

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

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>État de l'Art: Insectes Sociaux et Simulation Multi-Agents</b>	<b>5</b>
2.1	Complexité et Colonie d'abeilles, Biologie et Système complexe	5
2.1.1	Complexité	5
2.1.2	Auto-Organisation de la Colonie	5
2.1.3	Pheromones et Physiologie	7
2.2	Modèles existants de répartition des tâches	8
2.2.1	Foraging For Work	9
2.2.2	Modèles à Seuils	9
2.2.3	BDI ?	9
<b>3</b>	<b>Proposition : Prise de Décision et Interruption</b>	<b>10</b>
3.1	Modélisation des tâches : Exécution du comportement	10
3.1.1	Actions, Activités et Tâches	10
3.1.2	Subsorption Hiérarchique et Exécution	10
3.2	Sélection : Modèle à Seuil	12
3.3	Interruption : Motivation	12
3.3.1	Etat de l'art rapide sur la Motivation	12
3.3.2	Action Démotivante et Tâche Motivée	12
3.4	Définir un Agent	14
<b>4</b>	<b>Modélisation et Implémentation pour la Colonie d'Abeilles</b>	<b>15</b>
4.1	Modélisation de la Colonie d'Abeilles	15
4.1.1	Modélisation de l'Abeille Adulte	15
4.1.2	Modélisation du Couvain	15
4.2	Description du modèle adapté	15
4.3	Description de l'implémentation	15
4.4	Calibration	16
4.4.1	Effets des Pheromones	16
4.4.2	Calibration Expérimentale	20

<b>5</b>	<b>Evaluation de l'Implémentation de la Simulation de Colonie d'Abeilles</b>	<b>21</b>
5.1	Hypothèses et Expérimentations . . . . .	21
5.2	Resultats . . . . .	21
5.3	Interprétation et Perspectives d'Améliorations . . . . .	21
<b>6</b>	<b>Etat de l'art: Simulation Multi-Agents et Environnements Immersifs</b>	<b>22</b>
6.1	SMA : Recréer et comprendre des systemes complexes existants par l'interaction . . . . .	22
6.2	Manipuler et observer ces systèmes complexes . . . . .	22
6.3	DataViz . . . . .	22
6.4	Interaction / visu immersive pour comprendre . . . . .	22
6.5	Interaction tangible . . . . .	22
<b>7</b>	<b>Proposition visu interaction</b>	<b>24</b>
7.1	Interaction Immersive avec Manettes . . . . .	24
7.2	Interaction Immersice ET tangible . . . . .	24
7.3	Visualisation : Graph3D sur l'état interne de la colonie . . . .	24
7.4	Résultats/Évaluation Visualisation Interactive proposée . . .	24
<b>8</b>	<b>Conclusions</b>	<b>25</b>
8.1	Discussions . . . . .	25
8.2	Perspectives . . . . .	25
8.3	Conclusion . . . . .	25

# List of Figures

3.1	Modélisation d'une tâche à l'aide d'une subsomption hiérarchique.	11
3.2	Sélection et exécution des tâches par chaque Agent, à chaque pas de temps. . . . .	13
4.1	Modélisation simplifiée des effets physiologiques responsables de l'auto-organisation. . . . .	16
4.2	Différents degré de fonctions pour ajuster l'intensité des effets de l'EO. . . . .	19

# 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 tous 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 couvain<sup>1</sup> 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.

---

<sup>1</sup>très 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.



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.

Ce mécanisme a été lié à une phéromone, émise par toute la colonie, l'Ethyle Oléate (EO). Retrouvée majoritairement sur le couvain et la reine, elle est aussi retrouvée chez les butineuses. Lorsque cette phéromone est injectée en grande quantité à des abeilles adultes, il a été montré que celles-ci arrêtent le butinage et voient leur taux d'HJ diminuer.

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 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 ce 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

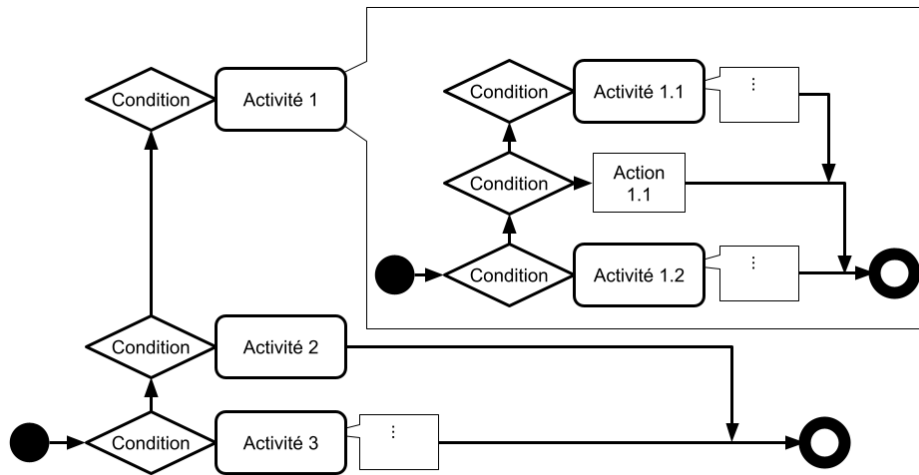


Figure 3.1: Modélisation d'une tâche à l'aide d'une subsomption hiérarchique.

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  
Exécuter 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

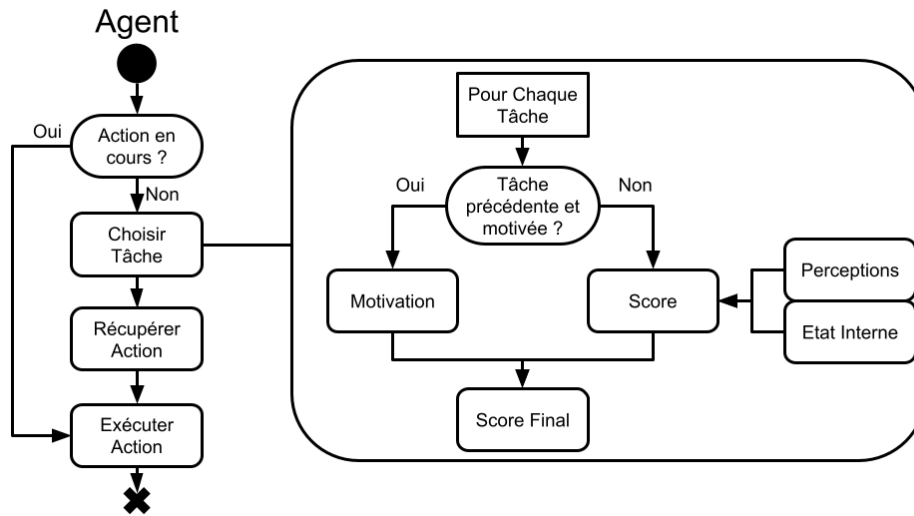


Figure 3.2: Sélection et exécution des tâches par chaque Agent, à chaque pas de temps. Si l'action en cours est terminée, l'agent va sélectionner une nouvelle tâche, en extraire l'action à réaliser puis l'exécuter.

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

À l'aide de ces définitions nous pouvons désormais décrire nos agents. Un agent est situé dans l'environnement, possède une série de senseurs internes et externes (comme la faim et l'odorat), et contient aussi une liste de tâche qu'il sera peut-être amené à réaliser au court de sa vie. Lors d'une sélection de tâche, l'agent pourra confronter ses perceptions courantes aux différents seuils et conditions de l'algorithme de sélection de tâche, afin de savoir quelles actions effectuer.

Parmi les perceptions internes de l'agent, nous trouvons une variable de motivation interne, servant aussi à la sélection de tâche. Associer une valeur de motivation à chaque tâche aurait aussi été possible et nous pouvons en trouver des équivalence dans d'autres travaux, nous avons donc décider de tenter l'expérience avec une valeur transversale à toute les taches, liée à l'agent lui même.

Un agent peut aussi présenter des variations individuelles, un léger *offset* que nous pouvons utiliser pour ajuster légèrement les seuils de ses différentes tâches, en plus des conditions internes et externes, afin de créer une population d'agent plus ou moins homogène. Via ses tâches, l'agent possède des seuils variables qui lui sont propres : deux agents avec les mêmes tâches présentent le plus souvent des seuils différents.

## Conclusion

### 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.

### 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 Modélisation de la Colonie d’Abeilles

#### 4.1.1 Modélisation de l’Abeille Adulte

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 4.1.

#### 4.1.2 Modélisation du Couvain

### 4.2 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.

### 4.3 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 systeme a seuil.



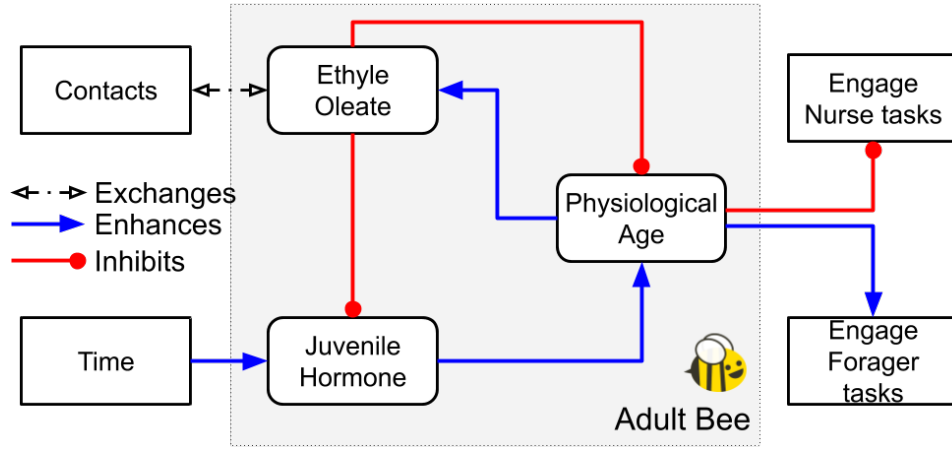


Figure 4.1: Modélisation simplifiée des effets physiologiques responsables de l'auto-organisation.

## 4.4 Calibration

### 4.4.1 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 4.1.

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 hypothèse, fixé des paramètre arbitrairement, dans le but de retrouver d'autres "macro-paramètres" émergents. Les deux points clé 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 absolue des différentes substances n'étaient lié en rien à la réalité, nous avons donc pu choisir arbitrairement les quantités et points d'équilibres. Nous avons donc décider 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  $EO_{Evap}$ .

### Intensités des effets

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 4.2a), notre fonction est linéaire, nous nous servons de cette fonction comme base de comparaison. Lorsque  $n > 1$ , on obtient une fonction quadratique (Figure 4.2c). 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 4.2c). 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 interprété 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.

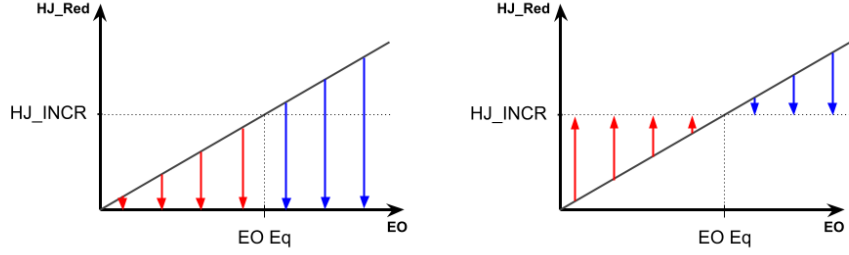
### Quantités Émises par les Larves

Un autre point clé de ce modèle est la capacité des larves à influencer directement la physiologie des adultes, en contraignant certains à rester nourrice. Il faut donc que ces larves en émettent la bonne quantité : Trop peu et il n'y aura pas assez de nourrices pour s'occuper du couvain, trop et il n'y aura plus assez de butineuse à la récolte de nourriture.

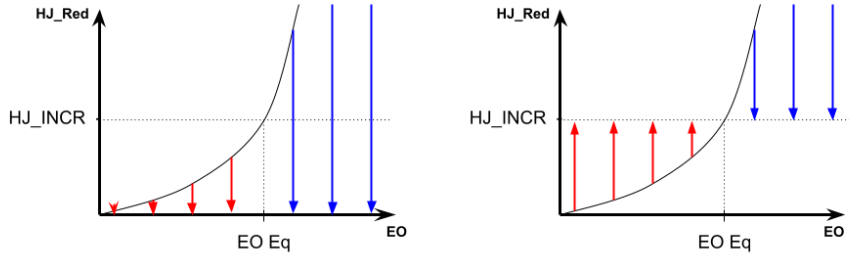
La quantité d'EO émise par chaque larve est donc importante, car elle est censée permettre à l'abeille de rester jeune, et même de rajeunir. Nous avons donc commencé par placer cette émission à  $EO_{Evap}$  (Voir eq. 4.1). De plus, les contacts étant assez bref, l'émission d'EO des larves doit permettre à une nourrice sollicitée de rester jeune malgré quelques temps de trajets. Ce dernier point porte une incertitude liée à l'émergence de ce comportement, la répartition des larves, les temps de trajets etc. Nous avons donc décidé de placer l'émission des larves à  $k * EO_{Evap}$ , avec  $k$  un coefficient que nous allons trouver expérimentalement, qui sera forcément supérieur à 1.

### Objectifs de calibration

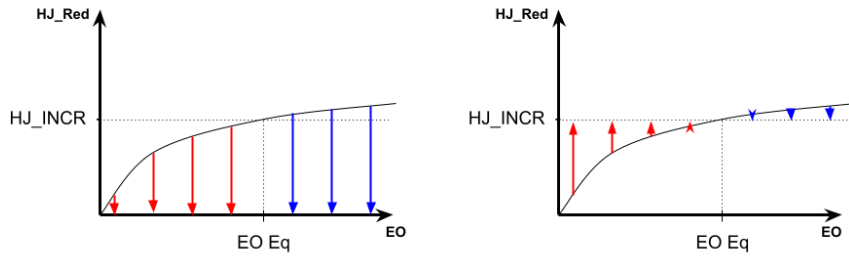
Nous saurons que le coefficient  $k$  de l'émission d'EO des larves est juste lorsque, peu importe la quantité de larves, la proportion de nourrice par



(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 rajeuni).



(b) Lorsque la fonction de réduction est **quadratique** (exposant > 1) plutôt que linéaire (Fig 4.2a), 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 4.2a), 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.

Figure 4.2: Différents degré de fonctions pour ajuster l'intensité des effets de l'EO.

rapport aux butineuses sera globalement constante. Avec une émission trop importante, augmenter le nombre de larve va drastiquement augmenter le ratio de nourrices. Par exemple lors d'un essai, nous obtenions un ratio de 1 butineuse pour 1 nourrice avec 500 larves, mais presque 100% de nourrice pour 1000 larves. A l'inverse, lorsque trop peu de nourrices sont captées par le couvain, ce coefficient doit être augmenté.

Ensuite, il arrive qu'il faille diminuer la quantité d'EO émise par les larves, alors qu'elle est déjà trop faible pour un petit nombre de larves (ou vice versa). C'est ici le signal que l'intensité des effets de l'EO sur les adultes est à ajuster, en variant l'exposant de l'équation donnant  $HJ_{Red}$  (Eq 4.2). Ainsi, lorsque 500 larves maintiennent un ratio nourrices/butineuses correct mais faible, mais que 1000 retiennent trop de nourrice, c'est que l'EO a trop d'effet, il faut alors abaisser l'exposant de  $HJ_{Red}$ .

Nous avons gardé un exposant entier lorsqu'il est supérieur à 1, et de la forme  $1/x$  (avec  $x$  entier) pour un exposant inférieur à 1.

Ce mécanisme par échange de phéromones est à la base de ce que nous cherchons à démontrer ici, et est profondément émergent, car dépendant des interactions entre tous nos agents, ce qui explique notre recours ici à un paramétrage expérimental.

#### 4.4.2 Calibration Expérimentale

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.

#### Calibration rapide - Accélération

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

## 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