

# Compte-rendu du projet pluridisciplinaire

Étude du comportement collectif et d'évitement d'obstacles  
dans un essaim

Adrien PANGUEL, Ahlam KHAZZAR, Alain MOUAWAD,  
Kareem ABI KAEDBEY, Karim HECHEIME, Roger DACCACHE

12/19/2024

FIGURE 1 – Wildebeest swarming through rough terrain

FIGURE 2 – Different pedestrian swarms crossing intersection in different directions

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
1.1	Objectif du premier modèle : . . . . .	4
1.2	Objectif du second modèle : . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Cadrage du sujet</b>	<b>4</b>
2.1	Contexte général, développements historiques . . . . .	4
2.1.1	Éléments d'histoire des sciences et des techniques . . .	5
2.1.2	Contexte et enjeux sociétaux . . . . .	5
2.2	Objectifs du travail et étude dans ce projet . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Démarche suivie et analyse du code</b>	<b>5</b>
3.1	Création des agents et initialisation de l'environnement . . . .	5
3.2	Définition des règles comportementales . . . . .	6
3.3	Simulation dynamique . . . . .	7
3.4	Analyse et extensions potentielles . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Objectifs des modélisations</b>	<b>9</b>
4.1	Comprendre les dynamiques des groupes et des essaims . . . .	9
4.2	Analyser les interactions avec l'environnement . . . . .	9
4.3	Appliquer les résultats à des cas concrets . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Résultats et interprétations</b>	<b>9</b>
5.1	Observations . . . . .	9
5.2	Commentaires . . . . .	10
5.3	Aspects sécurité informatique . . . . .	10
5.3.1	Sécurisation des données . . . . .	10
5.3.2	Protection contre les cyberattaques . . . . .	10
5.3.3	Gestion des erreurs et des défaillances . . . . .	11
5.3.4	Sécurité des communications . . . . .	11
5.3.5	Conformité aux régulations . . . . .	11
5.4	Aspects environnementaux . . . . .	11
5.4.1	Absence de consommation de ressources physiques . . .	11
5.4.2	Impact indirect lié à l'infrastructure informatique . . .	12
5.4.3	Modélisation virtuelle d'environnements complexes . .	12
5.4.4	Réduction des besoins expérimentaux physiques . . . .	13
5.4.5	Potentiel de réduction de l'empreinte écologique . . . .	13
5.5	Aspects organisationnels . . . . .	13
5.5.1	Définition des agents et clarification des objectifs . . .	14

5.5.2	Révision fréquente des objectifs à mesure de l'avancée du projet . . . . .	14
5.5.3	Révision fréquente des objectifs à mesure de l'avancée du projet . . . . .	14
5.5.4	Collaboration et communication régulière . . . . .	15
5.5.5	Gestion du temps et des ressources . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>Crédits et références</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>Annexe</b>	<b>16</b>

# Étude du comportement collectif et d'évitement d'obstacles dans un essaim

## 1 Introduction

L'objectif de ce projet est d'analyser le comportement collectif d'un essaim d'agents en interaction. Nous cherchons à comprendre comment les règles locales influencent la structure et les mouvements d'un groupe d'agents, et comment ces agents évitent les obstacles, tels que les prédateurs. Nous avons développé avec l'outil NetLogo une série de comportements locaux pour les agents comme la cohésion, l'alignement, la séparation et l'évitement. Le but final est d'examiner comment ces comportements influencent l'ensemble du groupe dans des environnements complexes.

### 1.1 Objectif du premier modèle :

Notre objectif est d'étudier le mouvement de foule, en particulier dans le cadre de l'évacuation d'une bibliothèque. Nous prendrons comme exemple la bibliothèque L1 de notre université. L'objectif principal est, bien évidemment, de refléter le comportement optimal en vue de garantir la survie du plus grand nombre de personnes et d'assurer une évacuation la plus rapide possible.

### 1.2 Objectif du second modèle :

L'objectif de ce deuxième modèle vise à analyser le comportement collectif d'un essaim d'agents en interaction, en se focalisant sur les impacts des règles individuelles sur la structure et les mouvements globaux. En particulier, tout comme pour la première modélisation, on souhaite étudier la capacité des essaims à maintenir leur cohésion tout en évitant les obstacles et les menaces, comme des prédateurs.

## 2 Cadrage du sujet

### 2.1 Contexte général, développements historiques

Ce projet s'inscrit dans une longue tradition d'études des comportements collectifs, inspirée des systèmes biologiques et des essaims d'animaux. L'idée de modéliser ces comportements a émergé à la suite des travaux de chercheurs comme Craig W. Reynolds, qui a introduit le concept de "boids", un modèle de simulation de vol en essaims.

### 2.1.1 Éléments d’histoire des sciences et des techniques

Les premiers travaux sur les comportements collectifs remontent à des études en biologie comportementale. Cependant, c’est dans les années 1980 que les scientifiques ont commencé à appliquer ces concepts à des systèmes informatiques et à la robotique. [étoffer ce point, références, etc...](#)

### 2.1.2 Contexte et enjeux sociétaux

Les applications pratiques de l’étude des comportements collectifs sont nombreuses. Elles incluent la robotique, la gestion des foules, ainsi que des domaines tels que l’écologie et la biologie des populations animales. Les modèles d’essaim peuvent aussi être utilisés dans la gestion de flux de transport et dans des systèmes autonomes. [Est-ce qu'il y a des enjeux en lien avec l'essor de la surveillance algorithmique ? \(JO, etc ...\)](#)

## 2.2 Objectifs du travail et étude dans ce projet

L’objectif principal de ce projet est de comprendre comment les agents se déplacent dans un environnement complexe tout en maintenant une cohésion de groupe. Nous souhaitons également tester la résistance de ces groupes face à des menaces, comme des prédateurs, et évaluer leur capacité à éviter des obstacles.

[Enjeu: aussi tester des outils de modélisation.](#)

## 3 Démarche suivie et analyse du code

### 3.1 Création des agents et initialisation de l’environnement

[important: mettre le code \(ou des liens\) en annexe.](#)

Modèle 1 :

Notre étude du modèle 1 se divise en deux parties distinctes :

#### 1.Mouvement de foule intelligent dans un environnement connu

Dans cette première partie, nous analysons le comportement des agents évoluant dans un environnement qu’ils connaissent bien : la bibliothèque universitaire L1 (BU L1). Tous les agents possèdent une connaissance préalable du trajet optimal pour atteindre la sortie. Cela permet de modéliser un mouvement de foule dit ”intelligent”, où chaque individu suit un chemin rationnel et préétabli. Ils auront aussi un comportement particulier entre eux : des personnes seront patientes, et d’autres impatientes.

## 2. Étude de l'évacuation directement devant la sortie

Cette deuxième partie se concentre sur une situation plus spécifique, cela permettra une meilleure visualisation du phénomène de blocage.

**Modèle 2 :** Dans ce texte, bien expliquer si ces 2 modèles sont reliés, ou si il s'agit de deux études distinctes.

Pour débiter, nous avons défini deux types principaux d'agents :

- Les poissons : Modélisés par de simples flèches, ils interagissent avec leurs voisins selon des règles locales de mouvement et forment la structure principale de l'essaim.
- Le prédateur : Il représente une menace mobile, simulée pour tester la capacité d'évitement des poissons, et il est déplacé avec le curseur de la souris.

L'environnement est initialisé avec un nombre configurable de poissons, positionnés aléatoirement, et un prédateur contrôlé par l'utilisateur à l'aide de la souris. Chaque agent possède des propriétés spécifiques :

- Les poissons ont des voisins identifiés comme *flockmates* et un *nearest-neighbor*, et obéissent à des règles comportementales locales.
- Le prédateur influence directement par sa position les trajectoires des poissons.

## 3.2 Définition des règles comportementales

**Modèle 1 :**

Nos agents possèdent tous une même caractéristique qu'on qualifie de comportement intelligent. Ils peuvent tous prendre le meilleur chemin possible, qui leur ai donné en temps réel. De plus, les agents disposent de deux types de comportement : patient et impatient. On définit au préalable le nombre de personne qui auront chacun de ses comportement.

- **Comportement patient** : Les agents dits 'patients' disposeront d'une jauge de patience, définie avant le lancement de la simulation. Contrairement à d'autres agents, ils ne tenteront pas de bousculer ou de traverser les obstacles, y compris les autres agents. Lorsqu'ils rencontrent un autre agent, ils patienteront pendant une durée spécifique, déterminée par leur jauge de patience, avant d'essayer de le contourner."
- **Comportement impatient** : Ces agents n'hésitent pas à se bousculer les autres agents devant eux et avancer sans attendre pour sortir, pouvant leur faire du mal jusqu'à causer leur mort.

## Modèle 2 :

Nous avons implémenté plusieurs comportements pour les poissons :

- Cohésion : Les poissons se rapprochent de leurs voisins pour maintenir une structure de groupe.
- Alignement : Ils ajustent leur direction pour suivre la moyenne des directions de leurs voisins.
- Séparation : Ils s'éloignent des voisins trop proches afin d'éviter des collisions.
- Fuite : Lorsqu'un prédateur est détecté, les poissons s'éloignent dans la direction opposée pour éviter une menace.

Ces comportements reposent sur des calculs géométriques, tels que les distances et les angles, pour déterminer les interactions locales et guider les mouvements.

## 3.3 Simulation dynamique

### Modèle 1 :

Les procédures principales sont :

- **setup** : Cette procédure initialise les obstacles, pose les agents, donne une position de départ au feu. Ce bouton modélise donc la BU des L1 rempli, juste avant le début de la propagation du feu.
- **go** : Elle met à jour la position des agents et le feu à chaque tick, les faisant avancer dans une direction dépendement de leur position pour arriver à la sortie.
- **population** : Contrôle le nombre de personnes dans la bibliothèque.
- **death-counter/free-counter** : Contrôle le nombre de personnes dans la bibliothèque.
- **nb-sorties** : Permet de choisir entre 1 ou 2 sorties .
- **patientes/impatientes** : Contrôle le nombre de personnes patientes et impatientes.
- **patience** : Permet de définir le taux de patience des agents patients.

Ainsi, il est possible de simuler l'évacuation de la bibliothèque L1 tout en changeant les paramètres directement grâce à ces boutons.

## Modèle 2 :

Deux procédures principales orchestrent la simulation :

- **setup** : Cette procédure initialise l'environnement en plaçant les poissons et le prédateur dans des positions aléatoires.
- **go** : Elle met à jour les comportements et les positions des agents à chaque tick.

Les poissons combinent les règles comportementales pour ajuster leur mouvement en douceur, tandis que le prédateur, contrôlé par la souris, sert à tester les capacités d'évitement de l'essaim.

[Ajouter un paragraphe pour expliquer / décrire l'outil informatique utilisé.](#)

## 3.4 Analyse et extensions potentielles

### Modèle 1 :

En outre, bien que le mouvement des personnes puisse être qualifié d'intelligent, dans la mesure où elles empruntent généralement un chemin quasi optimal, ce processus demeure perfectible. De plus, les comportements patient et impatient pourraient être davantage détaillés afin de mieux refléter les réactions réelles des individus lors d'une évacuation. Il est important de souligner que le comportement humain ne se limite pas à ces deux catégories : d'autres comportements peuvent également être envisagés. Par ailleurs, les individus peuvent présenter des caractéristiques variées telles que l'âge, la force ou la vitesse, qui influent sur leur manière d'agir dans une situation d'urgence.

### Modèle 2 :

Nous avons observé que les comportements locaux influencent directement la structure globale de l'essaim :

- Une faible cohésion entraîne des essaims dispersés, tandis qu'une forte cohésion favorise des groupes compacts.
- La présence d'un prédateur ou d'obstacles perturbe ces structures, mais l'essaim conserve une certaine organisation, montrant sa robustesse.

Pour aller plus loin, nous envisageons d'ajouter :

- Des obstacles fixes pour simuler des environnements complexes.
- Une analyse comparative entre des mesures métriques, les distances physiques, et des mesures topologiques comme le nombre de voisins considérés.



## 4 Objectifs des modélisations

### 4.1 Comprendre les dynamiques des groupes et des essaims

- Étudier les interactions locales et leurs effets sur la formation d'ensembles organisés, comme les lignes ou les nuages.
- Observer l'émergence de structures stables ou chaotiques.
- Explorer les effets des rétroactions locales sur les dynamiques globales.

### 4.2 Analyser les interactions avec l'environnement

- Simuler des scénarios d'évitement d'obstacles, fixes ou mobiles, pour évaluer l'efficacité des règles comportementales.
- Explorer l'impact des paramètres individuels tels que le rayon de vision ou les seuils de séparation sur l'organisation globale.
- Comparer les stratégies basées sur des distances métriques et topologiques.

### 4.3 Appliquer les résultats à des cas concrets

Les applications possibles incluent :

- Robotique collaborative : Essaims de robots autonomes pour des missions de recherche ou de sauvetage.
- Biologie et écologie : Simulation des migrations animales ou des réactions face au prédateur.
- Transports et gestion de flux : Optimisation des mouvements de foules ou des convois de véhicules autonomes.
- Systèmes distribués : Développement d'algorithmes inspirés des comportements d'essaim.

## 5 Résultats et interprétations

### 5.1 Observations

#### Modèle 1

Nous constatons tout d'abord que le nombre de sorties joue un rôle crucial lorsque le nombre de personnes présentes dans la bibliothèque est élevé. Par

ailleurs, quel que soit le comportement des individus — patient ou impatient —, il n'est jamais optimal d'avoir une homogénéité complète de l'un ou l'autre comportement.

## Modèle 2

- Les poissons forment des essaims cohérents et capables de réagir collectivement à des menaces.
- L'évitement du prédateur modifie la trajectoire globale, créant des zones de dispersion temporaires.
- Les variations des paramètres locaux influencent fortement les comportements globaux, comme la densité de l'essaim ou sa capacité à éviter les obstacles.

## 5.2 Commentaires

Les résultats montrent que des règles simples peuvent produire des comportements complexes, mais des ajustements supplémentaires sont nécessaires pour simuler des environnements encore plus complexes.

les objectifs définis en 4 sont ils remplis ?

## 5.3 Aspects sécurité informatique

La simulation a été développée dans un environnement sécurisé, mais des considérations supplémentaires sont nécessaires pour intégrer ce modèle dans des applications réelles. En d'autres termes, bien que la simulation ait été développée dans un environnement contrôlé et sécurisé, il est important de prendre en compte plusieurs aspects techniques et de sécurité pour adapter ce modèle à des applications réelles. Voici quelques exemples de ces considérations : trop long....

### 5.3.1 Sécurisation des données

Si le modèle était utilisé dans des applications réelles, notamment dans des systèmes impliquant des données sensibles ou personnelles, par exemple, dans la robotique collaborative ou la gestion des foules, il serait nécessaire d'implémenter des mécanismes de protection des données, tels que le chiffrement et l'anonymisation.

### 5.3.2 Protection contre les cyberattaques

Dans un environnement réel, le modèle pourrait être exposé à des risques de cyberattaques, comme des tentatives de manipulation des agents ou des

systèmes de commande. Il serait donc essentiel d'ajouter des protocoles de sécurité pour éviter toute interférence malveillante. **bof ...**

### 5.3.3 Gestion des erreurs et des défaillances

Dans un système en production, il est nécessaire de prévoir des mécanismes de récupération d'erreurs, de surveillance en temps réel et de gestion des pannes. Cela garantirait que le système reste fonctionnel même en cas d'incident technique. **trop général**

### 5.3.4 Sécurité des communications

Si le modèle devait être déployé sur plusieurs agents interconnectés, il serait crucial de sécuriser les canaux de communication pour éviter des fuites d'informations ou des attaques de type "man-in-the-middle". **idem ...**

### 5.3.5 Conformité aux réglementations

Selon le domaine d'application (par exemple, robotique ou gestion des foules), des normes et réglementations de sécurité spécifiques doivent être respectées. Cela inclut, par exemple, des exigences sur la sécurité des systèmes autonomes ou des règles de sécurité informatique pour les infrastructures critiques. **lesquelles?**

En résumé, les considérations supplémentaires font référence à la prise en compte de ces défis de sécurité pour que le modèle puisse être utilisé de manière fiable et sécurisée dans des situations réelles.

## 5.4 Aspects environnementaux

L'impact environnemental de ces simulations est faible, car elles sont purement informatiques et n'affectent pas directement le monde réel. Les modèles développés dans le cadre de ce projet sont basés uniquement sur des calculs informatiques et des simulations numériques, ce qui signifie qu'ils n'interagissent pas directement avec l'environnement physique ou naturel. Voici quelques points pour clarifier cette idée : **inutile de trop développer...**

### 5.4.1 Absence de consommation de ressources physiques

Les simulations, comme celles créées avec NetLogo, n'impliquent pas de processus industriels ou de consommation directe de ressources naturelles. Elles sont confinées à des environnements virtuels, ce qui les distingue des

processus réels qui pourraient nécessiter de l'énergie pour la fabrication, le transport, ou la gestion des matériaux. Ainsi, l'impact environnemental direct comme les émissions de gaz à effet de serre ou la consommation de ressources naturelles est pratiquement inexistant.

#### 5.4.2 Impact indirect lié à l'infrastructure informatique

*trop long, trop général.*

Même si la simulation elle-même n'a pas d'impact direct sur l'environnement, il est important de considérer l'infrastructure informatique nécessaire pour exécuter ces modèles. Les serveurs, ordinateurs et centres de données utilisés pour effectuer les calculs et stocker les données consomment de l'énergie et peuvent avoir un impact environnemental indirect. Cela inclut :

- La consommation d'énergie : Les serveurs utilisés pour les simulations numériques consomment de l'électricité. Si cette énergie provient de sources non renouvelables, elle peut contribuer aux émissions de CO<sub>2</sub>.
- La fabrication et le recyclage des équipements électroniques : Les ordinateurs et serveurs utilisés dans les simulations ont un cycle de vie qui inclut la production, l'utilisation et, à terme, le recyclage ou la mise au rebut. La fabrication de ces équipements peut entraîner une empreinte carbone et une consommation de ressources naturelles comme les métaux, plastiques et autres.
- L'utilisation de l'Intelligence Artificielle : L'utilisation d'outils d'assistance à la recherche et au développement, tels que ChatGPT, engendre une pollution numérique non négligeable en raison des ressources énergétiques nécessaires à leur fonctionnement. Cette réalité soulève la nécessité d'une utilisation plus raisonnée et contrôlée, afin de minimiser leur impact environnemental tout en maximisant leur efficacité dans le cadre des projets.
- Systèmes distribués : Développement d'algorithmes inspirés des comportements d'essaim.

#### 5.4.3 Modélisation virtuelle d'environnements complexes

L'un des avantages des simulations informatiques est qu'elles permettent de tester et d'expérimenter des scénarios dans un environnement virtuel sans avoir besoin d'interventions physiques. Par exemple, les simulations de mouvements d'essaims ou de comportements collectifs peuvent être utilisées pour prédire et optimiser des processus dans le monde réel comme l'évitement des obstacles dans le trafic ou la gestion de la migration animal) sans perturber l'environnement réel ou utiliser des ressources physiques. Cela réduit

*Décrire de vrais exemples, les inclure dans le paragraphe de mise en contexte du projet.*

le besoin de tests en conditions réelles qui, eux, peuvent avoir un impact environnemental plus direct.

#### 5.4.4 Réduction des besoins expérimentaux physiques

En permettant de simuler des comportements complexes dans des environnements virtuels, le recours à des simulations peut réduire le besoin d'expérimentations physiques qui peuvent avoir des conséquences environnementales. Par exemple, *quels exemples ?* au lieu de mener des expériences sur le terrain ou de construire des prototypes réels pour observer le comportement d'un essaim de robots, la simulation numérique offre une alternative qui permet de tester de nombreux scénarios sans consommation de ressources physiques ou génération de déchets.

#### 5.4.5 Potentiel de réduction de l'empreinte écologique

À terme, l'application des concepts étudiés dans ce projet pourrait contribuer à des domaines où l'optimisation des comportements collectifs a des avantages environnementaux. Par exemple, dans le domaine de la gestion des flux de trafic ou des systèmes de transport autonomes, l'application de ces modèles pourrait aider à réduire les embouteillages, optimiser les trajets et ainsi réduire les émissions de CO<sub>2</sub> liées au transport.

*Optimiser conduit en général à augmenter les émissions (notion d'effet rebond)*  
En résumé, bien que l'impact environnemental de la simulation elle-même soit faible, il est important de tenir compte de l'infrastructure technologique et énergétique nécessaire pour faire tourner ces modèles. Cependant, les avantages potentiels de l'utilisation de ces simulations, en termes de réduction de la consommation de ressources physiques dans les tests et d'optimisation de processus dans le monde réel, peuvent compenser largement leur faible impact direct.

### 5.5 Aspects organisationnels

Le projet a été mené de manière structurée avec des étapes claires. De la définition des agents à l'analyse du comportement des agents selon les règles qui prédéfinissent le comportement, une clarification fréquente des objectifs était constamment requise. En effet, chaque observation nous a mené à repousser les limites de notre étude pour analyser d'autres comportements liés à la modification de l'environnement.

Dans le cadre du projet, les aspects organisationnels ont été essentiels pour assurer une progression fluide et cohérente tout au long du développement de la simulation. Voici une explication plus détaillée de ce que cela implique et de la façon dont cela a influencé l'avancée du projet :

#### 5.5.1 Définition des agents et clarification des objectifs

Au début du projet, il a été crucial de définir de manière précise et détaillée les types d'agents impliqués dans la simulation. Expliciter un peu

#### 5.5.2 Révision fréquente des objectifs à mesure de l'avancée du projet

L'un des aspects organisationnels majeurs a été de maintenir un suivi rigoureux du projet. Chaque phase d'observation a permis de réajuster les objectifs et de tester de nouveaux comportements ou de nouvelles configurations. Dans ce cas, il s'agissait principalement des humains pour le modèle 1, et des poissons et du prédateur dans le modèle 2. Il nous fallait aussi définir des comportements spécifiques associés à chaque type d'agent comme la cohésion, l'alignement, et la séparation. La structuration de ces étapes a permis de garantir une compréhension claire des éléments fondamentaux avant de se lancer dans la simulation proprement dite.

Tout au long du projet, il était indispensable de revisiter ces objectifs régulièrement pour s'assurer que les règles comportementales définies pour chaque agent étaient pertinentes par rapport aux buts de la simulation. Cela a permis d'éviter les dérives ou les malentendus qui pourraient compromettre la qualité de la modélisation. Une clarification constante des objectifs a été nécessaire pour éviter toute confusion dans l'implémentation des comportements et pour adapter les agents aux conditions changeantes de l'environnement de simulation. C'est flou...

#### 5.5.3 Révision fréquente des objectifs à mesure de l'avancée du projet

L'un des aspects organisationnels clés a été la flexibilité du projet, où chaque étape de développement a permis de tirer des enseignements qui ont entraîné des ajustements dans la direction de la simulation. Par exemple, dès que de nouveaux comportements ont été testés, de nouvelles questions sont apparues concernant l'impact de l'environnement ou des changements dans les interactions entre agents. Cela a souvent amené à repousser les limites de l'étude initiale et à élargir le champ des objectifs, en analysant d'autres exemple? Tout ceci est très général....

comportements ou en modifiant les paramètres de l'environnement comme l'ajout d'obstacles, ou la gestion de la présence d'un prédateur.

Cette réévaluation régulière a contribué à affiner la modélisation et à l'adapter à des besoins et objectifs en constante évolution, en fonction des observations réalisées durant les simulations.

#### 5.5.4 Collaboration et communication régulière

La communication entre les membres du projet constitue une facette essentielle pour son bon déroulement. Que ce soit pour discuter de la mise en œuvre des règles comportementales, de l'impact de certains paramètres ou pour partager les résultats des simulations, des échanges réguliers étaient nécessaires afin que chaque membre reste aligné sur les objectifs et les modifications apportées au modèle. Cependant, plusieurs lacunes ont été identifiées : les échanges manquaient parfois de spontanéité, se limitant souvent à des réunions planifiées, et l'implication des membres était inégale, certains étant moins engagés dans les discussions, ce qui réduisait la diversité des idées proposées. De plus, le suivi des décisions prises était insuffisant, entraînant des malentendus ou des retours en arrière, et l'utilisation des outils numériques disponibles, tels que les messageries instantanées ou plateformes collaboratives, était dispersée et peu structurée, compliquant le suivi des conversations importantes. Ces lacunes soulignent la nécessité d'améliorer notre approche en centralisant les outils de communication, en favorisant des échanges plus informels pour encourager la spontanéité, et en répartissant mieux les responsabilités afin de garantir une participation active et équitable de tous les membres..

**trop général... il faut des exemples basés sur votre expérience**

#### 5.5.5 Gestion du temps et des ressources

Le projet a également nécessité une gestion efficace du temps et des ressources disponibles. Chaque phase de développement, qu'il s'agisse de la définition des comportements ou de l'analyse des résultats, a dû être planifiée pour maximiser l'efficacité. C'est ici où nous avons eu le plus du mal, le temps attribué à chaque étape était assez irrégulier et flou. Nous avons perdu beaucoup de temps à essayer d'accomplir une tâche précise qui c'est avéré inutile, au lieu de passer à autre chose. Une meilleure gestion du temps aurait permis d'assurer la réalisation des étapes plus critiques dans les délais, tout en laissant suffisamment de marge pour l'expérimentation et la révision du modèle, ce qui est souvent essentiel dans les projets de simulation. Cependant, nous avons réussi à nous adapter, rendant la réalisation du

modèle numéro 2 beaucoup plus rapide. L'organisation de ce deuxième modèle a suivi un processus flexible et évolutif, où la révision constante des objectifs, l'ajustement des comportements des agents, et la prise en compte des nouvelles observations ont permis de construire un modèle solide.

Il manque un paragraphe sur l'utilisation des outils IA, avec retour critique, évaluation des potentiels, etc....

## 6 Conclusion

Ce travail démontre où est la démonstration? que des comportements individuels simples peuvent conduire à des comportements collectifs cohérents et efficaces. Ces résultats sont applicables dans des domaines comme la robotique, l'écologie et la gestion des flux, et ouvrent la voie à des recherches futures sur l'adaptation et l'évitement dans des environnements plus complexes.

## 7 Crédits et références

Les références bibliographiques incluent les travaux de Reynolds (1987) sur le modèle "boids" et d'autres études pertinentes dans le domaine des systèmes multi-agents, ainsi que ceux de M. Ballerini et al avec "Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance : Evidence from a field study", PNAS, Vol 105, No 4, Jan 2008, pp1232-1237.

Il faut absolument développer ces références.

## 8 Annexe

Le code NetLogo utilisé pour ce projet est disponible pour toute consultation ou extension future.