



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE TOURS

64, Avenue Jean Portalis

37200 TOURS, FRANCE

Tél. (33)2-47-36-14-14

Fax (33)2-47-36-14-22

[www.polytech.univ-tours.fr](http://www.polytech.univ-tours.fr)

## Rapport

### Projet de Programmation et Génie Logiciel

# Simulation d'une colonie de fourmis

Auteur(s)

**Narvin Chana**

[\[narvin.chana@etu.univ-tours.fr\]](mailto:narvin.chana@etu.univ-tours.fr)

**Noé Pécault**

[\[noe.pecault@etu.univ-tours.fr\]](mailto:noe.pecault@etu.univ-tours.fr)

Encadrant(s)

**Nicolas Monmarché**

[\[nicolas.monmarche@univ-tours.fr\]](mailto:nicolas.monmarche@univ-tours.fr)

**Polytech Tours**  
**Département Informatique**

# Table des matières

---

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Conception et décisions</b>	<b>2</b>
1.1 Objectifs et contraintes	2
1.2 Moteur	4
1.2.1 Structure générale	4
1.2.2 Entités	5
1.2.3 World	6
1.2.4 Colliders	7
1.2.5 Fourmis	8
1.3 Application	12
1.3.1 Présentation de la structure	12
<b>2 Réalisation</b>	<b>15</b>
2.1 Choix des outils et technologies	15
2.1.1 Outils de collaboration	15
2.1.2 Langages et Langues	17
2.1.3 Librairie de Tests	17
2.1.4 Framework d’affichage	17
2.2 Moteur	18
2.2.1 Abstraction des Colliders	18
2.2.2 Transforms et Colliders	18
2.2.3 Temps de simulation ou temps réel ?	18
2.2.4 Optimisation	19
2.3 Application	22
2.3.1 Renderers	22
2.3.2 Fichier de propriétés	23
2.3.3 Pipeline de contenu	23
2.4 Tests	24
<b>3 Résultats et perspectives</b>	<b>25</b>
3.1 État des lieux	25
3.2 Apports	25
3.3 Évolutions possibles	25
3.3.1 Comportement des fourmis	25
3.3.2 Properties	26
3.3.3 Optimisation	26
3.3.4 Fonctionnalités liés au monde	26
<b>Conclusion</b>	<b>27</b>

**Annexes****28****A Liens utiles****29**

# Introduction

---

Le problème de la simulation et de l'optimisation d'une colonie de fourmis est un problème complexe qui met en oeuvre des connaissances dans les domaines de la théorie des graphes, la recherche opérationnelle et dans les systèmes décentralisés. Chaque fourmi agit par elle-même et l'ensemble des fourmis forme une intelligence à part entière qui n'a pas de cerveau centralisé.

Ses applications sont vastes et interviennent dans des domaines tels que les problèmes d'ordonnancements, de routage (ex : réseau Internet ou tournée de véhicules) ou encore le traitement d'image (ex : détection de bords).

Ce problème de simulation de colonie de fourmis nous intéresse depuis longtemps et c'est donc pour cela que dans le cadre du projet de programmation et génie logiciel nous avons choisi de proposer un sujet qui traite de celui-ci.

Notre objectif pour ce projet était de créer une application permettant de simuler les interactions qu'une colonie de fourmis peut avoir avec son environnement. Les fourmis doivent pouvoir explorer les alentours de leur colonie afin de trouver de la nourriture et de la ramener à sa colonie. Nous avons aussi imaginé d'autres fonctionnalités qui pourraient venir se greffer au projet si le temps nous le permettait comme des combats entre fourmilières et la possibilité de simuler plusieurs colonies.

En revanche, il n'était pas dans nos objectifs de simuler l'intérieur de la colonie et n'est pas voué à être sur le long terme (nous ne prenions donc pas en compte la durée de vie des fourmis).

Il nous était également très important de respecter les principes de génie logiciel qui nous ont été appris durant notre parcours à Polytech dans le but de développer une application robuste et facilement extensible.

Au sein de ce rapport, nous présenterons notre démarche pour arriver aux objectifs fixés, le déroulement du projet ainsi que les résultats et ce dont on en a tiré.

# Chapitre 1

## Conception et décisions

---

Ce chapitre traite des objectifs et contraintes du projet, de son architecture et des interactions entre les différents modules. Nous y détaillons aussi les différentes entités et structures qui appartiennent à la simulation ainsi que la structure de la partie applicative.

### 1.1 Objectifs et contraintes

#### Système décentralisé

Un système décentralisé<sup>1</sup> est un système composé de sous-composants qui accomplissent des objectifs individuellement afin de réussir un objectif global. Les entités qui composent le système doivent interagir entre elles non pas via une intelligence globale mais par des moyens de communication plus locaux.

Le problème de la simulation de colonie est une application typique de ce principe et se retrouve même dans la nature. Dans une vraie fourmilière, il n'y a aucune entité qui donne les ordres aux autres et donc chaque fourmi connaît sa mission pour faire prospérer la colonie.

Il est donc essentiel pour notre simulation de respecter cette architecture et chaque fourmi doit donc prendre ses décisions avec seulement les informations qui lui sont accessibles.

#### Simulation personnalisable

La simulation doit aussi être un outil facile à utiliser afin de tester des configurations initiales différentes. Il en va de même pour les constantes de simulation comme la portée de perception des fourmis, leur vitesse et toutes les autres.

Nous cherchons donc à avoir une interface graphique simple à utiliser qui permettra de placer les éléments de la simulation à la guise de l'utilisateur.

#### Séparation Moteur et Application

Une des contraintes clés du projet est la séparation de la partie **Moteur de simulation** et **Application**. Cela permet de réutiliser ce moteur pour d'autres applications comme par exemple pour générer des trajectoires des fourmis pour une animation.

Cela nous contraint donc à faire en sorte que le moteur n'ait absolument aucune dépendance envers la partie application.

---

1. Page wikipedia [https://en.wikipedia.org/wiki/Decentralised\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Decentralised_system)

## Abstraction des entités pour l'évolutivité

Nous avons intérêt à garantir une certaine évolutivité de la simulation car le comportement des fourmis que nous avons conceptualisé n'est pas forcément exact et nous devons nous permettre de facilement le changer.

Il est même aussi possible que nous souhaitions utiliser ce même moteur pour simuler des comportements autre que des fourmis ce qui force un certain niveau d'abstraction.

## Optimisation future

La simulation de colonie de fourmis est un problème très gourmand en termes de ressources de calcul car il est nécessaire de calculer les mouvements de chaque fourmi à une cadence assez élevée pour atteindre un taux de mise à jour par seconde proche suffisant pour que la simulation paraisse fluide (60 images par secondes).

Une piste d'optimisation dont nous avons eu conscience au moment de la conception est de paralléliser le calcul des fourmis tout en s'assurant de maintenir l'intégrité des résultats de la simulation (pas de problème de concurrence).

Nous cherchons donc une architecture nous ouvrant la possibilité d'implémenter facilement une telle technique d'optimisation sans avoir à refaire l'architecture de 0.

## 1.2 Moteur

### 1.2.1 Structure générale

Le moteur de simulation est donc là où les calculs de trajectoire et de décisions des fourmis seront effectués. Sa structure est simple et est très largement inspiré de ce qu'on peut trouver dans le domaine du jeu vidéo et cela n'est pas étonnant car notre simulation se rapporte beaucoup à un jeu vidéo.

Tout d'abord, les individus de notre simulation sont des **Entités**. Une entité est un objet associé à un **Transform** qui représente un état physique dans le monde (position, rotation, taille) et aussi d'un comportement qui lui est défini dans une méthode `Update()` sous la forme d'une suite d'instructions.

Cet objet Transform<sup>1</sup> est une inspiration directe du jeu vidéo et plus précisément du moteur de jeu Unity

On a l'objet qui sert de chef d'orchestre à la simulation qui est le **Monde**. Il possède les propriétés concernant l'environnement des fourmis et contient aussi la totalité des entités présentes dans la simulation. Lorsqu'il est mis à jour, le monde doit donc mettre à jour la totalité des entités qu'il contient pour que chaque entité puisse exécuter ses actions.

Nous appelons la mise à jour de ce monde et des entités qui le compose un **tick**.

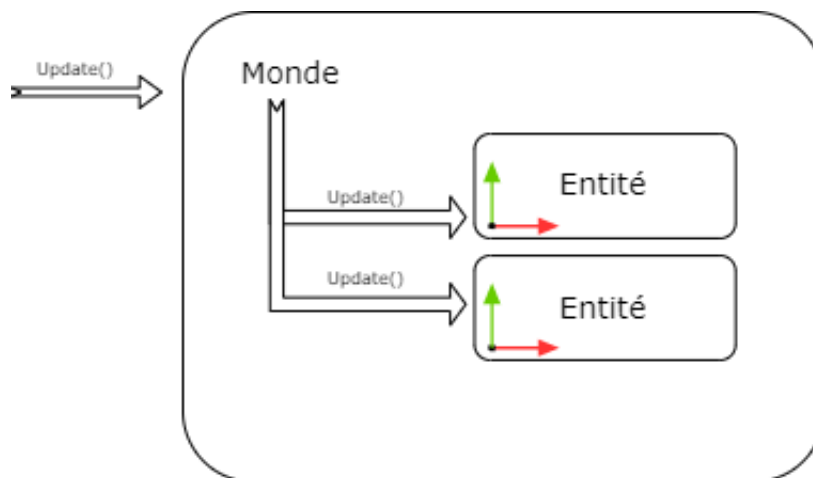


FIGURE 1.1 – Flux de mise à jour

Figure 1.1 montre le processus de mise à jour de la simulation qui commence par le monde et qui est distribuée à toutes les entités qu'il contient.

1. Page du manuel d'Unity sur l'objet Transform <https://docs.unity3d.com/Manual/class-Transform.html>

## 1.2.2 Entités

### Définition

Ce que nous appelons **Entité** est un objet possédant un état physique qui est composé d'une position, une rotation et une taille (**Transform**) ainsi que d'une logique interne que l'on appellera comportement.

Cette association de position, rotation et d'une taille est ce qu'on appelle un **Transform** et caractérise l'existence dans le monde de l'entité. La définition de cet objet nous est utile car elle nous permet de manipuler l'état de l'entité dans une même structure et d'appliquer des transformations linéaires simplement dans le cas où l'on voudrait faire un système de coordonnées relatif à une autre entité.

Les entités sont les briques essentielles à la simulation car elles représentent les objets de notre simulation.

### Spécialisations des entités

La classe **Entity** est donc la version la plus abstraite d'un de ces objets et chacune de ses spécialisations représentera une entité au comportement différent pouvant exister dans la simulation.

Les comportements ajoutés sont par exemple le système de vie, une machine à états ou même le comportement d'une fourmi. Le dernier composant présent dans chaque entité est le **Collider** qui est la boîte de collision d'une entité et peut se définir de différentes formes selon les besoins. Il est utile dans le calcul des mouvements car il permet de tester si une entité ne cherche pas à se déplacer dans un mur.

Figure 1.2 montre l'arborescence des entités avec ce que chacune apporte comme fonctionnalité.

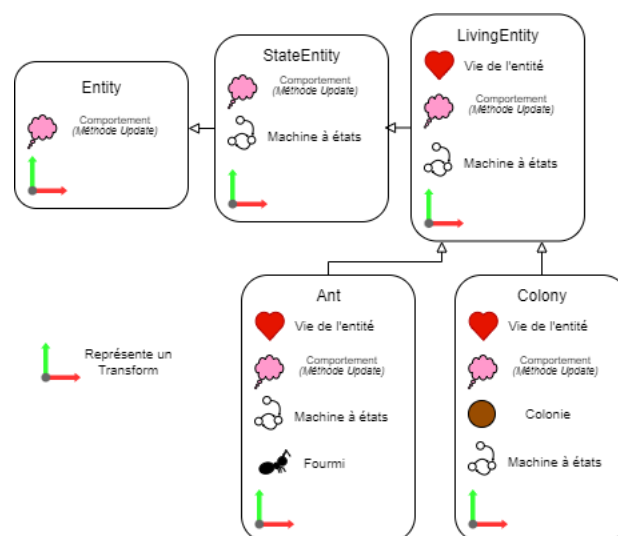


FIGURE 1.2 – Diagramme des spécialisations des entités avec leurs apports



## 1.2.3 World

### Définition

Le monde est l'espace dans lequel la simulation se déroule et possède donc les propriétés de taille de la simulation ainsi que le Collider gérant les murs de la simulation. C'est lui qui stocke toutes les entités présentes dans la simulation et s'occupe de les mettre à jour lorsqu'il est lui-même mis à jour. (voir [Figure 1.1](#))

Par souci d'optimisation, le monde est divisé en régions qui sont chacune une liste des entités présentes dans la région. Cela permet de ne pas avoir à chercher des éléments parmi la liste complète de toutes les entités du monde. Le monde est donc responsable du maintien de la cohérence de ces régions et met à jour toutes ces listes en fonction des positions des entités à chaque instant T.

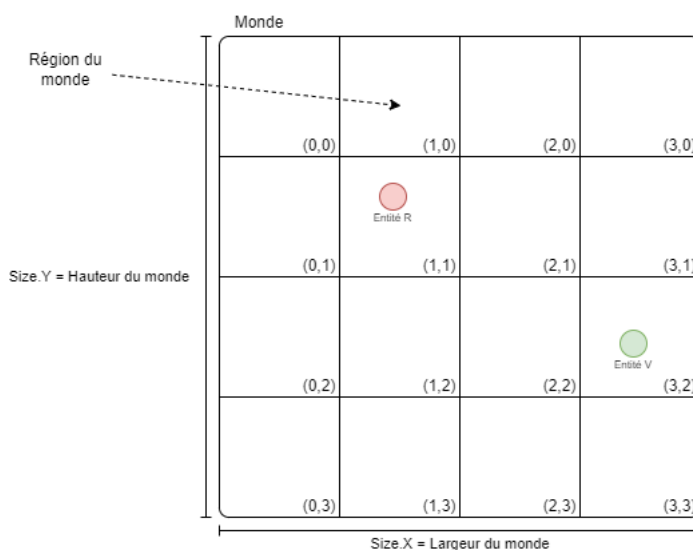


FIGURE 1.3 – Schéma d'un monde avec ses régions

Les murs de la simulation sont représentés par le WorldCollider qui est un second découpage (indépendant des régions) ayant pour but de stocker les cases traversables ou non par les autres entités. Cette représentation des murs sous forme d'une matrice de booléens nous permet d'avoir une structure analogue à une image ayant pour chaque pixel une valeur **Vrai** pour représenter un mur ou **Faux** pour représenter une case traversable.

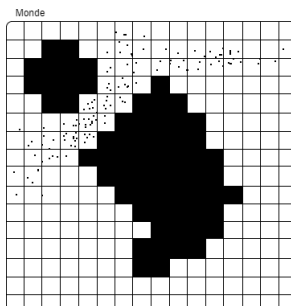


FIGURE 1.4 – Schéma d'un monde avec ses murs

## 1.2.4 Colliders

Pour notre simulation, nous avons prévu trois types de boîtes de collision différents. Ces types de collisions peuvent tous les trois être testés entre eux afin de savoir si oui ou non ils sont superposés (s'ils sont en collision).

### Cercle - Monde

Dans la collision entre un cercle et un monde, on procède en trois étapes :

- Créer un carré imaginaire dans lequel le cercle est inscrit.
- Récupérer le sous-ensemble des cases du WorldCollider que ce carré superpose.
- Tester si chaque case de ce sous-ensemble est superposée au cercle d'origine.

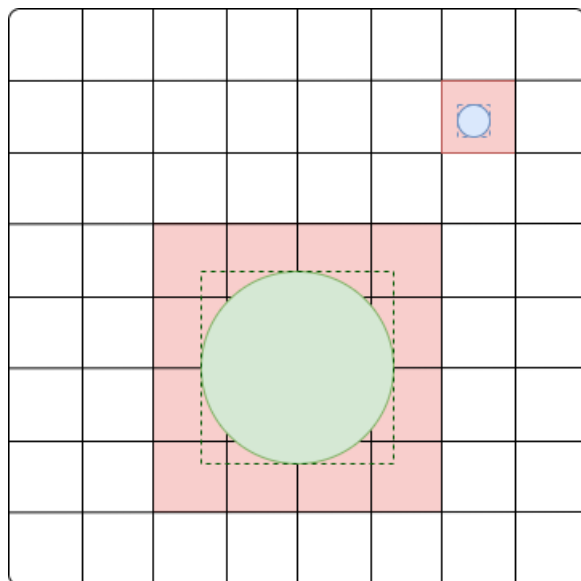


FIGURE 1.5 – Schéma de la collision d'un cercle et du monde

### 1.2.5 Fourmis

Dans cette partie nous allons détailler comment nous avons imaginé une représentation du comportement de la colonie, des fourmis et des phéromones.

#### Comportement d'une fourmi

L'objectif final de la fourmi est simple, elle veut trouver de la nourriture pour la ramener à sa colonie. Cependant, nous ne pouvons pas seulement faire marcher la fourmi au hasard dans la simulation en espérant qu'elle atteigne ce but.

Les fourmis sont indépendantes mais ont un objectif commun et doivent donc pouvoir communiquer entre elles pour parvenir à accomplir cet objectif. Dans la vraie vie, le principe d'une fourmi est très complexe et varie énormément entre les espèces mais nous pouvons le vulgariser très simplement.

Une fourmi va partir de sa colonie à la recherche de nourriture tout en déposant des phéromones pour indiquer le chemin vers sa colonie. Lorsqu'elle trouvera de la nourriture, elle la récupérera et suivra les phéromones laissés précédemment pour retrouver le chemin menant à sa colonie tout en laissant des phéromones menant à la nourriture qu'elle vient de trouver. Les phéromones servent certes à la fourmi mais servent aussi à ses congénères car, cela leur permet de eux-mêmes aller à la source de nourriture que la fourmi a trouvé. En d'autres termes, cela leur permet de **communiquer**. La fourmi doit donc être capable de sentir son environnement proche à la recherche de phéromones ou d'obstacles pour prendre des décisions et les exécuter.

Ce comportement est largement simplifié par rapport à la vraie vie car les fourmis ont un sens de l'orientation ou peuvent même communiquer visuellement (et sûrement beaucoup d'autres choses que nous ne savons pas) mais malgré cela, il est normalement suffisant pour atteindre notre objectif.

#### Perception d'une fourmi

Les décisions les plus importantes des fourmis étant les mouvements, nous avons décidé que la perception de l'environnement de la fourmi avait du sens d'être basé sur des directions. Plus précisément, à chacune de ces directions est attribuée un score qui représenterait la volonté qu'a la fourmi d'aller dans cette direction. On considère donc une structure que nous avons appelé PerceptionMap qui remplit cette objectif d'associer un vecteur 2D à un réel.

Une perception map va donc donner à la fourmi l'information de la direction la plus intéressante selon le phéromone qu'elle recherche à un moment donné.

**Figure 1.6** montre ce que "voit" une fourmi qui chercherait la direction vers laquelle elle trouverait le plus de phéromones verts. Dans ce schéma, plus une zone est coloriée en rouge, plus elle a de l'importance pour la fourmi.

Dans le calcul de cette perception map, il intervient 3 facteurs différents :

- La distance  $d$  de la fourmi au phéromone et la distance de perception  $\alpha$  (propriété de la fourmi). (1.1a)
- L'angle  $\Delta$  entre le vecteur directeur<sup>2</sup> et la direction du phéromone. (1.1b)
- L'intensité du phéromone.  $e_p$  (avec  $p$  le phéromone)

---

2. Le vecteur directeur est le vecteur associé à l'angle de la fourmi ou autrement dit, la direction dans laquelle elle regarde.

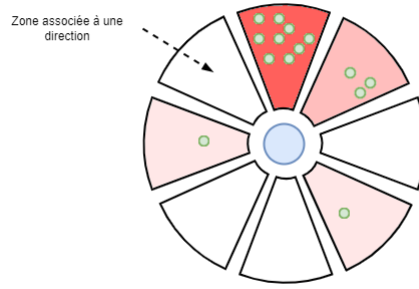


FIGURE 1.6 – Schéma d'une représentation de la perception map d'une fourmi

$$f(d) = \frac{1}{(1 + e^{\frac{\alpha}{2}-d})} \quad d, \alpha > 0 \quad (1.1a)$$

$$r(\Delta) = \frac{1 - |\Delta|}{\pi} \quad \Delta > 0 \quad (1.1b)$$

Ces différents facteurs nous permettent de calculer un score  $\mu_p$  pour chaque phéromone qui représente son attractivité pour la fourmi. (1.2)

$$\mu_p = \sum_p f(d) \times r(\Delta) \times e_p \quad (1.2)$$

Finalement, à chaque direction  $u$  nous pouvons récupérer les scores de chaque phéromone  $p_u$  présent dans cette direction et les sommer pour obtenir le score total de cette direction qu'on nommera  $\lambda_u$ . (1.3)

$$\lambda_u = \sum_{p_u} \mu_{p_u} \quad (1.3)$$

On peut ainsi attribuer un score d'attractivité qui permettra à la fourmi de savoir quelle direction est la plus intéressante de suivre. Dans le cas où l'on voudrait que la fourmi soit repoussé par quelque chose, il suffit de faire en sorte que la direction opposée de ce quelque chose soit intéressante, elle serait donc plus intéressée par la fuite.

### Prise de décision de la fourmi

Maintenant que la fourmi est capable de sentir son environnement proche, il lui faut une manière de modéliser son comportement. Pour cela, nous avons considéré que la fourmi n'avait que deux phases différentes pour accomplir son objectif :

1. La fourmi recherche de la nourriture en suivant éventuellement les phéromones amenant à de la nourriture tout en déposant ceux qui amènent à la colonie.
2. La fourmi recherche sa colonie en suivant les phéromones la ramenant à sa colonie.

Ces deux phases se répéteront à l'infini de manière successives avec chacune une phase intermédiaire où la fourmi a trouvé ce qu'elle cherchait et s'y dirige directement.

## Machine à états

Nous avons donc décidé de modéliser cette succession d'états par une machine à états. En effet, cette modélisation nous permet de faire évoluer le comportement de la fourmi sans problème. La solution "évidente" à ce problème est le design pattern *State* (États) qui répond directement à cette problématique et permet de renforcer notre souhait d'avoir un comportement qui peut évoluer facilement.

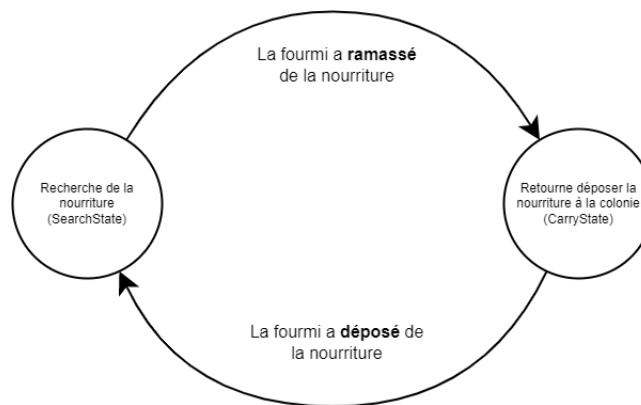


FIGURE 1.7 – Schéma de la machine à états

Le design pattern *State* est pratique car à chaque état du comportement, nous pouvons y associer du code à exécuter pour la fourmi via la méthode *Update* vue précédemment mais aussi lorsque la fourmi rentre ou quitte cet état ouvrant ainsi un large panel de possibilités pour les comportements.

## Entité vivante qui se déplace

La fourmi ayant pris une décision pour sa direction, il ne reste plus que de s'y déplacer. Cependant, il existe beaucoup de manières de se déplacer d'un point A à un point B. La fourmi peut par exemple s'y rendre en ligne droite ou alors en ondulant de gauche à droite l'essentiel étant que nous ne voulons là encore pas nous rendre la vie compliqué plus tard si nous voulons changer cette manière de déplacement.

Nous avons suivi la même philosophie et avons réfléchi à garder une certaine modularité et c'est ici que le design pattern *Strategy* (Stratégie) intervient. Il permet de rapidement comparer des méthodes de déplacement en attribuant à chaque colonie (ou même à un ensemble de fourmis) une stratégie de déplacement. Malheureusement, nous n'avons pas eu le temps d'implémenter des stratégies autres que *LineStrategy*<sup>3</sup> et *WandererStrategy*<sup>4</sup>.

Pour formuler ça mathématiquement, nous cherchons à chaque tick à calculer la prochaine position  $r_{n+1}$  de la fourmi à partir d'une direction dominante  $\vec{v}$  qui est donnée par la *PerceptionMap* calculée précédemment.

La stratégie de déplacement va donc utiliser cette direction  $\vec{v}$  pour calculer la vraie direction dans laquelle la fourmi doit aller pour respecter la stratégie.

3. Déplacement dans la direction dominante de la *PerceptionMap*.

4. Déplacement dans la direction dominante de la *PerceptionMap* influencée par une variable aléatoire.

Les fourmis utilisent principalement la stratégie de déplacement WandererStrategy car elle leur permet d'explorer leur environnement tout en prenant en compte ce qu'elles perçoivent (leur PerceptionMap). Elle utilise deux facteurs en plus :

- $\alpha$  qui représente la part d'aléatoire souhaitée.
- $\beta$  qui représente l'influence de l'ancienne direction <sup>5</sup>

La formule permettant de calculer  $\vec{d}_{n+1}$ , la direction dans laquelle la fourmi avancera en fonction de ces paramètres est donnée par :

$$\vec{u} = \alpha \vec{x} + (1 - \alpha) \vec{v} \quad \vec{x} \text{ une direction aléatoire} \quad (1.4a)$$

$$\vec{d}_{n+1} = \beta \vec{d}_n + (1 - \beta) \vec{u} \quad 0 \leq \alpha, \beta \leq 1 \quad (1.4)$$

Ainsi, à chaque tick de la simulation on calcule la nouvelle position  $\vec{r}_{n+1}$  :

$$\vec{r}_{n+1} = \vec{r}_n + \text{Speed} * \vec{d}_{n+1} \quad (1.5)$$

Après avoir calculé cette nouvelle position, il est tout de même nécessaire de vérifier si la fourmi ne serait pas en collision avec un obstacle en utilisant son Collider à la nouvelle position.

## Colonie

Chaque fourmi est issue d'une seule et unique colonie qui sera l'endroit où elle déposera la nourriture qu'elle trouvera. La colonie tente à chaque tick de faire apparaître un certain nombre de fourmis en utilisant les ressources qui ont été déposées. C'est une entité très simple dans sa conception car elle ne sert que "d'usine à fabrication" de fourmis et cela vient aussi du fait que nous ne simulons pas l'intérieur de la colonie.

La colonie a donc a plan de fabrication d'une fourmi ou autrement dit, une liste des ressources nécessaires à la création d'une fourmi et un stock des ressources qui sont apportés par les fourmis de la colonie.

## Pheromones

Les phéromones sont le moyen de communication unique des fourmis de notre simulation. Il en existe deux types différents qui sont diffusés par les fourmis selon l'état dans lequel elles sont :

- Les phéromones de maison
- Les phéromones de nourriture

Ces deux phéromones permettent donc aux fourmis, selon leur état, de savoir dans quelle direction se trouve leur objectif (colonie ou nourriture).

Il est cependant nécessaire pour les phéromones de ne pas être infini car les fourmis pourraient s'intéresser à des phéromones inutiles car trop anciens, nous obligeant donc à implémenter un système de minuteur qui à sa fin déclencherait la suppression du phéromone.

---

5. Ce facteur peut aussi être compris comme l'inertie qu'a une fourmi. Si on augmente ce facteur, la fourmi aura plus de mal à changer de direction et inversement.

Nous avons donc fait en sorte que lorsqu'une fourmi émet un phéromone, elle lui donne son intensité et cette intensité sera la valeur qui servira de décompte pour le phéromone. En effet, nous décrémente l'intensité à chaque tick jusqu'à atteindre 0 et lorsque l'intensité est nulle il est effectivement normal de supprimer le phéromone de la simulation car il n'a plus aucun impact sur la simulation.

Il a cependant fallu faire attention à la durée entre les deux types de phéromones car nous avons remarqué que ceux amenant à la nourriture n'avait pas autant d'intérêt à rester longtemps comparés à ceux menant à la colonie car contrairement à la celle-ci, la nourriture est plus susceptible de disparaître et il est donc contre-productif de garder des phéromones amenant à une source de nourriture épuisée.

Pour améliorer les performances de la simulation, nous avons implémenté un système de fusion de phéromones lorsqu'ils sont trop proches car malgré le fait qu'ils comptaient pour deux entités différentes, la fourmi ne pouvait pas faire la distinction entre deux phéromones à seulement quelques nanomètres d'écart.

## Ressources

Les ressources sont l'objectif des fourmis en état de recherche. Nous avons cependant une distinction entre les objets **Ressource** et **Entité de ressource**. Pour donner un exemple, imaginons une ressource de pomme dans le monde de la simulation. Ici, la **Ressource** serait l'idée d'une ressource pomme tandis que l'**Entité de ressource** serait la pomme réellement posée dans la simulation, récupérable par les fourmis.

Cette distinction nous permet d'avoir plusieurs dépôts de ressources représentant la même ressource. Mis à part cela ces objets sont très simples et n'ont aucune comportement propre.

## 1.3 Application

Maintenant que nous avons présenté la partie moteur de simulation de notre application, nous allons expliquer l'architecture de la partie applicative du projet. Pour rappel, le projet était principalement centré sur le moteur de simulation mais la partie applicative était importante car c'est elle qui permet à l'utilisateur d'interagir simplement avec le moteur.

### 1.3.1 Présentation de la structure

L'application utilise donc le framework MonoGame (anciennement XNA) et bien que ce framework est très simple d'utilisation, cela ne nous a pas empêché de devoir concevoir une structure robuste pour permettre d'afficher de multiples objets différents à l'écran. Nous avons grossièrement deux catégories d'éléments à afficher à l'écran :

- Les entités de la simulation
- Les éléments de l'interface

Ces deux types d'objets sont certes différents mais il est possible de trouver propriétés communes aux objets de rendu de chacun.

Nous avons pour cela créer un adaptateur des objets de la simulation pour qu'ils soient compatibles avec nos méthodes de rendu utilisant MonoGame. Ainsi, les entités sont munis d'un analogue `Render` dans la partie application qui est chargé d'afficher la dite entité à l'écran.

Par souci de simplicité, nous avons fait en sorte que chaque composant serait lui même responsable de s'afficher sur l'écran en utilisant les objets de rendu qu'il a à disposition (SpriteBatch<sup>6</sup> et GraphicsDeviceManager<sup>7</sup>).

Chaque Renderer utilisera donc ces objets avec des informations lui indiquant la position sur l'écran à laquelle il doit s'afficher pour lui même se rendre. D'autres applications font la méthode inverse où un objet de rendu principal utilise les informations qui lui sont données pour afficher tous les objets.

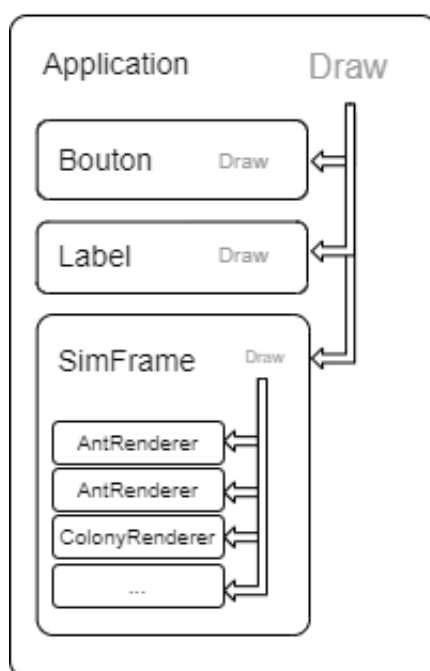


FIGURE 1.8 – Schéma de la chaîne de rendu

Figure 1.8 montre comment la méthode *Draw* de MonoGame est distribuée parmi tous les objets à afficher pour qu'eux- mêmes s'affichent. Il y a cependant un élément en particulier qui est très important qui n'est autre que l'espace de rendu de la simulation nommée **SimFrame**. Cet élément est particulier car sa méthode Draw ne fait que transmettre la cascade d'appel à la méthode de rendu aux Renderers des entités de la simulation.

Ainsi, avec chaque renderer qui est associé à une entité à afficher de la simulation, nous avons une représentation lisible de ce qu'il se passe dans la simulation. Le fait qu'il existe un renderer pour une entité nous permet si nous le souhaitons de faire un rendu différent sur des entités possédant une classe de rendu similaire (des couleurs différentes pour des fourmis).

6. Element donné par MonoGame pour dessiner des Sprites (des images) à l'écran. <https://docs.monogame.net/api/Microsoft.Xna.Framework.Graphics.SpriteBatch.html>

7. API graphique plus bas niveau que SpriteBatch mis à disposition par MonoGame. Permet de dessiner directement sous la forme de vertex, plus proche d'une manière "à la OpenGL". <https://docs.monogame.net/api/Microsoft.Xna.Framework.GraphicsDeviceManager.html>



## Elements d'interface

Pour ce qui est de l'interface utilisateur, nous avons implémenté quelques classes d'éléments pour l'application.

**Label** Cet élément permet d'afficher du texte là où nous voulons sur l'écran pour donner à l'utilisateur des informations supplémentaires.

**Bouton** Nous avons évidemment implémenté un système de boutons qui nous permet de rajouter la possibilité à l'utilisateur de déclencher des actions à l'aide d'un simple clic. Nous avons là encore fait en sorte de nous ouvrir le plus de possibilités pour des extensions futures et avons donc mis le plus d'évènements possibles qui sont :

- Début de clic sur le bouton
- Bouton cliqué (maintenu)
- Clic relevé

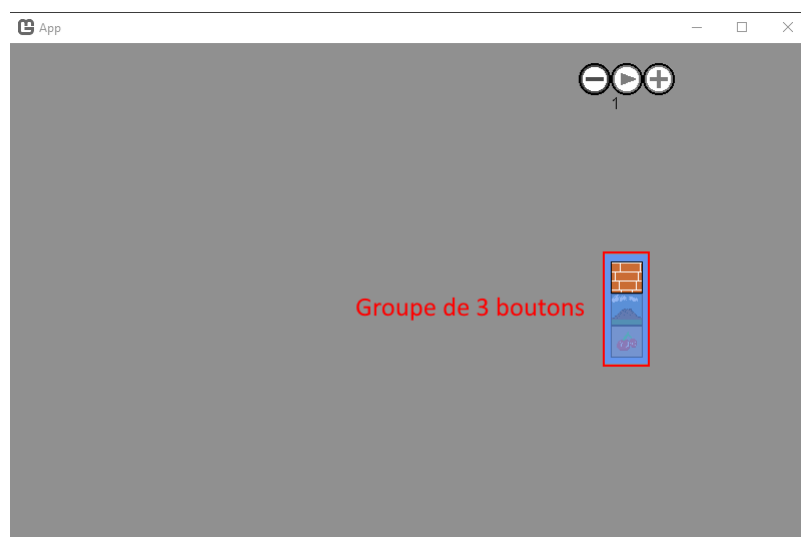


FIGURE 1.9 – Exemple des boutons dans l'application

# Chapitre 2

## Réalisation

---

Ce chapitre présente le déroulement du projet, les aléas qui sont apparus au cours du développement et d'autres aspects de développement qu'il nous a semblé utile de faire apparaître.

### 2.1 Choix des outils et technologies

#### 2.1.1 Outils de collaboration

Lors des projets de 3<sup>ème</sup> année, nous avons beaucoup appris sur comment utiliser Git. Nous avons choisi d'utiliser **GitHub** en tant qu'outil de versionnage en raison de notre aise avec et car le site possède un grand nombre de fonctionnalités nous permettant de mieux communiquer entre nous.

Lors du projet nous avons adopté une méthode de travail basé sur le **GitFlow**<sup>1</sup> avec pour seule nuance que nous n'avions pas de branches *dev* ou *release* mais plutôt toute modification se fusionnait directement à la branche *main*.

Cela avait pour avantage de nous permettre de suivre les avancements de l'autre personne et de pouvoir apporter des suggestions ou des commentaires sur ce qui a été fait. En fin de compte l'utilisation de ce workflow nous a permis de connaître et comprendre les parties de codes que l'autre écrit et donc de pouvoir beaucoup avancer chacun de notre côté en ne laissant pas l'autre personne à l'abandon.

En plus des merge requests, GitHub nous permet de créer des *issues*. Ces *issues* peuvent être considérés comme des tâches qu'il reste à faire. Au sein de GitHub, nous pouvons à tout moment nous approprier une tâche afin d'indiquer qu'on a commencé à travailler dessus. Cela permet de bien savoir ce sur quoi l'autre personne travaille et également d'avoir un aperçu rapide de ce qu'il reste à faire dans le projet.

Il est évident que le nombre d'issues que nous avons au début du projet n'est pas le même qu'à la fin. Au cours du projet nous pouvions découvrir des aspects du code à réparer (dans ce cas l'issue serait plutôt un *bug report*) ou encore des fonctionnalités importantes auxquelles nous n'avions pas pensés.

Les issues nous ont également permis de débattre entre-nous sur quelle serait la meilleure solution à un problème. Essentiellement, toute utilisation de GitHub est dans l'objectif de faciliter la communication et le fait que tout soit bien répertorié nous assure de ne pas oublier des échanges que nous aurions pu avoir.

---

1. Une méthode de travail où on sépare chaque feature ou fix dans une branche séparée. Ensuite une fois la feature finie, on crée un *Merge Request* afin de demander la validation des autres développeurs.

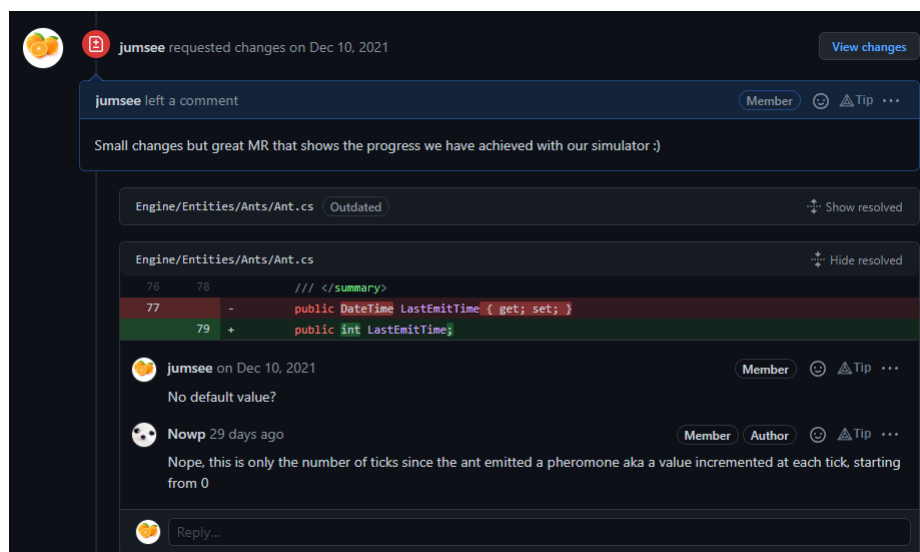


FIGURE 2.1 – Exemple de commentaire sur un merge request pour l’ajout de la disparition des phéromones.

Ces issues apparaissent au sein de Kanbans<sup>2</sup> qu’on retrouve directement intégré à GitHub. Nous avons deux Kanbans, un pour l’Application et l’autre pour le moteur de simulation comme ces deux éléments peuvent avancer très facilement en parallèle.

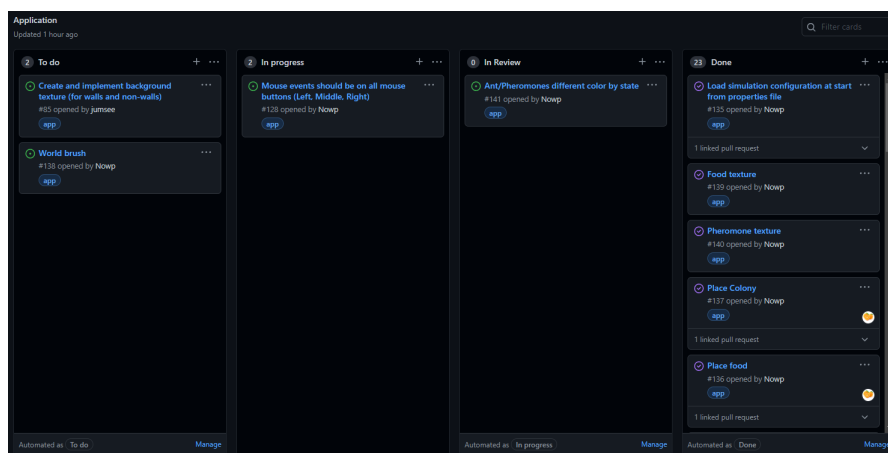


FIGURE 2.2 – Exemple du tableau de bord côté Application. On voit les tâches qui sont en cours de développement et ceux qui sont prêts à être review.

Un autre élément que nous avons utilisé avec GitHub est la fonctionnalité d’intégration continue. En effet, nous avons configuré notre projet pour lancer tous les tests unitaires à chaque commit effectué sur une branche. Cela nous a permis de repérer des erreurs dans notre code car nous avons configuré le repo GitHub pour ne pas avoir le droit de merge une branche lorsque les tests unitaires ne passent pas. En plus de cela, nous n’avions pas le droit de faire des commits directement sur la branche main

2. Au sein de ce projet le Kanban était notre tableau de bord et nous permettait de suivre l’avancement et de savoir ce qu’il restait à faire. Plus d’informations : [https://en.wikipedia.org/wiki/Kanban\\_\(development\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Kanban_(development)).

et pour merge une branche il fallait la validation de l'autre personne. Tout cela nous a apporté une connaissance plus générale sur le projet.

## 2.1.2 Langages et Langues

Le choix du langage de programmation à utiliser était une décision importante à prendre. Nous avons décidé de faire ce projet en C# car c'est un langage que nous n'avons pas encore pu utiliser au sein du parcours à Polytech. Nous étions au courant du fait que le C# était très proche du Java et donc il n'y avait pas d'inquiétudes sur notre capacité à l'apprendre rapidement. Le C# reprend aussi les concepts de machine virtuelle qui existent en Java ce qui permettrait de build et lancer le projet sur n'importe quel système d'exploitation grâce à .NET. De plus, le C# est un langage que nous avons pu utiliser lors de petit projets sur Unity mais jamais sur un gros projet comme celui-ci. A l'intérieur de C# le standard de documentation utilisé est XMLdoc<sup>3</sup>.

Ensuite, il a fallu que nous nous décidions sur quelle convention de nommage nous allions utiliser. Malgré notre envie d'utiliser celle présentée par notre enseignant en cours de C++ en 3<sup>ème</sup> année, nous avons découvert la convention proposée par Microsoft pour le C#<sup>4</sup> qui nous a particulièrement plu. Dans une volonté de vouloir rester polyvalent et malléable en terme de méthodes de travail, nous avons décidé d'adopter cette convention.

Pour ce qui est de la langue dans laquelle nous avons codé, nous avons décidé de tout faire en Anglais pour que le code soit facilement transmissible et exploitable par d'autres individus dans le monde, chose qui dans le contexte de la mondialisation reste très important.

## 2.1.3 Librairie de Tests

Il existe plusieurs librairies de test au sein de l'environnement .NET. Les plus utilisés sont XUnit, NUnit et MSTest. La bibliothèque que nous avons choisi d'utiliser est XUnit en raison du fait que Noé l'avait déjà utilisé au sein d'un projet personnel.

## 2.1.4 Framework d'affichage

Au lancement du projet, nous avons dû réfléchir à quel framework utiliser pour faire l'affichage de la simulation. Dans un premier temps, nous nous étions intéressé à Avalonia, un framework cross-platform qui est un successeur spirituel de WPF<sup>5</sup>. On s'est rendu compte qu'Avalonia n'était pas du tout ce qu'on recherchait comme il ne servait qu'à faire des interfaces graphiques et était très peu utilisable pour l'affichage de formes plus complexes.

---

3. Plus d'informations : <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/language-reference/xml/doc/>.

4. Plus d'informations : <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/fundamentals/coding-style/coding-conventions>

5. WPF ou Windows Presentation Foundation est un framework utilisé pour la création d'interfaces graphique. Aujourd'hui ce framework a beaucoup vieilli et est en train d'être remplacé par des frameworks plus modernes tels que Avalonia.

Nous avons donc dû rechercher une solution alternative et c'est là que nous avons découvert MonoGame. MonoGame est un framework graphique open-source utilisé principalement pour des jeux comme son nom l'indique et qui est basé sur XNA (un framework développé par Microsoft et abandonné depuis 2013). Après avoir consulté la documentation et avoir fait des recherches dessus, MonoGame est le framework que nous avons décidé d'utiliser. Il nous a permis de rendre plus simple certains aspects tels que l'importation et l'utilisation de textures.

En complément de MonoGame, l'ensemble des textures présents dans le projet ont été créés à la main avec Piskel<sup>6</sup>.

## 2.2 Moteur

### 2.2.1 Abstraction des Colliders

Lorsque nous avons codé les colliders, nous nous sommes rendu compte que la manière initiale dont nous l'avions conçu faisait qu'il y avait énormément de duplication de code ce qui le rendait difficilement maintenable.

Exemple : Pour tester la collision entre un cercle et un rectangle il y a deux cas. Premier cas : le cercle appelle sa méthode `CheckCollision` en passant le rectangle en paramètre. Second cas :

La solution à cela était de déplacer les méthodes de collision dans une classe statique et qu'ensuite chaque collider fasse appel à la méthode qu'il a besoin dans la classe statique.

### 2.2.2 Transforms et Colliders

Comme indiqué précédemment, l'objet `Transform` que nous avons utilisé est inspiré de celui qu'on retrouve en Unity. Un autre concept que nous avons voulu reprendre de Unity est le fait qu'un collider puisse posséder son propre transform ce qui lui permet d'avoir une position autre que celle de l'entité à laquelle il est attaché. Ça permet aussi aux colliders d'exister sans être forcément lié à une entité.

Au début du projet, nous avions pour intention d'implémenter cela dans le moteur de simulation. Un collider aurait donc un transform et s'il est rattaché à une entité, le transform du collider serait en coordonnées relatives (pour obtenir sa position réelle, il faudrait faire `Entity.Transform + Collider.Transform`). Il s'avère que cette solution ajoute beaucoup de complexité aux calculs de collision et ne serait même pas utile au sein de la simulation. Nous avons donc pris la décision d'enlever cette fonctionnalité et de lier fortement les colliders aux entités en leur faisant prendre le transform de l'entité à laquelle ils sont rattachés.

### 2.2.3 Temps de simulation ou temps réel ?

Une erreur gigantesque que nous avons commises est le fait que nous avons ajouté des éléments qui dépendaient du temps réel dans le moteur de simulation (un exemple serait le temps de disparition des

---

6. Outil gratuit de dessin de PixelArt en-ligne. Plus d'informations : <https://www.piskelapp.com/>.

phéromones). Le problème ici vient du fait que nous voulions permettre aux utilisateurs de ralentir, accélérer ou mettre en pause la simulation.

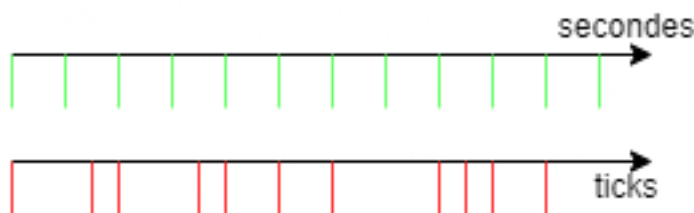


FIGURE 2.3 – Exemple d’appels de la méthode Update en temps réel et en temps de simulation.

Les lignes rouges dans 2.3 représentent des appels à Update. On voit que la méthode update n’est pas appelé de manière uniforme ce qui cause des décalages si on tente de changer la vitesse de la simulation.

Malheureusement, mettre en pause la simulation ne met pas en pause la vraie vie ! Il y a donc une désynchronisation qui se déroule et qui peut causer des problèmes de cohérence et d’intégrité. La solution à ce problème est évidente, il faut décompter tout en nombre de *ticks*, c’est à dire, de fois où la méthode Update du World est appelée. Cela fait que chaque phéromone possède un compteur pour sa disparition qui décroît de un à chaque Update. Cela permet de garder la cohérence dans le cas de modification de la vitesse de la simulation.

## 2.2.4 Optimisation

La problématique de l’optimisation de la simulation a été un enjeu très important pour nous tout au long du projet. Nous avons dû réfléchir sur les implémentations qui ont été faites afin de vérifier qu’elles ne faisaient pas chuter les performances. Que ce soit au niveau de quel type d’objet nous utilisions du C# ou encore vérifier qu’on ne remplissait pas inutilement le garbage collector<sup>7</sup>. Quand on parle de simuler une quantité de fourmis qui peut aller dans les milliers, sachant que chaque fourmi doit évaluer son environnement et prendre des décisions, la performance chute très rapidement.

Nous présenterons dans cette partie les principales optimisations que nous avons effectués pour augmenter au maximum le nombre de fourmis que le simulateur peut supporter.

### Découpage par régions

Le découpage par régions est l’optimisation la plus "simple" mais évidente que nous avons ajouté.

Dans la figure 2.4 on observe que la plupart des entités sont loin de l’individu au centre, l’optimisation par régions permet de ne pas les prendre en compte et donc de ne faire des calculs de collision avec que les objets dans la zone de perception de l’individu. Nous avons implémenté ce découpage en permettant aux fourmis de récupérer les entités qui sont dans une certaine zone autour d’eux (en nombre de régions ou en distance réel dans le monde). Cette optimisation nous a apporté un énorme

7. Le garbage collector est un gestionnaire de mémoire qui supprime et désalloue automatiquement des objets quand ils ne sont plus référencés par le programme. Plus d’informations sur comment il fonctionne en .NET : <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/standard/garbage-collection/fundamentals>

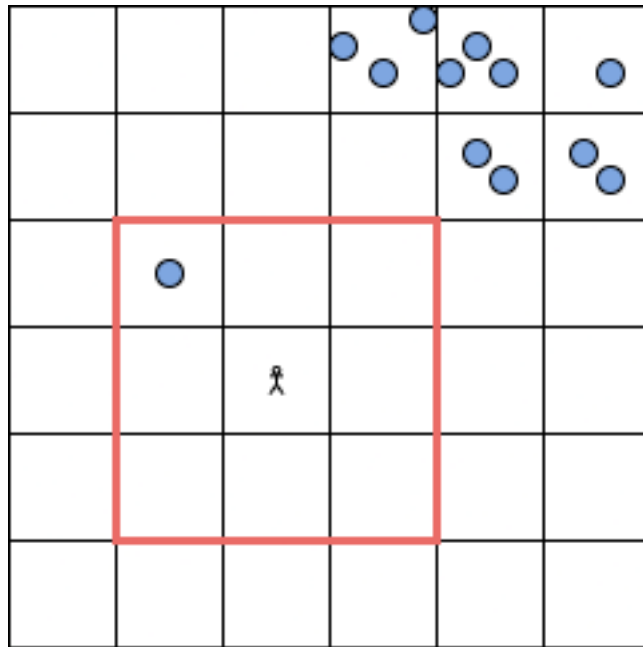


FIGURE 2.4 – Exemple de cas où l’optimisation par découpage en régions est très utile.

gain en performances et a notamment rendu la présence d’un grand nombre de fourmis et de phéromone peu impactant sur les performances.

### Structures de données

Un autre élément important dans l’optimisation de la simulation a été le choix des structures de données. On s’est rendu compte que l’objet `List<T>` en C# est très efficace lorsqu’on traite des liste de peu d’éléments mais, quand il y a un grand nombre d’éléments dans la liste, l’objet `HashSet` (objet dictionnaire) est beaucoup plus rapide à utiliser<sup>8</sup> mais prend plus de mémoire. Dans notre cas la performance est critique donc nous avons introduit le `HashSet` là où il y avait des listes de grande taille, c’est à dire principalement dans la récupération d’éléments pour former le perception map d’une fourmi.

On pourrait donc se demander pourquoi nous n’avons pas utilisé un `HashSet` pour le découpage du monde en régions ? La réponse est simple, pour les objets qui seront accédé souvent le type primitif `jagged array`<sup>9</sup> en C# est ce qui est conseillé en raison de sa performance.

Enfin, la dernière optimisation que nous avons fait pour les structures de données est au niveau des `Properties`. Un `Property`<sup>10</sup> en C# est un type de déclaration de variable qui permet de générer automatiquement les accesseurs d’une classe. Ce type permet de simplifier le code et d’éviter aux développeurs d’écrire des méthodes qui vont juste allonger le code pour pas-grand-chose. Nous avons

8. Nous avons basé cette observation sur le poste suivant : <https://stackoverflow.com/a/10762995/15541425>

9. Plus d’informations : <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/programming-guide/arrays/jagged-arrays>

10. Plus d’informations : <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/programming-guide/classes-and-structs/properties>

remarqué que les propriétés, malgré leur intérêt évident, sont beaucoup plus lents que des attributs standards. Il a donc été très avantageux pour nous de ne pas utiliser de Property pour les éléments qui sont utilisés fréquemment.

## Fusion de phéromones

Un autre problème que nous avons remarqué au même moment que nous avons fait le découpage des régions est le fait qu'après que la simulation soit ouverte depuis longtemps, les fourmis auront émis un grand nombre de phéromones. Cela mettait la simulation à genoux en raison du nombre d'entités qui existaient dans le monde. Il fallait donc trouver une solution pour permettre d'avoir beaucoup de phéromones sans pour autant condamner la simulation à perdre en performances après un certain temps. Notre solution ici était de faire une fusion de phéromones s'ils sont assez proches. La fusion de deux phéromones combine leur attirance pour les fourmis et donc permet de garder les informations tout en optimisant plus la simulation. Cette fusion avait une limite supérieure ce qui empêche d'avoir des phéromones qui persistent extrêmement longtemps. Cette optimisation, combinée avec le découpage en régions, nous a apporté la plus grande augmentation en vitesse de simulation.

## Garbage Collector

Nous avons également dû travailler sur l'optimisation du garbage collector. Si trop d'objets sont créés et supprimés, le garbage collector va devoir travailler plus souvent pour les allouer et les désallouer ce qui influe beaucoup sur les performances.

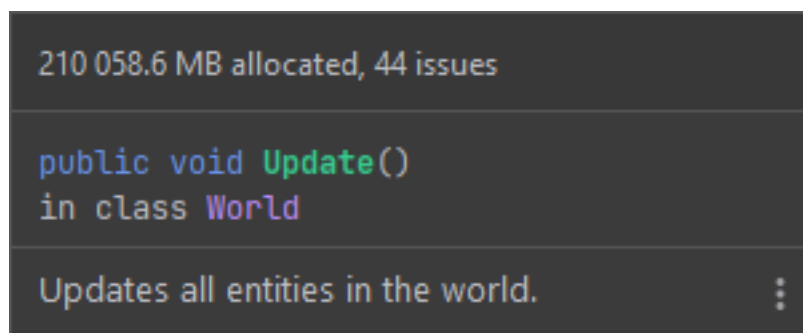


FIGURE 2.5 – Mémoire allouée par la méthode main après 10 minutes de simulation (avant les optimisations).

On voit sur la figure 2.5 qu'après très peu de temps, la mémoire qu'aura alloué le simulateur est très grande. Afin de résoudre ce problème, nous avons utilisé les outils de profiling de mémoire qu'on retrouve dans notre IDE <sup>11</sup>.

L'optimisation ici est simple, il nous a suffi de prioriser la réutilisation de variables et éviter de les déclarer et détruire trop souvent. Un exemple pertinent de cela est pour l'objet PerceptionMap qui avant, était recrée à chaque mise à jour du monde. Après l'optimisation, la perception map est stockée dans la fourmi et est simplement vidée à chaque mise à jour du monde.

11. Pour ce projet, nous avons utilisé Rider qui est un IDE pour le C# développé par JetBrains.



Il existe également d'autres méthodes qui initialisaient des listes inutilement. Nous avons modifié cela pour que ça ne soit plus le cas. Suite à ces optimisations, l'outil de vérification de mémoire dans Rider ne nous affichait plus d'avertissements et donc nous pensons avoir totalement résolu le problème.

## 2.3 Application

### 2.3.1 Renderers

Une autre hésitation que nous avons eue durant le projet était au niveau de comment gérer la structure de rendu dans l'application et comment faire l'association entre une entité du moteur et ce qu'on dessine à l'écran. Au début, nous avons pensé à créer une classe qui s'occuperait de faire le rendu des entités en parcourant la liste présente dans l'objet World (voir la figure 2.6).

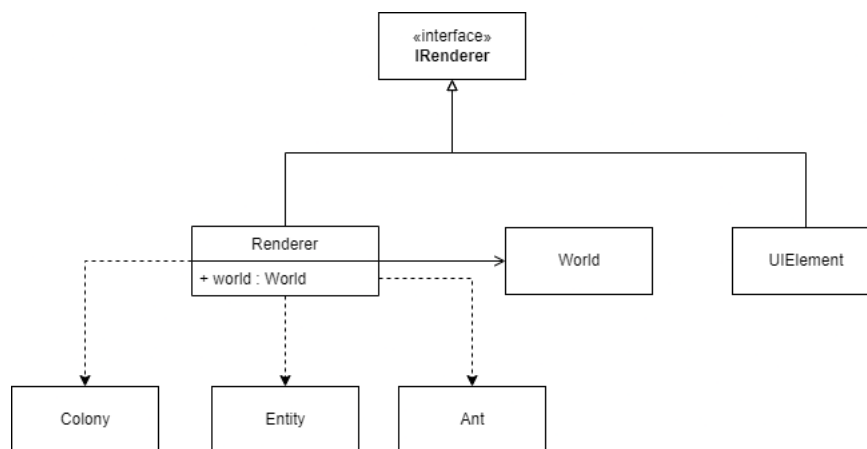


FIGURE 2.6 – La structure initiale que nous avons prévu d'utiliser (one-to-all). L'objet Renderer serait rapidement devenu peu pratique à utiliser et à modifier.

En fin de compte, nous avons trouvé que cette solution était peu pratique car si nous voulions un comportement de rendu différent pour des objets d'une classe particulière, il aurait fallu faire une disjonction de cas par rapport au type. Cela nous aurait fait finir avec une méthode très longue qui aurait été un véritable cauchemar à gérer.

Nous avons donc pris la décision logique de plutôt créer des renderers génériques pour les entités n'ayant pas besoin de comportement en plus et dans le cas d'entités comme les fourmis ou la colonie qui avaient des textures ou comportements différents, nous pouvions créer un renderer précis juste pour eux (voir la figure 2.7).

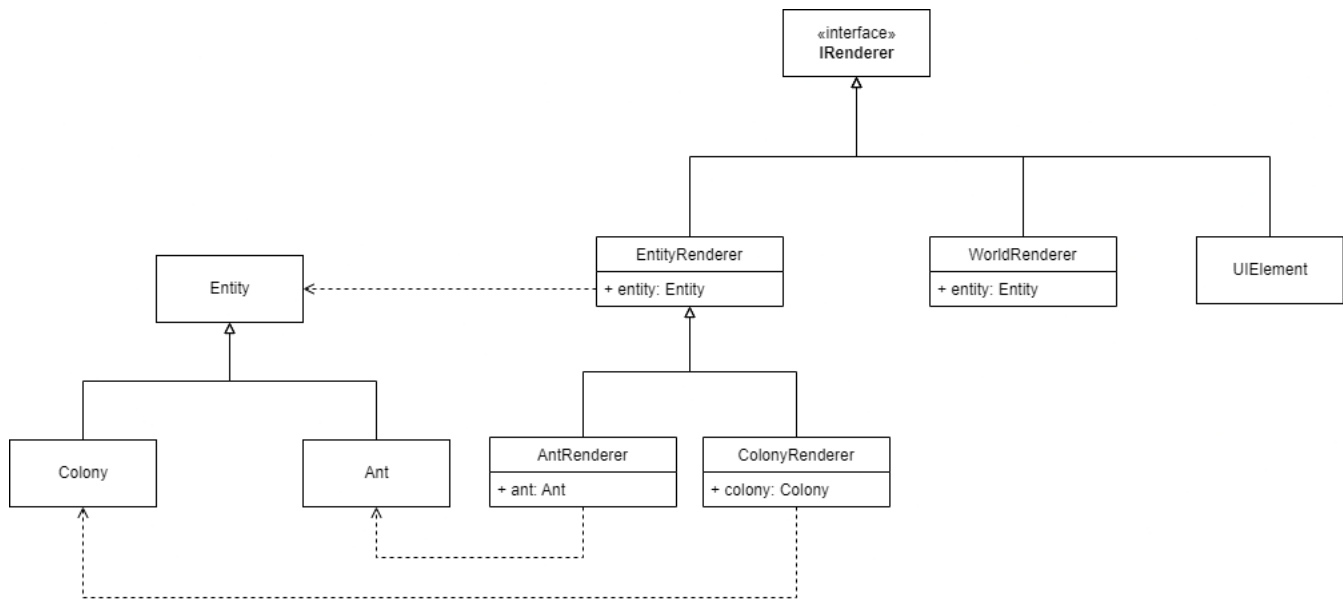


FIGURE 2.7 – La structure finale que nous avons utilisé (one-to-one). Elle permet facilement d’aller modifier ce qu’on a besoin pour l’affichage d’un type d’objet précis.

### 2.3.2 Fichier de propriétés

Afin de faciliter la configuration de la simulation, nous avons utilisé un fichier propriétés<sup>12</sup> qui permet de spécifier les changements qu’on veut ajouter comme par exemple la vitesse des fourmis ou les ressources nécessaires pour qu’une colonie fasse apparaître une fourmi. A l’origine, nous avions prévu de permettre la configuration de ces options directement dans la simulation, mais, le fait d’utiliser MonoGame nous a imposé de créer les objets de saisie de texte à la main. Nous avons décidé que cela serait une trop grosse perte de temps et ne rentrerait pas dans le cadre du projet. Le fichier Properties a été donc un gain de temps énorme pour nous, comparé à l’alternatif.

### 2.3.3 Pipeline de contenu

Un des avantages de MonoGame était le principe d’importation de textures (ou content pipeline) qui était très pratique à utiliser. Pour importer une texture dans la simulation nous devions ouvrir l’éditeur MGCB<sup>13</sup>. Cet éditeur nous permettait de simplement spécifier un fichier .png et une fois que nous avions build le projet, le texture serait ajouté au projet et pouvait être exploité en l’important en une ligne :

```
Texture2D maTexture = Content.Load<Texture2D>("chemin/vers/texteure");
```

12. Nous avons utilisé une implémentation de gestion de fichier propriétés postée sur StackOverflow car en Java il existe une implémentation native qu’on ne retrouve pas en C# : <https://stackoverflow.com/questions/485659/can-net-load-and-parse-a-properties-file-equivalent-to-java-properties-class#answer-7696370>

13. MonoGame Content Builder(MGCB) est un utilitaire qui permet de simplifier l’importation de textures dans le framework MonoGame. Plus d’informations : [https://docs.monogame.net/articles/tools/mgcb\\_editor.html](https://docs.monogame.net/articles/tools/mgcb_editor.html)

## 2.4 Tests

Malgré notre envie d'écrire des tests, nous nous sommes rendu compte que dans notre projet, il était facile de tester les classes simples comme les colliders ou les transforms mais, dès qu'on voulait tester des choses plus avancées comme le comportement des fourmis, il était difficile d'écrire des tests qui n'étaient pas juste une perte de temps ou redondants. C'est pourquoi nous n'avons pas pu écrire autant de tests que ce qu'on visait au départ. De plus, la partie application du projet ne contient aucun test, nous avons testé à la main les interfaces comme il n'y avait pas beaucoup de possibilités à tester.

En revanche, les choses que nous avons testées nous ont permis de détecter des problèmes qui auraient été compliqués à trouver sinon (comme par exemple des problèmes avec nos formules de collision)<sup>14</sup>.

---

14. La liste des tests qui ont été faits peut être trouvée en annexe.

# Chapitre 3

## Résultats et perspectives

---

### 3.1 État des lieux

### 3.2 Apports

### 3.3 Évolutions possibles

Bien que nous soyons fiers de notre simulation, il y a une multitude d'améliorations et d'évolutions qui sont possibles.

#### 3.3.1 Comportement des fourmis

Une amélioration conséquente que nous pourrions faire serait de réparer les problèmes qui existent avec le comportement des fourmis.

##### Bouclage

Un problème avec le comportement actuel est le fait que certaines fourmis vont faire du Bouclage. Pour plus détailler, il s'agit du cas où une fourmi a trouvé de la nourriture et elle commence à suivre une fourmi qui cherche de la nourriture. Les fourmis ont un risque de commencer une boucle où elles vont chacune se suivre et ne jamais pouvoir en sortir. Bien que ce phénomène existe dans la vraie vie<sup>1</sup>, ce n'est pas censé arriver aussi fréquemment que dans notre simulation. Une solution serait de faire en sorte que la fourmi puisse abandonner sa recherche ce qui sortirait les fourmis du cycle.

##### Les Murs

Un autre problème est le fait que les fourmis voient les phéromones à travers des murs. Il peut arriver qu'elles se ciblent sur un morceau de nourriture en particulier de l'autre côté d'un mur et donc qu'elles soient bloquées. Il faudrait donc vérifier la présence d'un mur avant de passer en TargetState et permettre à la fourmi d'avancer sur la nourriture qu'elle voit.

##### Phéromones

Enfin, la dernière amélioration en lien avec le comportement des fourmis est le fait que parfois les fourmis ont du mal à remonter la trace des phéromones qui les mènerait à la bonne destination et elles

---

1. Voir : <https://youtu.be/LEKwQx04EZU>

finissent par se perdre en chemin de leur colonie. Ca peut arriver qu'elles prennent un chemin de food pheromones dans la mauvaise direction (et donc que ça les conduise à leur colonie et non pas de la nourriture).

### 3.3.2 Properties

Comme énoncé précédemment, il serait possible de rajouter un endroit à l'intérieur de la simulation qui permet de modifier les règles de la simulation. On pourrait aussi rajouter de la personnalisation en plus dans l'application (liste non-exhaustive) :

- Déterminer quelle quantité de nourriture est dans l'entité qu'on pose.
- Pouvoir placer des colonies qui ont des propriétés différentes.
- Pouvoir modifier la couleur des fourmis d'une colonie.
- Une brosse pour poser des éléments plus gros (une plus grosse colonie ou un plus gros mur par exemple).
- La possibilité de pouvoir zoomer dans la simulation pour que la taille de monde maximum ne dépende pas de la taille de son écran.

### 3.3.3 Optimisation

Une autre fonctionnalité intéressante dont nous sommes déçus de ne pas avoir pu ajouter est le multithreading. En effet l'ajout du multithreading (CPU ou GPU) dans les calculs permettrait d'afficher encore plus d'entités dans la simulation. On pourrait envisager une distribution du travail par régions (chose qui se rapprocherait du calcul d'une fractale de Mandelbrot<sup>2</sup> par exemple). Il faudrait donc rajouter des protections contre les problèmes de concurrence et rendre le logiciel thread-safe.

Enfin, malgré le fait que nous sommes contents d'avoir pu apprendre le C#, il est fort probable que si nous avions fait le projet en C++ ou dans un autre langage qui est plus proche de la machine, l'application aurait été plus rapide et moins complexe à optimiser.

### 3.3.4 Fonctionnalités liés au monde

Ensuite, une autre addition qui pourrait être intéressante est le fait de pouvoir importer et exporter le monde en son état actuel ainsi que les paramètres qu'on aurait modifié dans l'application. Pour les paramètres c'est techniquement possible actuellement car on peut partager notre fichier .properties avec quelqu'un d'autre mais il faut le modifier à la main. Par contre, pour ce qui est de l'état actuel du monde, il faudrait qu'on détermine un format de sérialisation qui serait assez robuste pour contenir toutes les données. En plus, ça pourrait être intéressant d'avoir une fonctionnalité qui fait apparaître de la nourriture aléatoirement dans le monde afin de pouvoir faire des simulations sur le plus long terme. En complément du point précédent, il serait intéressant que les fourmis puissent mourir et se reproduire même si cela rajouterait un niveau de complexité en plus à la simulation. Elles pourraient également rentrer en conflit avec des colonies voisines pour contester des ressources. On pourrait imaginer une fourmi guerrière qui aurait pour rôle de protéger sa colonie et ses fourmis.

---

2. Plus d'informations : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ensemble\\_de\\_Mandelbrot](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ensemble_de_Mandelbrot)

# Conclusion

---

# Bibliographie

---

- [1] détail bibliographique de la ref1
- [2] détail bibliographique de la ref2
- [3] détail bibliographique de la ref3
- [4] détail bibliographique de la ref4
- [5] détail bibliographique de la ref5

# Annexe A

## Liens utiles

---

Voici une petite liste d'url intéressantes au sujet de ce projet :

— <https://github.com/PolyNoradrenalin/AntSimulator> Répertoire GitHub du projet



# Simulation d'une colonie de fourmis

---

## Rapport : Projet de Programmation et Génie Logiciel

**Résumé :** Integer lorem purus, rutrum quis lacinia in, egestas ut urna. Donec elementum mi id nisi blandit quis ultricies risus semper. Nulla congue tincidunt diam, id tincidunt mauris euismod nec. Nullam faucibus dapibus eros, at consequat odio rutrum quis. Curabitur nisl sem, suscipit in mattis eu, varius a mauris. Ut a augue ac augue fringilla egestas. Etiam non augue felis, in convallis nisi. Maecenas id urna ut justo tempor laoreet in eu ligula. Duis non erat vitae eros rhoncus rutrum sit amet at lorem. Ut tempor cursus ligula, eu bibendum ligula adipiscing eu. Fusce feugiat aliquam dolor, nec interdum nisl convallis vitae.

**Mots clé :** ???,????,?????,??????????,??,????

**Abstract :** Integer lorem purus, rutrum quis lacinia in, egestas ut urna. Donec elementum mi id nisi blandit quis ultricies risus semper. Nulla congue tincidunt diam, id tincidunt mauris euismod nec. Nullam faucibus dapibus eros, at consequat odio rutrum quis. Curabitur nisl sem, suscipit in mattis eu, varius a mauris. Ut a augue ac augue fringilla egestas. Etiam non augue felis, in convallis nisi. Maecenas id urna ut justo tempor laoreet in eu ligula. Duis non erat vitae eros rhoncus rutrum sit amet at lorem. Ut tempor cursus ligula, eu bibendum ligula adipiscing eu. Fusce feugiat aliquam dolor, nec interdum nisl convallis vitae.

**Keywords :** ???,????,?????,??????????,??,????

Auteur(s)

**Narvin Chana**

[[narvin.chana@etu.univ-tours.fr](mailto:narvin.chana@etu.univ-tours.fr)]

**Noé Pécault**

[[noe.pecault@etu.univ-tours.fr](mailto:noe.pecault@etu.univ-tours.fr)]

Encadrant(s)

**Nicolas Monmarché**

[[nicolas.monmarche@univ-tours.fr](mailto:nicolas.monmarche@univ-tours.fr)]

**Polytech Tours**  
**Département Informatique**

Ce document a été formaté selon le format EPUProjetDi.cls (N. Monmarché)

École Polytechnique de l'Université de Tours  
64 Avenue Jean Portalis, 37200 Tours, France  
<http://www.polytech.univ-tours.fr>