

Mémoire de Thèse

Visualisation et Interactions avec une colonie d'abeilles virtuelle :

Simulation, pédagogie et complexité.

Thomas Alves

Dirigé par Thierry Duval et Vincent Rodin
Encadré par Jérémy Rivière



Contents

1	Introduction	3
2	État de l'Art: Insectes Sociaux et Simulation Multi-Agents	4
2.1	Complexité et Colonie d'abeilles, Biologie et Système complexe	4
2.1.1	Complexité	4
2.1.2	Auto-Organisation de la Colonie	4
2.1.3	Pheromones et Physiologie	6
2.2	Modèles existants de répartition des tâches	8
2.2.1	Foraging For Work	8
2.2.2	Modèles à Seuils	8
2.2.3	BDI ?	8
3	Proposition : Prise de Décision et Interruption	9
3.1	Modélisation des tâches : Exécution du comportement	9
3.1.1	Actions, Activités et Tâches	9
3.1.2	Subsorption Hiérarchique et Exécution	9
3.2	Sélection : Modèle à Seuil	11
3.3	Interruption : Motivation	11
3.3.1	Etat de l'art rapide sur la Motivation	11
3.3.2	Action Démotivante et Tâche Motivée	11
3.4	Définir un Agent	12
3.4.1	Récapitulatif de notre proposition de modèle de prise de décision	12
3.4.2	Utilisation en Swarm Robotics	12
4	Modélisation et Implémentation pour la Colonie d'Abeilles	14
4.1	Description du modèle adapté	14
4.2	Description de l'implémentation	14
4.3	Calibration	14
4.3.1	Effets des Pheromones	14
4.3.2	Calibration rapide - Accélération	16
4.3.3	Calibration biologique - Données directes et indirectes	18

5	Evaluation de l'Implémentation de la Simulation de Colonie d'Abeilles	19
5.1	Hypothèses et Expérimentations	19
5.2	Resultats	19
5.3	Interprétation et Perspectives d'Améliorations	19
6	Etat de l'art: Simulation Multi-Agents et Environnements Immersifs	20
6.1	SMA : Recréer et comprendre des systemes complexes existants par l'interaction	20
6.2	Manipuler et observer ces systèmes complexes	20
6.3	DataViz	20
6.4	Interaction / visu immersive pour comprendre	20
6.5	Interaction tangible	20
7	Proposition visu interaction	22
7.1	Interaction Immersive avec Manettes	22
7.2	Interaction Immersice ET tangible	22
7.3	Visualisation : Graph3D sur l'état interne de la colonie	22
7.4	Résultats/Évaluation Visualisation Interactive proposée . . .	22
8	Conclusions	23
8.1	Discussions	23
8.2	Perspectives	23
8.3	Conclusion	23

Chapter 1

Introduction

Orga Abeille - Visu Interagir avec - Simuler - Modeliser - (pk existant pas bon)proposition Modele motivation (orga++) - Eval Ccl (motivation mieux)
- Enfin intéragir et visu

- Colonie d'abeille en tant que système complexe. Beaucoup de recherche sur les butineuses mais moins sur l'intérieur de la ruche.
- Multi agent car concentration sur les individus et leurs interactions
- Comprendre l'auto organisation interne par la modélisation SMA vs Équation différentielles - de l'importance des contacts individuels.
- Transmettre et faciliter l'apprentissage avec l'environnement immersif.

Chapter 2

État de l'Art: Insectes Sociaux et Simulation Multi-Agents

2.1 Complexité et Colonie d'abeilles, Biologie et Système complexe

Synthèse des connaissances, notamment de notre visite à Avignon et ses 43 degrés à l'ombre.

2.1.1 Complexité

2.1.2 Auto-Organisation de la Colonie

Afin d'assurer le bon fonctionnement et l'épanouissement de la colonie, chaque individu la composant doit effectuer un certain nombre de tâche lorsqu'elle sont nécessaire. Contrairement à nous, ces individus ne disposent d'aucun contrôle central. Personne pour surveiller la température et prévenir une équipe que pendant un certain temps ils seraient en charge de la réguler. Pas de chef pour donner des ordres.

Ainsi, c'est chaque individu qui doit en quelques sortes, tout surveiller, et être prêt à adapter son activité en fonction de ses perceptions. Pour reprendre l'exemple de la température, lorsqu'un individu décide qu'il fait un peu trop chaud, il va alors commencer à refroidir ses alentours. Dans le cas des abeilles ce rafraichissement peut être réalisé soit en allant battre des ailes à l'entrée de la colonie afin de créer un courant d'air, soit en vaporisant de l'eau à l'intérieur, pour directement abaisser la température.

Différentes Régulations

- Thermo-Régulation basées sur la perception locale de température et sur les différences entre individus.
- Sélection des meilleurs sources de nourritures par les butineuses lors du recrutement.
- Régulation de l'âge du premier butinage en fonction des demandes du couvain.

Un des points clés de cette organisation est que chaque individu a des "tolérances" légèrement différentes. Une diversité qui provient notamment du fait que même si les abeilles ont en général toutes la même mère, elles n'ont pas toute le même père, on parle de "demie sœur". En effet, lors de son unique vol nuptial, la future reine s'accouple avec des dizaines de mâles (qui meurent et tombent au sol juste après). Cette grande diversité génétique et les seuils de tolérances différents apportent une plus grande stabilité, tant dans les activités des abeilles que dans les paramètres contrôlés. Il a en effet été montré que l'exceptionnelle capacité des abeilles à maintenir la température à 36°C au niveau du couvain¹ est en partie due au fait que certaines abeilles vont commencer à refroidir la ruche assez tôt, alors que d'autres ne le feront que lorsque la température est déjà trop élevée. À l'extrême, certaines abeilles refroidissent la ruche en même temps que d'autres plus frileuses la réchauffent. Cet affrontement qui peut paraître contre-productif permet en réalité à la température d'être extrêmement stable, malgré les variations parfois conséquentes de la température extérieure.

Sélection des meilleures sources de nectar

Lors de la collecte du nectar, les butineuses sont très sélectives et préfèrent de très loin les hautes teneurs en sucres. La colonie utilise donc un système de recrutement, presque de recommandation, afin d'allouer ses effectifs de butineuses de manière optimale et dynamique, préférant les sources proches et sucrées aux sources éloignées et peu sucrées.

Ce mécanisme de recrutement se compose de trois étapes. Certaines butineuses plus téméraires, vont spontanément quitter la ruche sans destination, dans le seul but de trouver une nouvelle source de nectar. Ces butineuses sont appelées des "scouts", ou des "éclaireurs". Une fois sur une source de nectar, il est temps d'en juger la qualité, c'est la deuxième étape. L'abeille va récolter le nectar, et estimer sa teneur en sucre. Si cette teneur lui convient, elle va rentrer à la colonie et commencer la troisième étape, le point clé, le recrutement.

¹très sensible, une variation d'un degré peut condamner le couvain et mettre la colonie en péril

Une fois rentrée, l'abeille recruteuse va se mettre à danser la désormais célèbre "Waggle Dance", en forme de 8. Cette danse à un objectif double. Le premier : communiquer la position de la source par rapport au soleil, pour permettre aux autres de la retrouver. Le second est plus indirect : Plus la source est sucrée, plus l'abeille va danser longtemps, et même répéter la danse dans plusieurs endroits de la ruche. Une danse plus longue offre plus de temps à d'autres abeilles de venir la suivre et apprendre la position de cette nouvelle source. Ainsi, plus la source est sucrée, plus la recruteuse va communiquer la position à de nombreuses butineuses.

Une fois recrutée, les nouvelles butineuses vont se rendre à la source et répéter le processus : Collecter, juger, rentrer et recruter. Là encore, la diversité est clé, des abeilles moins portées communication vont passer moins de temps à recruter, afin de maximiser le temps de butinage, il y a des dizaines de milliers de bouches à nourrir tout de même ! De plus, certaines butineuses sont moins difficiles que d'autres, elles vont donc communiquer des sources de faibles qualités et y maintenir un faible contingent. Ce contingent alors moins utile dans l'immédiat sert de surveillance, car les teneurs en sucres des différents nectars peuvent fortement varier selon les saisons mais aussi pendant les périodes de la journée. Une source de faible qualité peut alors devenir une source extrêmement intéressante en quelques heures. Le groupe alors déjà présent peut observer ce changement et déjà danser dans toutes les colonies pour avertir les autres, gagnant ainsi un temps précieux de re-découverte de la source mais aussi le temps d'amorcer une réponse conséquente. Gagner du temps sur une réaction exponentielle est toujours extrêmement précieux.

2.1.3 Pheromones et Physiologie

Afin d'obtenir cette auto-organisation, la colonie s'appuie sur différents mécanismes incluant de nombreuses boucles de rétro-actions. Des perceptions directes des différents individus permettent d'effectuer une partie de cette organisation, comme la température ou la concentration en sucre de leur nourriture. Mais la colonie s'appuie aussi sur des mécanismes indirects, physiologiques, qui prennent place grâce à différentes hormones et phéromones. Nous étudions ici en détail l'importance physiologique des glandes hypopharyngiennes (GH) et de la *Corpora Allata*. Voici un modèle simplifié des connaissances biologiques que nous avons à l'heure actuelle.

Les GH permettent aux abeilles s'occupant du couvain de transformer le pollen et le nectar en une substance riche destinée aux larves. Elles permettent aussi aux butineuses de traiter chimiquement le nectar, le rendant utilisable pour les nourrices, transformable en miel et même consommable directement par les autres adultes. Or, ces deux comportements sont incompatibles, les GH subissent une modification physiologique pour effectuer l'une ou l'autre de ces fonctions.

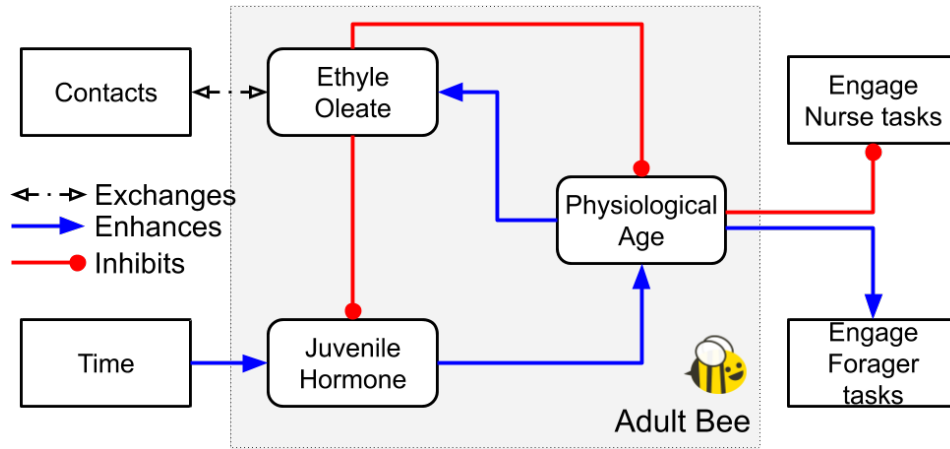


Figure 2.1: Modélisation simplifiée des effets physiologiques responsables de l'auto-organisation.

La Corpora Allata permet aux adultes de sécréter une hormone appelée Hormone Juvénile(HJ). Cette hormone est retrouvée en grande quantité chez les butineuses, et en faible quantité chez les nourrices. Une hypothèse répandue est de considérer que la HJ sécrétée par la Corpora Allata permet d'altérer le fonctionnement des GH, dictant ainsi leur utilité pour les nourrices ou les butineuse. Typiquement, la transition de nourrice à butineuse se fait en une vingtaine de jours : La colonie suit ce qu'on appelle le Polyéthisme d'Âge, les adultes ayant le même âge réalisent les mêmes activités. Or, il a été montré que ce polyéthisme est souple, et que dans les bonnes conditions, une abeille peut aller butiner dès ses 5 jours, au lieu de la vingtaine habituelle.

C'est probablement l'œuvre d'une phéromone, émise par toute la colonie, l'Ethyle Oléate (EO). Émise majoritairement par le couvain, elle est aussi émise en grande quantité par la reine, et en quantité réduite par les butineuses. Cette phéromone altère le fonctionnement de la Corpora Allata, et réduit la sécrétion de HJ des abeilles. Ainsi, les adultes tendent toutes à aller butiner rapidement, mais sont retenues "nourrices" par cette EO émise par le couvain et les butineuses. Cette rétroaction permet de réguler le nombre de nourrice et de butineuses au sein de la colonie : Lorsqu'il y a beaucoup de couvain, très peu d'adultes vont partir butiner, et certaines butineuses peuvent même redevenir des nourrices. Lorsque les butineuses meurent de vieillesse, elles freinent moins le développement des nourrices, et certaines pourront partir butiner. Ces différentes interactions ont été synthétisées Figure 2.1.

L'Ethyle Oléate n'est pas une phéromone volatile, elle est majoritairement transmise par contact, principalement lors d'échange de nourriture et de nettoyage mutuel : lorsqu'une abeille en nettoie une autre, ou lorsqu'une

nourrice nettoie une larve. Elle serait aussi transmissible sur de courtes distances par évaporation, mais nous avons décidé d'ignorer cet mécanisme pour l'instant.

Dans le cas classique du polyéthisme d'âge, les jeunes abeilles sont nourrices, et les plus âgées sont butineuses. Mais, comme nous venons de le voir, cet âge est souple : Une nourrice peut accélérer son vieillissement, et une butineuse peut même l'inverser. C'est pour ceci que nous parlerons ici d'âge physiologique, opposé à l'âge réel. Une abeille avec un faible âge physiologique possède les GH nécessaires aux nourrices, et les âgées physiologiques possèdent les GH et les muscles nécessaires au vol et au butinage.

Mécanismes de l'auto organisation Rôles et fonctions physiologiques associées.

Différents rôles de différentes phéromones.

Modélisation estimée hypothèse :

Cas classique de la vie d'une abeille.

Quels changements provoquent quelles réactions dans le métabolisme de l'abeille, et donc dans la répartition du travail.

2.2 Modèles existants de répartition des tâches

Etat de l'art de l'article PAAMS

2.2.1 Foraging For Work

2.2.2 Modèles à Seuils

2.2.3 BDI ?

Conclusion

Chapter 3

Proposition : Prise de Décision et Interruption

Description du modèle d'interruption PAAMS

3.1 Modélisation des tâches : Exécution du comportement

3.1.1 Actions, Activités et Tâches

Afin de modéliser nos tâches, nous allons utiliser 3 concepts, actions, activités et tâches. Une action est définie comme une interaction avec l'environnement extérieur, d'une durée déterminée et courte (pas plus de quelques pas de temps). Elle n'est donc pas forcément élémentaire, mais doit s'en approcher. Chaque action possède une condition d'activation.

Ensuite, une activité est une ensemble d'actions et/ou d'autres activités. Une activité possède aussi sa propre condition d'activation. Indirectement, tout ce qu'elle contient partage alors sa condition d'activation, ce qui nous permet de factoriser cette condition et d'alléger notre écriture, tout en permettant des comportements complexes.

Pour finir, une tâche est l'ensemble des activités et actions qui concernent un comportement. On peut donc voir une tâche comme l'activité racine, un peu à la manière d'un système de fichier: les activités sont des dossiers et contiennent d'autre dossier, ou des fichiers que sont les actions.

3.1.2 Subsumption Hiérarchique et Exécution

Une architecture de subsumption permet de hiérarchiser différents comportement entre eux, afin d'obtenir un comportement complexe. Dans un ordre défini, la subsumption interroge tour à tour la condition d'activation de ses différents blocs comportement, et exécute le premier dont la condition est

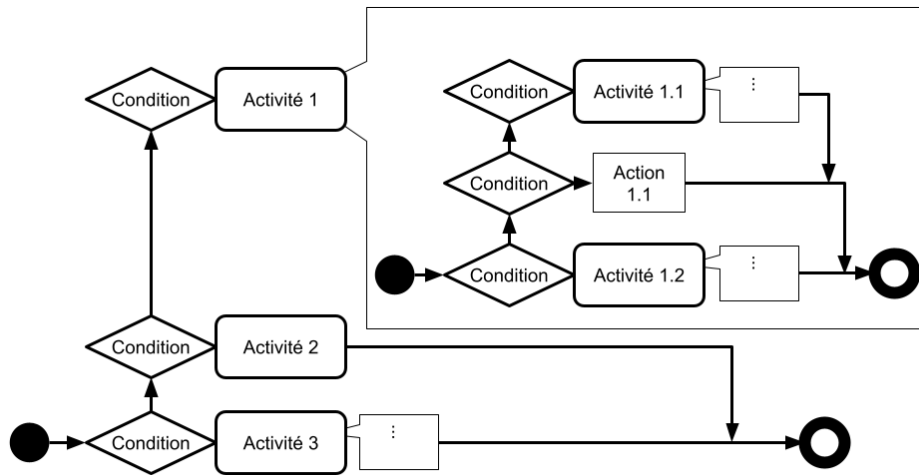


Figure 3.1: Modélisation d'une tâche.

valide. Par exemple, modéliser le comportement d'un mouton peut se faire en deux blocs. Un premier bloc "Brouter", toujours valide. Au dessus de celui ci, donc avec une priorité plus importante, un autre bloc "Fuir", qui s'active dès que le mouton a perçu un prédateur dans un temps déterminé. Ainsi, tant qu'aucun grand méchant loup n'est en vue, le mouton va brouter paisiblement. Dès qu'il en verra un, alors il pourra fuir.

Afin de respecter l'aspect quasi-élémentaire des actions, l'action de "Fuir" sera réaliser une multitude de fois. Ainsi, une seule exécution de Fuir ne fera faire au mouton qu'un pas, il va y faire appel plusieurs fois avant de considérer avoir semé le loup.

Une subsomption hiérarchique ajoute à cette structure simple, le fait que chaque bloc comportement puisse être une autre architecture de subsomption. Cette légère modification apporte une grande modularité dans la conception de ces architectures, et permet de modéliser des comportements plus complexes sans la lourdeur des subsomption classiques.

Ce que j'ai donc appelé "bloc comportement" des subsomptions correspond à nos actions et activités. Les blocs qui contiennent une autre subsomption sont appelés activités, et ceux qui contiennent du comportement sont des actions. Ensuite, la subsomption en elle même est alors une tâche, vous trouverez Figure 3.1 une représentation graphique de subsomption hiérarchique contenant nos concepts définis plus tôt.

Ainsi, pour qu'un agent puisse exécuter une tâche, il interroge l'activité racine puis va récursivement interroger ses composants. Chaque activité ou action interrogée va ainsi vérifier sa condition d'activation. Une activité dont

l'activation est valide va alors continuer d'interroger ses composantes. On a donc une recherche en profondeur, qui s'arrête dès qu'une action interrogée voit sa condition d'activation validée. Cette action est alors remontée à l'agent, qui pourra alors l'exécuter pendant toute sa durée. Ensuite, une fois l'action terminée, tout ce processus recommence afin de pouvoir récupérer une nouvelle action à exécuter.

Pour reprendre l'exemple du mouton, nous pouvons complexifier son comportement, en transformant son action "Fuir", en une activité "Fuir" contenant deux actions. L'action prioritaire "Esquiver" a pour condition le fait de voir le loup droit devant, et consiste à fuir mais en tournant, afin d'éviter le loup. Ensuite, la deuxième action, "Pleine Puissance" est l'action par défaut, sans condition, qui consiste à courir tout droit tant que le loup n'a pas été vu depuis un certain temps.

La condition d'activation de l'activité "Fuir" définie plus tôt, le fait d'avoir vu un prédateur dans les dernières secondes/minutes, est alors nécessaire à l'activation des deux actions "Esquiver" et "Pleine Puissance" sans que nous ayons à les réécrire explicitement.

3.2 Sélection : Modèle à Seuil

Agent toujours à jours des stimuli internes / externes
Executer la bonne tâche pour la bonne durée

évaluation systématique
Un seuil pour chaque tâche
Comparer les scores
Quand sélectionner une tâche

3.3 Interruption : Motivation

3.3.1 Etat de l'art rapide sur la Motivation

Les deux types de motivation qu'on a pu croiser dans la littérature. La motivation comme stimulus source de l'action (Drogoul), et la motivation comme perception interne (Flow), guide de l'action. On utilise les deux pour deux cas différents.

3.3.2 Action Démotivante et Tâche Motivée

On se base sur l'idée du Flow. Nos agents vont essayer d'estimer leur apport à la société dans leur tâche actuelle. Ainsi, lorsqu'un agent verra qu'il n'arrive pas à réaliser sa tâche, il sera dans l'état de malaise décrit pas le

Flow et cherchera de plus en plus à changer de tâche. Nous cherchons alors à mesurer l'efficacité de chaque agent dans sa tâche, afin de pouvoir détecter lorsqu'il arrive à la réaliser, mais surtout lorsqu'il n'y arrive pas. Il suffit alors de déterminer dans le comportement de l'agent, quelles sont les actions réalisées lorsque celui-ci n'arrive pas à réussir sa tâche. Par exemple, un robot ayant pour tâche de récolter des ressources aura dans cet algorithme une séquence de déplacement aléatoire lorsqu'aucune ressource n'est en vue. Répéter en boucle ce déplacement aléatoire, cette action, est un signe que ce robot n'arrive pas à correctement réaliser sa tâche, il devrait donc essayer de faire autre chose.

Nous venons alors ajouter aux Actions définies plus tôt le fait de pouvoir être "Démotivante". Lors de l'exécution d'une action "Démotivante", un agent va baisser sa motivation interne d'un montant défini. Le but est d'augmenter les chances qu'il abandonne cette tâche au profit d'une autre, lors du processus de sélection que nous allons détailler plus tard. L'action de déplacement aléatoire du robot que nous venons de citer est un bon exemple d'Action démotivante. Nous pouvons alors augmenter notre concept de tâche, en disant qu'une tâche est "motivée" lorsqu'elle contient au moins une action démotivante.

3.4 Définir un Agent

Définition d'un agent

Conclusion

3.4.1 Récapitulatif de notre proposition de modèle de prise de décision

Récapitulatif, exemple et conclusion sur le modèle en entier. L'exemple avancé dans l'article PAAMS pourrait être poussé un peu grâce au travail du stagiaire et à des nouveaux trucs que j'ai compris pendant la paramétrisation complexe du bousin.

3.4.2 Utilisation en Swarm Robotics

Les systèmes multi-agents sont souvent utilisés dans la mise en place d'essaims de robots, "Swarm Robotics". Ces essaims consistent en une grande quantité (dizaines) de robots simples, amenés à exécuter des tâches complexes. A l'image de la capacité de fourragement des fourmis est souvent utilisée comme cas d'application, nous avons donc construit notre exemple dans ce contexte. Un ensemble de robots va devoir ramener des ressources à leur base commune. Les ressources sont éparpillées dans l'environnement et doivent être traitées par un robot avant d'être déplacées jusqu'à la base. En plus de

cette activité de collecte, les robots vont devoir assurer une surveillance de la base, en patrouillant autour.

Chapter 4

Modélisation et Implémentation pour la Colonie d’Abeilles

4.1 Description du modèle adapté

Application du modèle théorique à notre simulation de colonie d’abeilles virtuelle. Simplification gigantesque de la biologie de l’abeille, ainsi que des différentes tâches au sein de la colonie. On veut de la répartition des tâches dans le plus simple des contextes.

4.2 Description de l’implémentation

L’implémentation du modèle de prise de décision décrits dans la partie d’avant, et modèle biologique de l’abeille adulte avec le système à seuil.

4.3 Calibration

4.3.1 Effets des Phéromones

La répartition des tâches au sein de la colonie, en particulier le nourrissage et le butinage, dépendent majoritairement de mécanisme d’hormone et de phéromone. Comme nous l’avons vu plus tôt, nous nous intéressons ici au bras de fer entre l’Hormone Juvénile (HJ) et l’Ethyle Oléate (EO), comme décrit Figure 2.1.

Paramétrer cette dynamique a été un processus complexe : Notre grande simplification du modèle, et surtout des différentes phéromones nous détache, pour cette partie, de la réalité biologique. Nous avons donc émis des hypothèses, fixé des paramètres arbitrairement, dans le but de retrouver d’autres ”macro-paramètres” émergents. Les deux points clés de cette paramétrisation

sont 1. La quantité relative d'EO émise par rapport à l'HJ, et 2. La force des effets de l'HJ et de l'EO. De plus, la paramétrisation s'articule autour de deux points d'équilibre : l'Equilibre en EO (EO_{Eq}), qui représente le moment où un agent a suffisamment d'EO pour parfaitement compenser son vieillissement, et donc son émission d'HJ. L'autre point d'équilibre, cette fois à l'HJ (HJ_{Eq}), représente le moment où un agent la bonne quantité d'HJ pour parfaitement compenser l'évaporation d'EO, et donc maintenir ce niveau.

Hypothèses et décisions arbitraires

Etant loin de la biologie, les quantités absolues des différentes substances n'étaient liées en rien à la réalité, nous avons donc pu choisir arbitrairement les quantités et points d'équilibres. Nous avons donc décidé de fixer la quantité d'HJ dans $[0; 1]$, et $HJ_{Eq} = 0.8$. De son côté, la quantité d'EO est simplement comprise dans $[0; \infty[$, et avec $EO_{Eq} = 1$.

Ainsi, un agent abeille adulte avec un taux d'HJ supérieur à HJ_{Eq} va émettre plus d'EO qu'il ne s'en évapore sur lui. Un agent avec un taux d'EO inférieur à EO_{Eq} va éliminer moins d'HJ qu'il n'en émet, et va donc vieillir.

Nous faisons ici l'hypothèse que la réduction d'HJ par l'EO se fait seulement avec une fonction prenant en compte la quantité d'EO. De même pour l'émission d'EO en fonction de la quantité d'HJ qui ne se fait que via une fonction fonction de la quantité d'HJ de l'agent concerné. Nous posons aussi que ces fonctions ont la forme x^n , avec n un paramètre fixé expérimentalement (on en parlera juste après) et x la différence entre le taux courant et la valeur d'équilibre donnée plus tôt.

Les deux effets énoncés précédemment sont imbriqués dans une boucle de rétroaction. Les quantités absolues de ces éléments ne sont donc pas pertinentes, en revanche, les écarts entre ces deux produits provoquent la dynamique que nous recherchons. Nous avons ainsi décidé, pour simplifier le paramétrage, d'en fixer l'un et de chercher le deuxième. Nous avons donc fixé l'émission d'EO en fonction de l'HJ à une fonction linéaire :

$$EO_{em} = (HJ - HJ_{Eq}) * EO_{Evap} \quad (4.1)$$

Avec EO_{Evap} la quantité d'EO qui s'évapore lorsque l'on considère une quantité d'EO égale à EO_{Eq} . Nous retrouvons donc la fonction sous la forme $s = x^n$ décrite plus tôt, avec $n = 1$ et x l'écart d'HJ à l'équilibre facteur de EO_{Evap} .

Effets et Émissions

Après avoir fixé ces paramètres, nous devons nous atteler à trouver la bonne combinaison d'intensité des effets des substances, ainsi que la quantité à laquelle on veut les émettre. Pour l'HJ, il suffit de prendre le point de transition, nous avons choisi 0.5, et de le diviser par la quantité de pas de temps minimum qu'il faut pour l'atteindre. Nous pouvons décider de la majorer légèrement afin de prendre en compte l'effet de l'EO, ralentissant très légèrement le vieillissement en faible quantité. Ce ralentissement est cependant très faible pour un agent isolé, ainsi nous n'avons pas gardé l'option de la majoration.

Ainsi, nous avons la quantité d'HJ émise par chaque agent à chaque pas de temps, que nous appellerons désormais HJ_{Incr} . L'EO présente sur chaque agent viendra éliminer une partie de son HJ, combattant ainsi indirectement cet HJ_{Incr} , dont nous pouvons désormais nous servir comme référence. Nous voulons qu'à EO_{Eq} , la réduction d'HJ HJ_{red} soit égale à HJ_{Incr} , pour compenser parfaitement le vieillissement de l'agent. Nous pouvons donc écrire :

$$HJ_{red} = (EO - EO_{Eq})^n * HJ_{Incr} \quad (4.2)$$

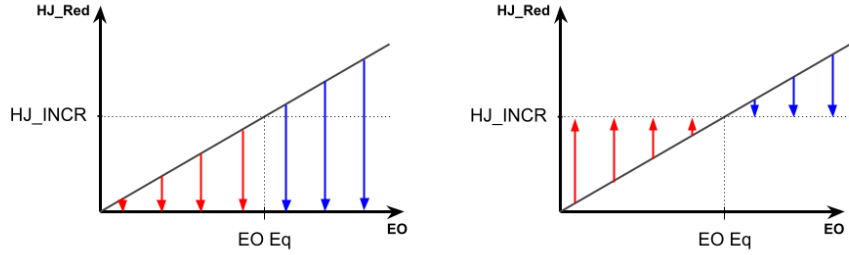
Avec n un coefficient dont nous allons nous servir pour modeler l'intensité de l'effet de réduction d'HJ. Avec $n = 1$ (Figure 4.1a), notre fonction est linéaire, nous nous servirons de cette fonction comme base de comparaison. Lorsque $n > 1$, on obtient une fonction quadratique (Figure 4.1c). L'effet rajeunissant de l'EO est diminué avant EO_{Eq} et amplifié après. Nous obtenons donc un vieillissement ainsi qu'un rajeunissement plus rapide. L'effet de l'EO est amplifié lorsque n augmente. Enfin, avec $n < 1$, on obtient une fonction racine (Figure 4.1c). De la même manière, avec une racine, l'intensité des effets de l'EO est réduite.

Pour illustrer, nous pouvons aussi imaginer que l'abeille vieillit naturellement rapidement. Mais, cet état d'équilibre est altéré par l'EO, nous pouvons donc visualiser ceci comme l'abeille étant attachée par un ressort à ce point d'équilibre. La rigidité de ce ressort peut alors être interprétée comme la puissance de l'EO, proportionnelle à n . Plus n est grand, plus l'abeille sera tirée vers ce point d'équilibre, qu'elle soit avant ou après.

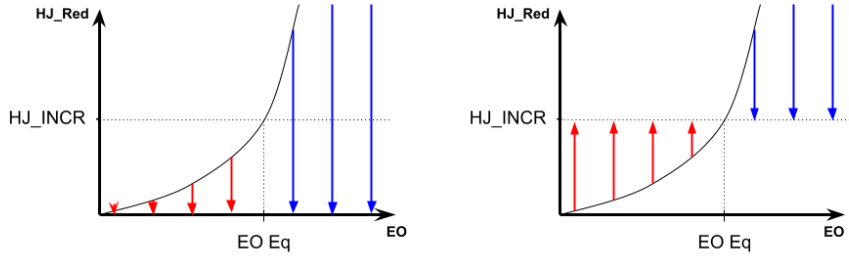
Nous n'avons pas trouvé de moyen de fixer mathématiquement n , il a donc été trouvé expérimentalement, nous y viendrons dans la partie suivante, concernant la calibration.

4.3.2 Calibration rapide - Accélération

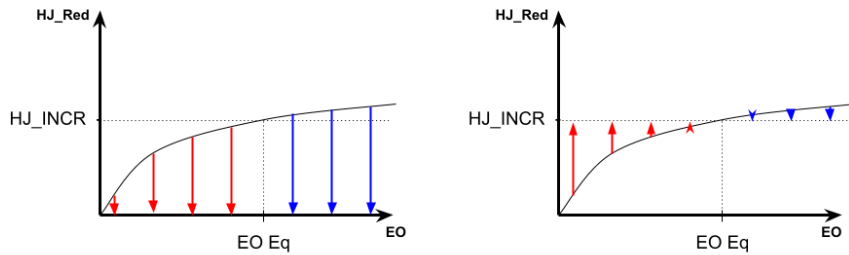
Dans sa version PAAMS avec la biologie accélérée Obtenir des résultats qualitatifs. Le but était de vérifier la répartition des tâches à l'aide du modèle, pas encore de chercher une validité biologique.



(a) Réduction d'HJ **linéaire** (exposant = 1) par l'abeille en fonction de la quantité d'EO qu'elle possède. Lorsque $EO = EO_{Eq}$, la réduction compense parfaitement le vieillissement naturel de l'agent : $HJ_{Red} = HJ_{Incr}$. A gauche les flèches indiquent la force de réduction de l'EO, à droite elles indiquent la vitesse de vieillissement (en rouge lorsque l'agent vieillit, en bleu lorsqu'il rajeunit).



(b) Lorsque la fonction de réduction est **quadratique** (exposant > 1) plutôt que linéaire (Fig 4.1a), on observe à gauche que l'EO a moins de puissance avant EO_{Eq} , et beaucoup plus après. A droite, on voit donc que le vieillissement ainsi que le rajeunissement (quand $EO > EO_{Eq}$) sont plus intenses.



(c) Lorsque la fonction de réduction est **une racine** (exposant < 1) plutôt que linéaire (Fig 4.1a), on observe à gauche que l'EO a plus de puissance avant EO_{Eq} , et beaucoup moins après. A droite, on voit donc que le vieillissement ($EO < EO_{Eq}$) ainsi que le rajeunissement ($EO > EO_{Eq}$) sont plus doux.

4.3.3 Calibration biologique - Données directes et indirectes

En ajustant les paramètres connus grâce à la biologie, comme les durées de vie ou la durée et fréquence des nourrissements par exemple. Paramétrisation des paramètres indirects, ou émergents, comme par exemple le fameux "UNE nourrice s'occupe de DEUX larves", qui n'est codé nul part mais qu'on doit retrouver.

Conclusion

Chapter 5

Evaluation de l'Implémentation de la Simulation de Colonie d'Abeilles

5.1 Hypothèses et Expérimentations

5.2 Resultats

5.3 Interprétation et Perspectives d'Améliorations

Conclusion

Chapter 6

Etat de l'art: Simulation Multi-Agents et Environnements Immersifs

6.1 SMA : Recréer et comprendre des systemes complexes existants par l'interaction

Comprendre les mécanismes, créer un modèle puis évaluer l'impact des différents paramètres sur l'évolution du comportement du système.

6.2 Manipuler et observer ces systèmes complexes

Systèmes en général non immersif, on s'arrête à la RA, et [de ce que j'ai vu], sans utilisation d'interacteurs tangibles. Comment mieux comprendre un système complexe : Environnement immersif et interacteurs tangibles. Ruche, cadre et connaissances apicoles.

6.3 DataViz

Comment visualiser de grande quantité de données, les données micro.

6.4 Interaction / visu immersive pour comprendre

Environnement immersif

6.5 Interaction tangible

Interacteurs tangibles

Conclusion

Chapter 7

Proposition visu interaction

Notre proposition

7.1 Interaction Immersive avec Manettes

Manipulation des cadres avec les manettes

7.2 Interaction Immersice ET tangible

L'apport et les contraintes du tangible (qu'il faut encore définir) pour la manipulation des cadres

7.3 Visualisation : Graph3D sur l'état interne de la colonie

Le graph3D et les information qu'il apporte

7.4 Résultats/Évaluation Visualisation Interactive proposée

Conclusion

Chapter 8

Conclusions

Comment l'ensemble se comporte et avis critique sur la totalité. Notamment le modèle multi agent simplifié qui apporte une quantité gigantesque de biais.

8.1 Discussions

8.2 Perspectives

Tout est possible, pousser le modèle de l'abeille de la simulation, pousser le domaine tangible avec peut être un cadre manette (un cadre avec un ou deux boutons?)

8.3 Conclusion

C'était cool

Rideau

clapclapclapclapclapclapclapclapclapclapclap