogo</u>	No (env.)	Yes	Yes	No	No
GAMA	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

FIGURE 12 – Tableau comparatif de la plateforme Netlogo et Gama [1]

QGIS est un logiciel SIG (système d'information géographique) qui permet de concevoir, traiter tous type de données spatiales et géographiques. Il prend en charge plusieurs format dont le « shapefile » qui est le format supporter par la plate-forme GAMA. [14]

Plusieurs autres plate-formes ont été utilisées durant le présent projet à savoir :

- **Github** : Pour l'hébergement et la gestion de développement du système [7].
- **QGIS** : Pour la conception de l'architecture [14].
- **Draw.io** : Pour la conception des diagrammes UML [6].
- **ShareLatex** : Pour la rédaction du rapport [16].

6.3 Fonctionnement du modèle

Le modèle que nous avons implémenté suit le fonctionnement réel du mouvement volontaire. Au tout début c'est l'agent cortex moteur qui déclenche l'initiative de réaliser un mouvement en envoyant un message (signal électrique) qui est transporté par les agents neurones (MU11 dans notre cas), au même moment le muscle sensoriel envoie également un message électrique vu que celui qui sera stimulé par le biais des agents neurones sensitifs, aussi le muscle antagoniste envoie également des messages (signaux électriques) pour s'opposer au mouvement par le biais des agents neurones antagonistes. Une fois que les agents envoyés par tous ces muscles arrivent au niveau de la terminaison axonique de leurs axones, ils meurent et donnent naissance à un autre type d'agent : **le neurotransmetteur** vu qu'ils ne peuvent pas traverser **la fente synaptique**.

Une fois que le neurotransmetteur est créé, il achemine le message nerveux hérité de son agent parent vers l'agent **neurone moteur**. Ce dernier intègre tous les messages qu'il reçoit. À ce niveau nous avons créé une liste pour enregistrer les signaux que transportent tous les neurotransmetteurs, ensuite nous avons calculé la moyenne de tous ses signaux pour obtenir la valeur du nouveau signal.

Ainsi si la valeur du nouveau signal est ≥ 70 , il peut-être acheminé vers le muscle pour l'innervier et provoquer le mouvement, dans le cas échéant aucun signal ne sera acheminé et aucun mouvement ne sera effectué.

7 Expérimentations

7.1 Les scénarios de test

Pour réaliser une expérimentation de notre modèle nous avons mis en place deux scénarios de test.

- **Premier scénario** : Dans ce scénario nous avons simulé le fonctionnement du mouvement volontaire. Nous avons donné des valeurs aux attributs signale de telle sorte que le mouvement se réalise, mais pas toujours avec une même précision. Nous avons limité le seuil de la génération du signal à 70. Pour ce faire nous avons alloué

aux agents *MU11* et *SensitifNeuron* une valeur du signal de $60 + \text{rnd}(30)$, de même pour l'agent *AntagonistNeuron*, mais pour cet agent les valeurs sont négatives ($-60 - \text{rnd}(30)$), parce que les signaux qu'il envoie arrivent dans le sens de bloquer le mouvement.

- **Deuxième scénario** : Dans ce scénario nous avons essayé de simuler un **AVC (Accident vasculaire cérébral)** ou les neurones sont détruits du cortex moteur primaire. Pour ce faire nous avons donné un temps de vie aléatoire à chaque neurone du cortex moteur de sorte qu'ils n'arrivent pas à la terminaison axonique pour donner naissance aux neurotransmetteurs.

7.2 Les paramètres d'entrées

Les valeurs des paramètres d'entrées de nos trois principaux agents sont présentés dans le TABLEAU 7. La FIGURE 13 quant à elle présente les paramètres globaux de notre simulation.

The image shows a software interface for setting simulation parameters. It is organized into three main sections, each with a dropdown arrow on the left:

- General**: Contains three input fields, each with the value '10':
 - nombre de neurone pyramidal
 - nombre de neurone sensitif
 - nombre de neurone antagoniste
- GIS**: Contains two 'Shape File' labels, each followed by a text box containing a file path:
 - Shape File: C:\Users\M.Sani\g...\includes\new.shp
 - Shape File: C:\Users\M.Sani\g...\neuronMoteur.shp
- Random number generation**: Contains two controls:
 - Random number generator: A dropdown menu currently showing 'mersenne'.
 - Default random seed: A text box containing the value 0.5187327710012353.

FIGURE 13 – Les paramètres globaux de la simulation

7.3 Les conditions d'arrêt de la simulation

Les conditions d'arrêt de notre simulation sont :

- lorsque les neurotransmetteurs auraient atteint et activé les fibres musculaires ;
- lorsque le signal généré n’a pas atteint le seuil.

7.4 Les critères d’évaluation de notre travail

Comme préciser ci-haut, il est difficile d’évaluer les résultats de notre travail vu qu’aucun modèle n’a été développé dans ce sens pour nous permettre de faire une comparaison avec le notre. C’est pourquoi nous nous sommes penché sur la littérature, plus précisément sur les propriétés du potentiel d’action (le message nerveux) généré pour valider notre modèle.

Ainsi si le potentiel d’action que nous générons avec notre modèle possède les mêmes propriétés que le potentiel d’action dans la littérature, nous pouvons valider notre modèle. Dans le cas échéant il ne sera pas possible de le valider. Les propriétés d’un potentiel d’action sont [11] :

- Le potentiel d’action prend naissance soit au niveau des récepteurs sensoriels (fuseau neuromusculaire) soit au niveau des synapses. Sa genèse nécessite d’atteindre le potentiel seuil de l’ordre de -50mV (70 mV dans notre cas). De plus il est invariant, il obéit à la loi du tout ou rien, c’est-à-dire soit le signal a atteint le seuil pour générer un nouveau potentiel d’action, soit non, il garde le même niveau, il ne change pas quel qu’en soit l’intensité du signal.
- La précision d’un mouvement est codé en fréquence (fréquence de la courbe du signal généré) du potentiel d’action généré, vu qu’il n’est pas possible de faire varier le potentiel d’action.
- Le potentiel d’action se propage au travers d’un neurone sans perdre d’amplitude, il reste identique.

7.5 Les résultats obtenus

Nous présentons dans cette section les résultats obtenus de notre simulation.

- **Résultat du scénario 1 :** L’état initial de ce scénario est présenté à la figure 14. La courbe jaune représente le signal qui sera généré pour réaliser le mouvement. La courbe rouge représente le seuil auquel le signal sera généré. La courbe verte quant à elle représente la valeur du signal qui a été généré. Ainsi au bout d’un temps de la simulation on obtient le résultat qui est représenté à la figure 15. Nous remarquons bien qu’un signal est généré au bout d’un temps de simulation.
- **Résultat du scénario 2 :** Après exécution de ce scénario nous obtenons deux graphes. Un qui est similaire au graphe précédent qui nous renseigne sur le signal

généré et l'autre qui est en forme des *Pie* qui nous renseigne sur la répartition des agents de notre environnement. À l'état initial ce deuxième graphe se présente comme présente à la figure 17. En visualisant cette figure nous remarquons que nous avons **10 agents MU11, 10 agents Sensitifs et 10 agents Antagonistes**. Ainsi au bout d'un temps de simulation nous pouvons visualiser les résultats que nous obtenons qui sont représentés à la figure 18 et 19.

7.6 Analyse des résultats

D'après la FIGURE 15 du *scénario 1*, nous constatons bien qu'un signal est généré (*courbe en jaune*) au bout d'un temps de simulation. Nous remarquons que bien avant le début de la génération du signal, la croissance de la courbe de la valeur du signal généré (72) (*courbe verte*) qui dépasse légèrement le seuil (*courbe en rouge*), ce qui correspond exactement au principe de génération d'un signal pour la réalisation d'un signal, et aussi des critères que nous avons fixés. De plus nous remarquons également que le signal n'est généré qu'une fois que la valeur du signal a dépassé le seuil, ce qui nous permet de dire qu'il obéit à **la loi du tout ou rien**, qui est la première propriété du potentiel d'action. En outre le signal généré est codé en fréquence du potentiel d'action représenté sous forme *sinusoïdale*, ce qui nous permet de bien voir la précision du mouvement qui sera réalisé. Contrairement à la figure 15, la figure 16 présente une forte précision du mouvement à réaliser, qui est caractérisé par la fréquence du potentiel d'action et la valeur du signal (80) généré. Cette illustration nous permet d'affirmer que notre modèle répond à la deuxième propriété du potentiel d'action qu'est « La précision d'un mouvement est codé en fréquence (fréquence de la courbe du signal généré) du potentiel d'action généré. ». Plus la valeur du signal généré est supérieur plus le mouvement à réaliser est très précis.

La figure 18 du *scénario 2*, nous permet de constater qu'au bout d'un temps de simulation nous ne disposons d'aucun *agent MU11*. Cela s'explique par l'action que nous avons développé pour tuer les agents une fois qu'ils dépassent un temps de vie. Les résultats de la figure 19 présentent le signal généré au cours de la simulation. Nous remarquons bien que la valeur du signal généré est très faible, ce qui est très logique, vu que le signal ordonnant la réalisation du mouvement (signal issu du cortex moteur) a été perdu après la mort des agents le transportant, ce qui fait le signal généré (*courbe en jaune*) ne pourra pas permettre de stimuler un muscle pour provoquer un mouvement.

Ainsi de ce résultat nous pouvons conclure qu'aucun mouvement volontaire ne peut être réalisé si les neurones du cortex moteurs sont détruits.

L'ensemble de ces observations nous permet de conclure qu'un signal ne peut être généré si la valeur du signal généré après intégration du neurone moteur ne dépasse le seuil (70 *dans notre cas*). En outre plus la valeur du signal généré est grande plus le mouvement

sera précis. De plus aucun mouvement volontaire ne peut être réalisé si les neurones transportant le message du mouvement sont détruits. Ainsi de ce résultat nous pouvons dire que ce modèle assez simpliste nous permet d'obtenir des résultats assez satisfaisants.

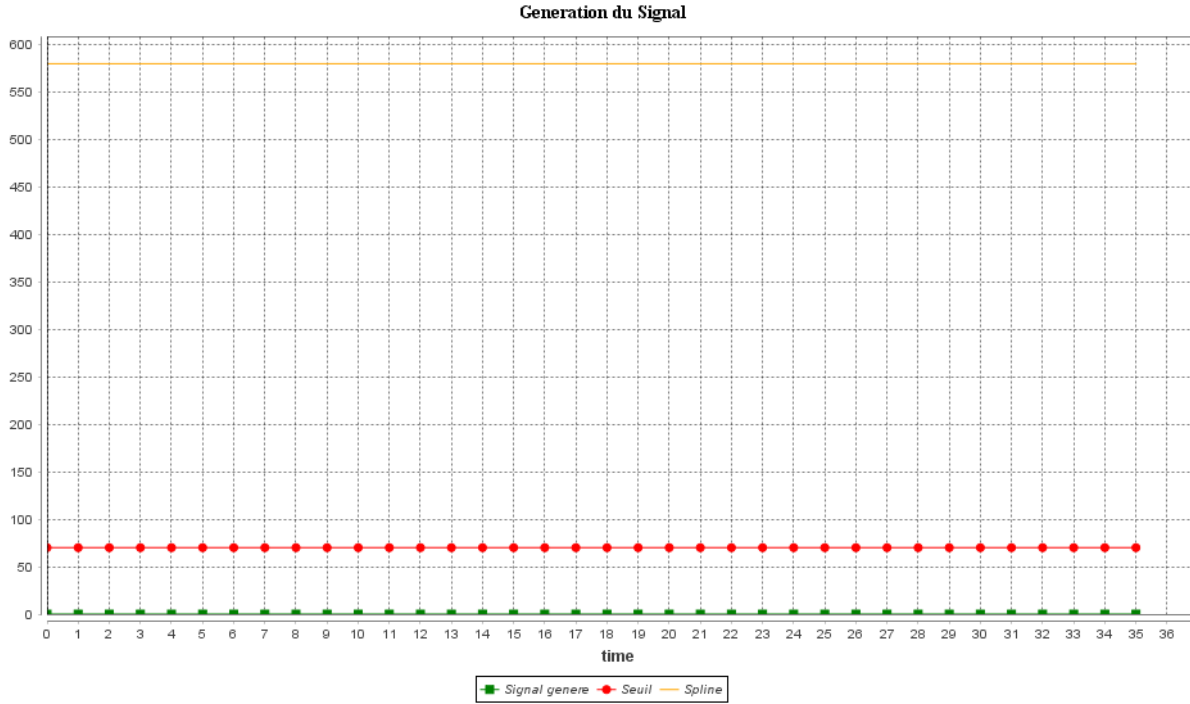


FIGURE 14 – *État initial du scénario 1*

8 Discussions

Nous avons dans ce travail implémenté un modèle qui simule le fonctionnement du système nerveux plus précisément celui du mouvement volontaire. Le but du présent travail était de proposer une architecture du système à base d'agents pour le contrôle nerveux en interaction avec le corps humain via les muscles et de proposer une méthodologie pour simuler ce système dans les conditions physiologiques et physiopathologiques (muscle paralysé).

Ainsi au bout de ce travail, nous pouvons dire que cet objectif a été atteint. En effet les résultats obtenus lors des expérimentations nous permettent de constater qu'un signal a bien été généré au bout de la simulation du mouvement volontaire (*scénario 1*), et ce résultat obtenu nous permet bien affirmer que le potentiel d'action (signal généré) obéit bien à « la loi du tout ou rien », soit le potentiel d'action a atteint le seuil pour générer un signal, soit il n'a pas atteint le seuil et aucun signal n'est généré. De plus la densité des sinusoïdes du signal représenté nous permet d'affirmer que le potentiel d'action est codé

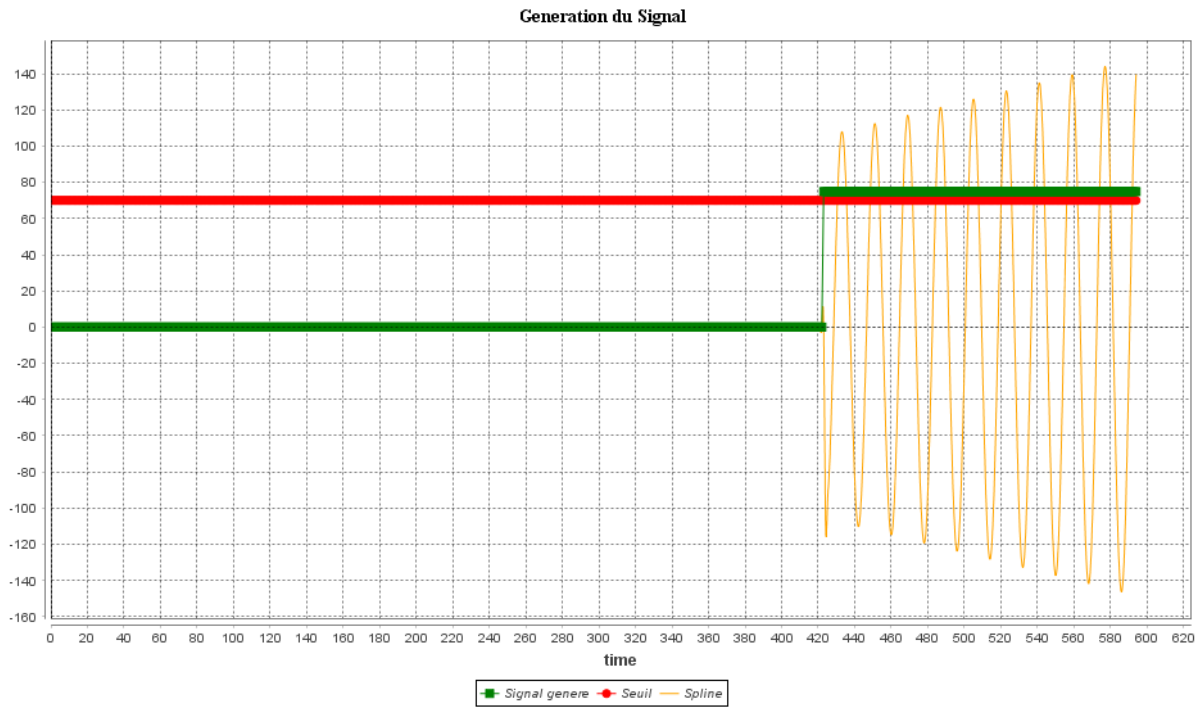


FIGURE 15 – *Signal généré avec une valeur de 72*

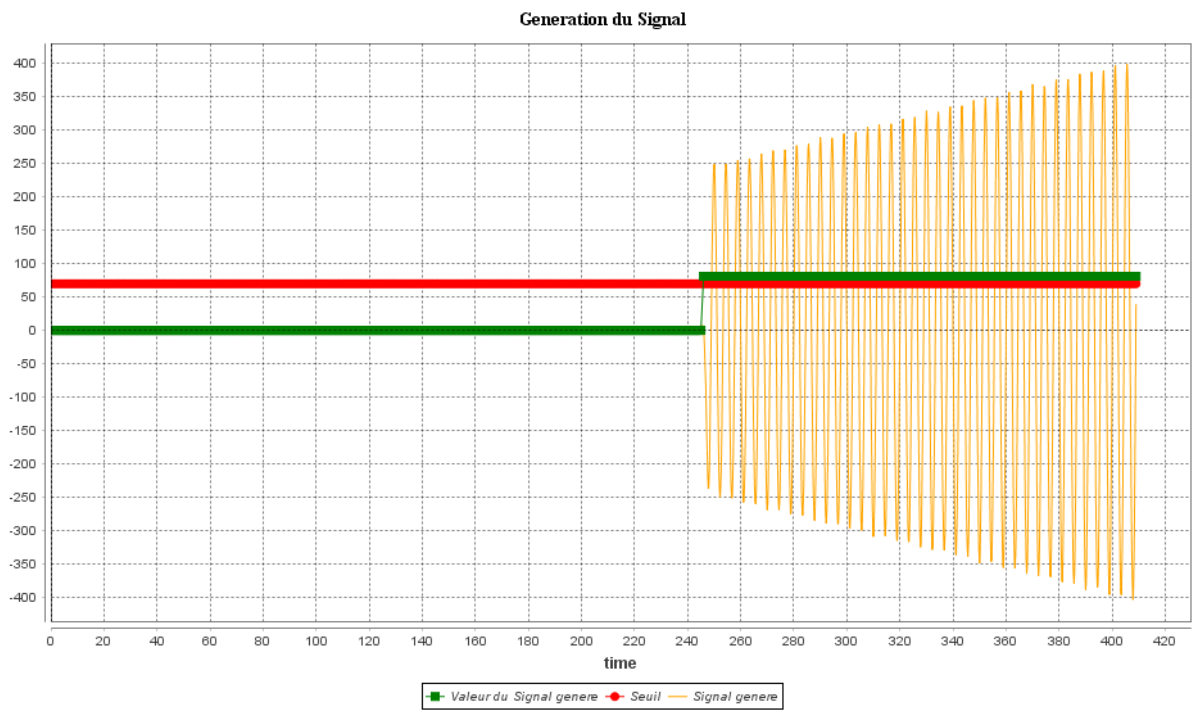


FIGURE 16 – *Signal généré avec une valeur de 80*

en fréquence, ce qui correspond à la deuxième propriété du potentiel d'action. En outre les résultats de l'expérimentation du *scénario 2* nous permettent d'affirmer qu'un **AVC**

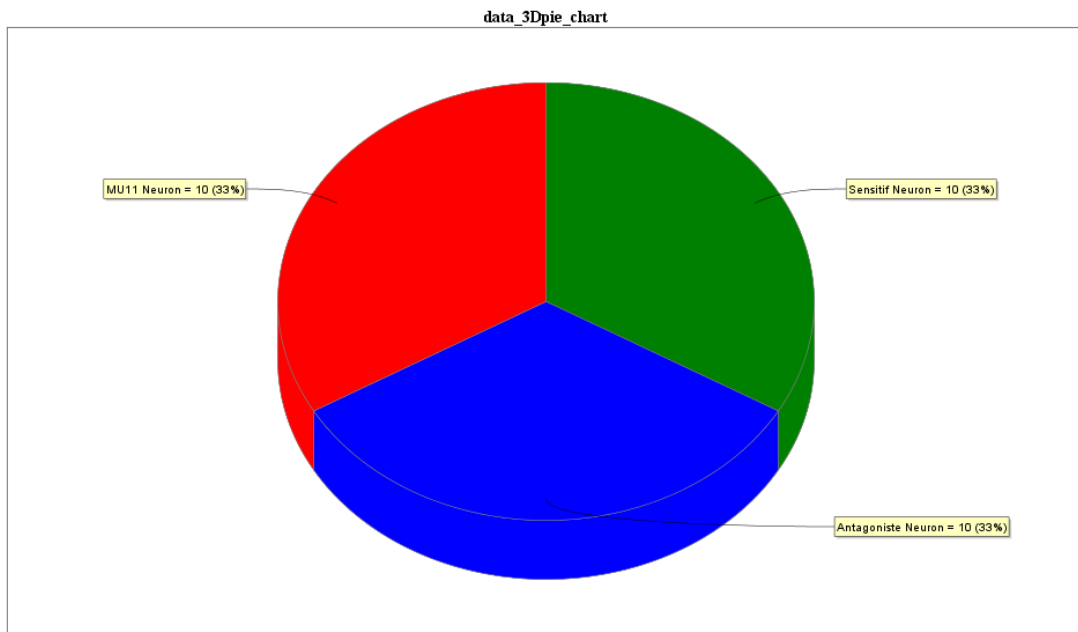


FIGURE 17 – *État initial du scénario 2*

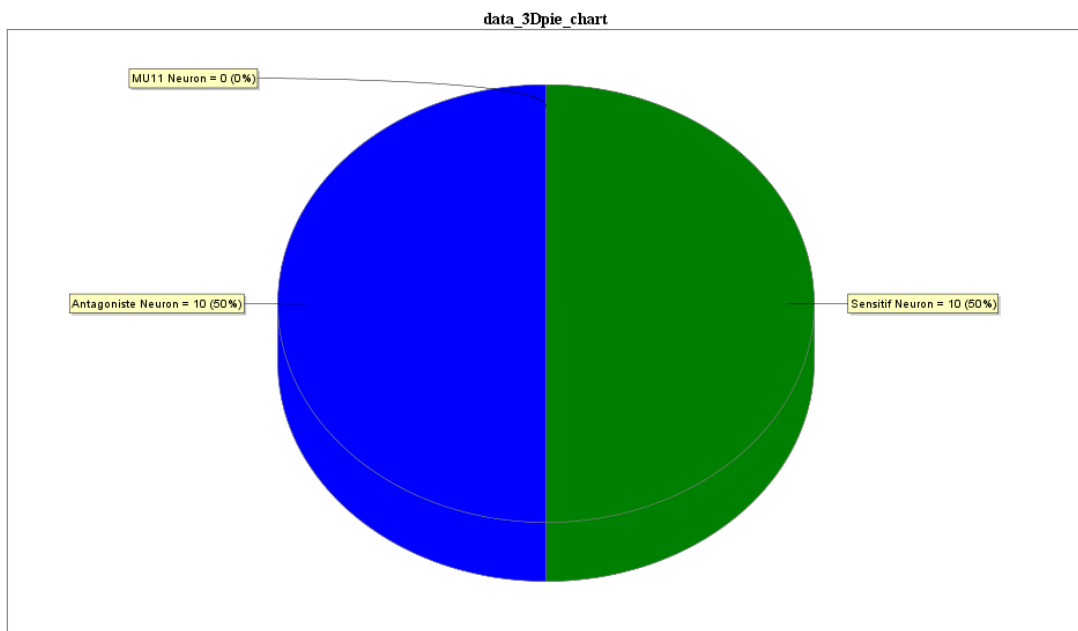


FIGURE 18 – *Répartition des agents après la simulation*

(**Accident Vasculaire Cérébral**) n'est rien d'autre que la destruction des neurones pyramidaux du cortex moteur primaire. Ces résultats nous permettent de comprendre qu'un mouvement ne peut être réalisé si les neurones transportant le message de la réalisation du mouvement sont détruits.

En effet bien qu'il n'y ait pas de modèle existant pour comparer notre modèle à

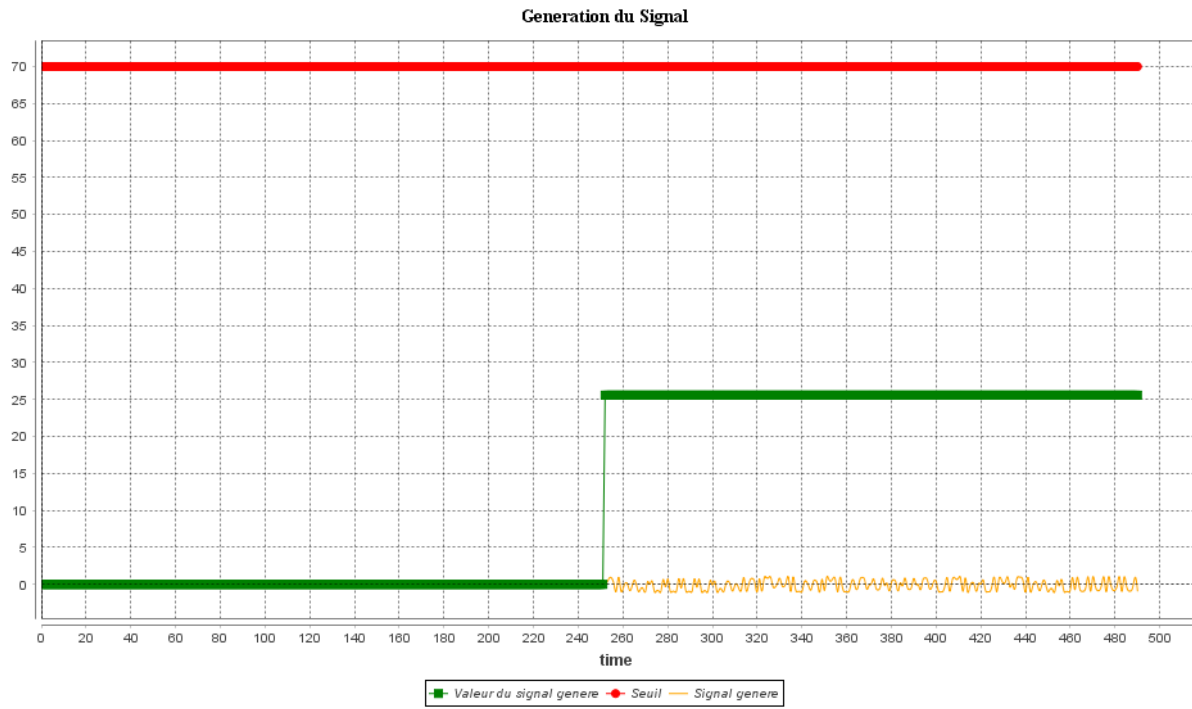


FIGURE 19 – *Résultat du scénario 2 après la simulation*

ce dernier afin d'évaluer nos résultats, nous nous sommes focalisés sur les propriétés du potentiel d'action pour valider notre modèle.

Ainsi après expérimentation, notre modèle répond aux deux propriétés sur les trois du potentiel d'action, ce qui nous permet de dire que notre modèle permet d'obtenir des résultats assez satisfaisants, bien qu'il ne réponde pas à toutes les propriétés.

Par ailleurs, notre travail présente des limites. En effet, dans notre travail, nous n'avons pas tenu compte de certains organes du cerveau comme le *lobe frontal* et le *lobe pariétal*, ce qui fait que notre modèle ne reflète pas tout à fait le mouvement volontaire dans la réalité, mais illustre quand même les grandes lignes de ce mécanisme notamment à travers les neurotransmetteurs, l'intégration du neurone moteur, le muscle antagoniste et le fuseau neuromusculaire du muscle sensoriel.

9 Conclusion

Dans ce travail, nous avons proposé une architecture du système à base d’agents pour le contrôle nerveux en interaction avec le corps humain via les muscles. Par la suite nous avons proposé une méthodologie pour simuler ce système dans les conditions physiologiques et physiopathologiques. Pour ce faire nous avons d’abord effectué un état de l’art qui nous a permis de mieux nous situer dans le sujet, et de connaître les méthodologies utilisées pour la modélisation et l’implémentations des problèmes similaires au nôtre.

Par la suite nous avons utilisé la plate-forme QGIS pour concevoir l’architecture de notre système, qui a constitué l’environnement de notre simulation.

Par ailleurs, à partir du modèle conçu, nous avons implémenté et simulé le modèle sur la plate-forme GAMA.

Les résultats issus des expérimentations sont assez satisfaisants. En effet, nous arrivons à générer un signal dans le cas d’un mouvement volontaire, et par ce résultat nous avons affirmé que le potentiel d’action obéit à la loi du tout ou rien, soit le signal a atteint le seuil pour la génération d’un mouvement soit non. En outre nous avons constaté à travers les résultats du scénario 2 qu’un accident vasculaire cérébral n’est rien d’autre que la destruction des neurones pyramidaux qui transporte le message de la réalisation du mouvement.

Par la suite nous nous sommes penché sur la littérature, plus précisément sur les propriétés du potentiel d’action pour valider notre modèle.

Par contre, notre travail présente des limites. En effet nous n’avons pas tenu compte de certains organes du cerveau dans notre simulation ce qui rend notre modèle moins réaliste.

En somme à l’issue de ce travail qui est un premier en son genre, nous pouvons dire que ce TPE a répondu largement à nos attentes. En effet, il nous a permis d’approfondir nos connaissances théoriques et pratiques sur la modélisation et simulation des systèmes complexes dans le domaine de la biologie humaine.

10 Perspectives

Comme perspectives à notre étude qui est une première en son genre, nous pouvons en citer entre autres :

- la prise en compte de certains organes du cerveau comme entre autre le *lobe frontal* et *lobe pariétal* ;
- l’intégration du bulbe rachidien dans la gestion du mouvement du muscle gauche ou droite ;

- la gestion de la plasticité cérébrale ;
- ce travail peut également être une base pour la modélisation du contrôle du centre nerveux avec le corps humain dans le cas d'un mouvement reflex.

11 Références

Références

- [1] Edouard Amouroux. *Kimono : une méthode de modélisation descriptive centrée agent pour l'explication des systèmes complexes, une application en épidémiologie*. PhD thesis, Paris 6, 2011.
- [2] Stefania Bandini, Sara Manzoni, and Carla Simone. Supporting the application of situated cellular agents in non-uniform spaces. *Future Generation Computer Systems*, 21(5) :627–631, 2005.
- [3] Tien Tuan Dao. Advanced computational workflow for the multi-scale modeling of the bone metabolic processes. *Medical & biological engineering & computing*, 55(6) :923–933, 2017.
- [4] Michel Delcey. Physiopathologie des déficiences motrices. http://www.moteurline.apf.asso.fr/IMG/pdf/physiopath_defmot_MD_111_130.pdf, 2010.
- [5] Sabine Dormann and Andreas Deutsch. Modeling of self-organized avascular tumor growth with a hybrid cellular automaton. *In silico biology*, 2(3) :393–406, 2002.
- [6] Draw.io. Draw.io. <https://www.draw.io/>, , consultée le 28 Janvier 2018.
- [7] Github. Github. <https://github.com/>, , consultée le 28 Janvier 2018.
- [8] Joachim Gruber. Models of immune systems : The use of differential equations. <http://lymenet.de/literatur/immundif.htm>, 2000.
- [9] Xinshan Li, AK Upadhyay, AJ Bullock, T Dicolandrea, J Xu, RL Binder, MK Robinson, DR Finlay, KJ Mills, CC Bascom, et al. Skin stem cell hypotheses and long term clone survival—explored using agent-based modelling. *Scientific reports*, 3, 2013.
- [10] Nicholas Metropolis and Stanislaw Ulam. The monte carlo method. *Journal of the American statistical association*, 44(247) :335–341, 1949.
- [11] Ph.D. Michael D. Mann. Properties of excitable membranes : The membrane potential. <http://michaeldmann.net/mann3a.html>, 2011, consultée le 31 Janvier 2018.
- [12] Mor Peleg, Daniel Rubin, and Russ B Altman. Using petri net tools to study properties and dynamics of biological systems. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 12(2) :181–199, 2005.

- [13] Cécilia Petit. A monte carlo approach to modeling tumor growth. In *Proc. APC*, volume 591, 2002.
- [14] QGIS. Système d'information géographique libre et open source. <https://qgis.org/en/site/>, , consultée le 28 Janvier 2018.
- [15] Alessandro Troisi, Vance Wong, and Mark A Ratner. An agent-based approach for modeling molecular self-organization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(2) :255–260, 2005.
- [16] Wikipedia. Sharelatex — wikipédia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/ShareLaTeX>, , consultée le 28 Janvier 2018.

Modèles	Avantages	Limites
Modèle Mathématique : Équation Différentielle [8]	<ul style="list-style-type: none"> — Formalisation du problème sous forme d'équation différentielle (ED) (ordinaire et partielle) ; — Possibilité de décrire l'évolution du système avec ED (par exemple un réseau de réaction de macro-molécules) ; — Établissement des règles pour exprimer un réseau de réaction complexe. 	<ul style="list-style-type: none"> — Permet pas la description d'un système ouvert ; — Explosion d'équation en fonction de la complexité du modèle ; — Manque d'abstraction des modèles ;
Modèle de Monte Carlos [10]	<ul style="list-style-type: none"> — Évaluation itérative d'un modèle déterministe en utilisant des ensembles de nombre aléatoire comme entrées ; — Détermine comment les variations aléatoires, le manque de connaissances ou une erreur affectent la sensibilité, la performance ou la fiabilité du système Modélisé ; 	<ul style="list-style-type: none"> — Manque de mécanisme avancé permettant la modélisation des comportements émerge tel que l'apprentissage et l'adaptation ;
Modèle de l'automate cellulaire [5]	<ul style="list-style-type: none"> — Modèle discret ; — Regroupement des cellules en grilles infinies et régulières ; — Chaque cellule à la même règle pour la mise à jour ; — Chaque fois que les règles s'appliquent à l'ensemble de la grille, une nouvelle génération est créée. 	<ul style="list-style-type: none"> — Manque de moyen pour la représentation des interactions entre les entités ;
Outils Petri Net pour la modélisation des systèmes biologiques [12]	<ul style="list-style-type: none"> — Utilise le principe de modélisation comportementale ; — Graphe bipartite dans lequel les nœuds sont des lieux ou des transitions ; — Les lieux représentent les conditions et les transitions représentent des activités ; 	<ul style="list-style-type: none"> — Ils ne sont adaptés pour les systèmes dynamiques continus ;

35
TABLE 1 – Résumé des travaux connexes non liés aux agents

Attributs	Descriptions
location	c'est l'attribut qui représente la position exacte de cet agent dans notre environnement.
PathToFollow	représente le chemin que doit suivre l'agent pour arriver à la terminaison axonique. Il s'agit à ce niveau du cordon spinal.
Signal	représente le message nerveux (sous forme de signal électrique) transporter par les neurones, du cortex moteur vers le motoneurone.
Vitesse	représente la vitesse à laquelle cet agent se déplace vers sa terminaison axonique.
refTermAxonique	représente la référence qui nous permet de tester si l'agent est arrivé à la terminaison axonique.

TABLE 2 – La description des attributs de l'agent *neuronsMU11*, *neuronSensor* et *neuronAntagonist*

États (activités)	Descriptions
initial	Dans cet état, l'agent transporte l'information (signal) de sa position initiale a sa terminaison axonique ou il va mourir pour donner naissance aux neurotransmetteurs.
Création de l'agent neurotransmetteur (creerNeurotransmitter)	Cet état s'enclenche lorsque l'agent atteint la terminaison axonique, une fois arrivé il meurt pour donner naissance à un autre agent : le neurotransmetteur avec la même valeur du signal.

TABLE 3 – Les états (activités) de l'agent *neuronsMU11*

Attributs	Descriptions
location	représente la position exacte de cet agent dans l'architecture.
refMotoNeurone	représente la position du neurone moteur. C'est à cette position que sera acheminer le signal que transportent les neurotransmetteurs pour intégration.
refTermAxonique	représente la référence (la position) exact de la terminaison axonique du moto neurone. C'est à cette position que les agents sont se séparer pour se diriger vers le muscle.
refFibreNerveuse1 et refFibreNerveuse2	Ce sont les attributs qui permettent de faire référence aux différentes fibres nerveuses qui seront innervées.
signalTransmitter	représente le signal que cet agent hérite à sa création, qu'il achemine au niveau du neurone moteur pour intégration.
newSignal	représente le nouveau signal généré après intégration au niveau du neurone moteur.

TABLE 4 – *La description des attributs de l'agent neuroTransmitter*

États (activités)	Descriptions
initial	Dans cet état, l'agent transporte l'information (signal) de la terminaison axonique des agents (MU11, Sensor et Antagonist) vers le motoneurone pour intégration.
Déplacement vers la terminaison axonique du neurone moteur (gotoTerminaison)	Cet état s'enclenche une fois que le nouveau signal généré dépasse le seuil de 70. Il permet aux agents de se déplacer du neurone moteur vers sa la terminaison axonique de ce dernier où ils vont se séparer pour se diriger vers le muscle.
Déplacement vers le muscle (gotoMuscle)	Avec cet état les neurotransmetteurs vont pouvoir se déplacer de la terminaison axonique (position précédente) du neurone moteur vers le muscle.
Activation des fibres musculaires	Cet état permet de stimuler les fibres musculaires afin de provoquer le mouvement.

TABLE 5 – *Les états (activités) de l'agent neuronTransmitter*

Activités (reflex)	Descriptions
Intégration	Cette activité consiste à effectuer la sommation de tous les signaux qui sont acheminés à son niveau. Pour ce faire les valeurs des signaux sont stockées dans un tableau. Une fois que tous les agents acheminent leurs signaux une sommation est effectuée. Par la suite une moyenne est calculée sur la sommation en fonction du nombre d'agents et du nombre du neurone antagoniste, vu que les valeurs des signaux de ces derniers sont négatives parce qu'ils s'opposent au mouvement.

TABLE 6 – *Les activités (comportement) de l'agent neurone moteur*

Paramètres	Valeurs
MU11Signal	$60 + \text{rnd}(30)$
MU11Vitesse	17
SensorSignal	$60 + \text{rnd}(30)$
SensorVitesse	17
AntagonistSignal	$-60 - \text{rnd}(30)$
AntagonistVitesse	27

TABLE 7 – *Les paramètres d'entrée de la simulation*