

- 3ème Année **FILÈRE INGÉNIEUR** -

# RAPPORT de STAGE DE PROFESSIONNALISATION

Stage de fin d'études  
*Conception d'un environnement de simulation  
écologiquement valide pour agents autonomes*

*Présenté par*  
Younès RABII

Effectué auprès de  
**l'Institut National de Recherche  
en Informatique et Automatique**



**au sein de l'équipe FLOWERS**

*sous la supervision de*  
M. Clément Moulin-Frier

---

- Septembre 2020 -

## Résumé

Ce stage s'est déroulé à l'Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA), au sein de l'équipe FLOWERS. Il a constitué en la conception et le développement d'un environnement de simulation sous un paradigme écologiquement valide.

**Mots-clefs:** Intelligence Artificielle, Machine Learning, Simulation, Biologie, Écologie

## Abstract

This internship took place at the National Institute for Research in Computer Science and Automation (INRIA), within the FLOWERS team. It consisted of the design and development of a simulation environment under an ecologically valid paradigm.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Machine Learning, Simulation, Biology, Ecology

## Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné durant ce stage et qui ont contribué à son bon déroulement:

- Clément Moulin-Frier, pour sa guidance et son écoute
- Mme Eyraud-Dubois, pour son suivi
- Les membres de l'équipe FLOWERS pour nos passionnants échanges
- Michaël Garcia Ortiz, pour notre collaboration fructueuse
- J.P. pour son soutien

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>1</b>
<b>Table des matières</b>	<b>2</b>
<b>I – Fiche récapitulative du stage</b>	<b>4</b>
<b>II - Introduction</b>	<b>6</b>
<b>III - Présentation de l'ENSC et de la Cognitique</b>	<b>7</b>
<b>IV - Présentation de l'équipe FLOWERS et de ses objectifs</b>	<b>8</b>
<b>V - Analyse de la problématique</b>	<b>9</b>
Problématique de recherche	9
Organisation du travail	9
Précision des besoins techniques	11
<b>VI - Réalisations</b>	<b>16</b>
Comparatifs des environnements existants	16
Critères d'étude	16
Table comparative	17
Choix d'environnement et collaboration externe	18
Prise en main et tests de performances	20
Développement d'un Senseur Géométrique	22
Développement des Comportement Types "Véhicule de Braitenberg"	24
Conception d'une preuve de concept expérimentale	27
Cadre expérimental	27
Premiers résultats	30
Planning effectif	31
<b>VII - Impact socio-économique du projet</b>	<b>32</b>
<b>VIII - Analyse des Enjeux de Développement Durable et de Responsabilité Sociétale</b>	<b>33</b>
Exemple d'initiative en interne	33
Exemple d'initiative externe	33
<b>IX - Conclusion</b>	<b>35</b>
<b>X - Glossaire</b>	<b>36</b>

<b>XI - Bibliographie</b>	<b>37</b>
<b>XII - Annexes</b>	<b>38</b>
Définition d'une simulation Écologiquement Valide	38
Analyse des besoins & Schéma de conception	39
Ecological Validity	39
Multi-Agent RL	40
An Ecological & Multi-Agent Environment...	41
...Plus a Research Tool	42
Design Patterns	42
Capteur de Braitenberg, Plan Algorithmique	44

## I – Fiche récapitulative du stage

### Année de formation

1<sup>ère</sup> année ☐

2<sup>ème</sup> année ☐

3<sup>ème</sup> année ☒

### Entreprise et/ou lieu de stage

Centre de Recherche Inria Bordeaux - Sud-Ouest  
Talence, France

### Tuteur entreprise :

M. Clément Moulin-Frier

### Enseignant-référent ENSC :

Mme. Coralie Eyraud-Dubois

**Sujet :** Conception d'un environnement de simulation écologiquement valide pour agents autonomes

**Date de début :** 10 février 2020

**Durée (en semaine) :** 21 semaines

**Pour les stages effectués en 2020**

**Situation liée à la situation sanitaire de la COVID 19**

**Télétravail** : oui ☒ non ☐

Si télétravail,

- Période(s) : 13 Mars 2020 jusqu'au 10 Juillet 2020 (fin du stage)
- Condition matériel (ordinateur, réseau, etc.) :
  - prêt matériel par l'entreprise ☐
  - matériel personnel ☒
- Contact avec l'entreprise pendant le télétravail :
  - ☐ Journalier ☐
  - ☐ Hebdomadaire ☒
  - ☐ Selon les besoins ☒
  - ☐ Autres à préciser :
- Le sujet a-t-il été modifié ? oui ☐ non ☒

**Interruption de stage** (pour les 3A) :

oui ☐ non ☒

## II - Introduction

*Les éléments de lexique suivis d'une astérisque (\*) sont définis dans le glossaire mis à disposition en fin de document.*

Le grand but de la recherche en Intelligence Artificielle est de pouvoir émuler les capacités de l'intelligence humaine par des processus autonomes. La recherche actuelle dans le domaine se concentre en très grande majorité sur l'étude des structures cognitives que l'on retrouve chez les êtres vivants, notamment celles liées à l'apprentissage de nouvelles compétences. Ces travaux se focalisent surtout sur la simulation de ces mécanismes d'apprentissage, tandis que très peu n'explorent la manière dont ces mécanismes ont émergés dans notre environnement naturel il y a des milliards d'années.

Ce stage s'inscrit dans la volonté de l'équipe FLOWERS d'étendre le champ des recherches en Machine Learning (\*) et d'étudier des notions qui mêlent étroitement sciences comportementales, biologie, écologie et sciences computationnelles. Le but est de défricher ces questions en créant un outil d'exploration des interactions entre les caractéristiques d'un environnement naturel et le comportement des agents qui y résident.

L'objectif global du stage est de concevoir un environnement de simulation qui possède des dynamiques proches de celles que l'on trouve dans des environnements naturels -- cette propriété centrale aux travaux présentés est appelée "**Validité Écologique**" (\*).

Ce rapport détaille le processus qui a permis la conception d'un environnement de simulation écologiquement valide. Il débute par la précision des besoins exprimés par le tuteur, expose l'organisation adoptée pour les satisfaire en fonction des ressources disponibles, détaille le processus de développement, décrit la réaction face aux imprévus rencontrés et enfin présente les capacités de la preuve de concept élaborée.

### **III - Présentation de l'ENSC et de la Cognitique**

Composée des termes « cognition » et « automatique », la cognitique peut être décrite comme la discipline qui étudie la conception de systèmes adaptés à, et inspirés par les capacités cognitives humaines.

L'Ecole Nationale Supérieure de Cognitique de Bordeaux, est la première école qui forme des ingénieurs cogniticiens. Dans son cursus, elle met l'accent sur l'enseignement de méthodes de conception de systèmes soutenues par le savoir technique nécessaire pour les développer et enrichie par des connaissances sur l'Humain pour les guider.

Celles et ceux qui suivent ce parcours ont une formation pluridisciplinaire, qui leur permet d'aborder des problématiques industrielles complexes sous des angles complémentaires.



## IV - Présentation de l'équipe FLOWERS et de ses objectifs



*Fig 1: Logo de L'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique*

L'INRIA est un établissement public qui a pour mission la le développement de la recherche et de la valorisation en sciences et techniques de l'information et de la communication. Ses centres sont implantés dans plusieurs grandes villes du territoire français, dont celui de Bordeaux, lieu du stage.

En son sein, l'équipe FLOWERS étudie les mécanismes qui permettent aux robots et aux humains d'accumuler des nouvelles compétences sur différentes périodes de temps. Elle est organisée autour de deux grands axes de recherche: l'Intelligence Artificielle et les Sciences Cognitives.

Ce stage s'inscrit dans la lignée des travaux du chercheur Clément Moulin-Frier, qui s'inspire de la façon dont l'apparition des capacités cognitives des êtres vivants ont été influencées par les environnements dans lesquelles elles évoluent. L'objectif global du stage est de concevoir un environnement de simulation qui possède des dynamiques proches de celle des environnements naturels, et d'étudier la façon dont ces dynamiques influencent celles des agents virtuels qui y résident.

## V - Analyse de la problématique

### Problématique de recherche

En Machine Learning\*, les agents autonomes acquièrent de nouvelles compétences en s'entraînant dans un environnement de simulation virtuel. Plusieurs travaux de recherches se concentrent sur les structures d'apprentissage internes à un agent, et peu discutent de l'insertion des agents dans leurs environnements. Mon tuteur souhaitait s'inspirer des travaux anthropologiques sur la manière dont nos environnements naturels ont façonné la cognition humaine [1,2] afin d'étudier la façon dont les dynamiques d'un environnement virtuel peuvent influencer le comportement des agents.

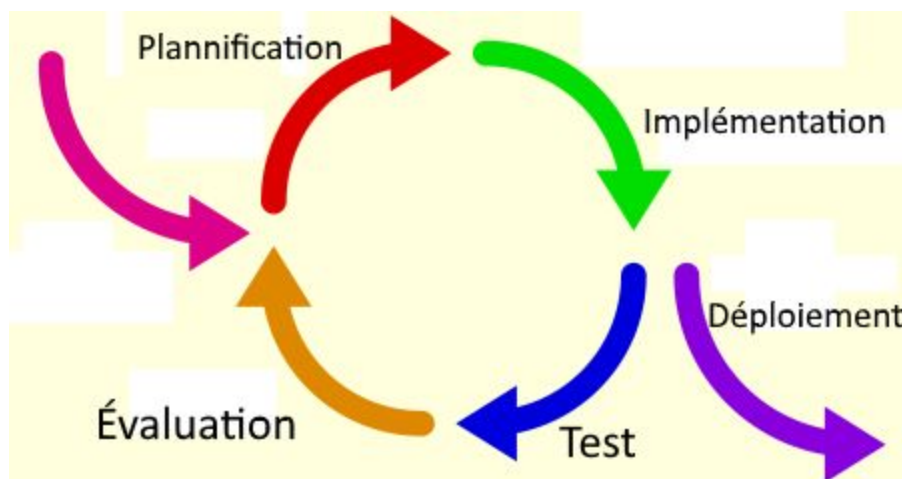
Son objectif est d'avoir un environnement virtuel avec des caractéristiques similaires à celles d'un environnement naturel, et de pouvoir y observer l'apparition de comportements intéressants chez des groupes d'agents qui évoluent en son sein. Des mouvements de foules ou de la formation de troupeau, par exemple.

### Organisation du travail

Avec le tuteur, nous avons réparti notre budget de 21 semaines en 4 grandes étapes pour ce projet:

- **Recherches Initiales:** Où l'on étudie la littérature du Renforcement Learning\* Multi-Agent\*, ainsi que l'état de l'art en termes d'environnements de simulation. Ce temps est aussi utilisé pour préciser les objectifs et les spécifications du projet.
- **Développement de notre environnement:**  
Cette étape est constitué de l'ensemble de nos cycles de développements sur l'environnement final. J'ai adopté une méthodologie usuelle en développement logiciel,

celle du Développement Incrémental [3] qui consiste à itérer plusieurs cycles de conception selon le modèle suivant:



Elle est particulièrement adaptée dans notre contexte car sa souplesse permet de redéfinir les spécifications du projet en cours de route, par exemple lorsque l'on rencontre des problèmes d'implémentations qui demandent trop de ressources pour être adressés. Ce cas de figure est courant dans la recherche en informatique et il s'est effectivement manifesté durant le stage. De plus, elle permet de décider qu'un aspect initialement sous-estimé du projet devrait prendre une place bien plus importante, et donc de mettre en valeur les découvertes faites au cours du processus de recherche.

- **Mise en place d'une expérience:** Nous souhaitons concevoir une preuve de concept (*proof of concept*) qui permet de tester le fonctionnement de l'environnement ainsi que de mettre en évidence les points intéressants d'une approche écologiquement valide, tout en révélant les limites de notre implémentation.
- **Analyse des résultats:** Ce temps est dédié à l'analyse détaillée des résultats de notre approche, pour en faire ressortir les aspects intéressants tout en jugeant les points de perfectionnement possible.

Mois	FEVRIER			MARS				AVRIL				MAI				JUIN				JUILLET	
Semaine n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Recherches initiales																					
Développement de notre environnement																					
Mise en place d'une expérience																					
Analyse des résultats																					

Fig 2: Répartition prévisionnelle du temps au cours du projet

## Précision des besoins techniques

La première étape que j'ai mise en place durant ce projet a été de partir des souhaits exprimés par mon tuteur, et de les clarifier pour les transformer en besoins techniques plus clairs qui serviront de référence durant nos choix de conception futurs.

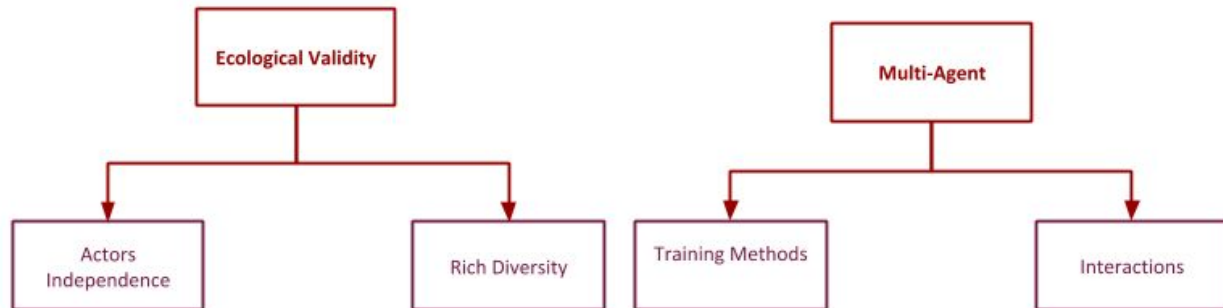
*Cette sous-partie présente une version abrégée du document final produit, disponible en annexe.*

Après quelques entretiens non-directifs, j'ai commencé par expliciter les paradigmes fondamentaux du projet: concevoir un **Environnement de Recherche** (1) **Multi-Agent** (2) et **Écologiquement Valide** (3). Ces concepts étant cruciaux pour comprendre l'objectif du stage, ils seront explicités ici:

1. **Environnement de Recherche:** Un outil de recherche qui peut être utilisé pour mener des expériences diverses au sein de l'équipe FLOWERS, mais potentiellement aussi pour d'autres chercheurs.
2. **Multi-Agent:** L'environnement doit pouvoir contenir un grand nombre d'agents virtuels simultanément.
3. **Écologiquement Valide:** L'environnement doit avoir des aspects similaires à ceux d'un environnement naturel, notamment de la diversité dans les caractéristiques des agents (plusieurs espèces différentes) et de l'autonomie pour chaque individu (les agents ne

peuvent pas raisonner directement en tant que groupe).

Chacun de ces paradigmes initiaux a ensuite été ré-exprimé sous la forme de deux fonctionnalités ou propriétés désirées dans le projet final.



*Fig 3: Fonctionnalités désirées (violet) associées à chaque paradigme initial (rouge)*

J'ai ensuite placé ces fonctionnalités dans un même diagramme pour faire ressortir celles qui interagissent entre elles et mettre ainsi en évidence des fonctionnalités désirées implicites.

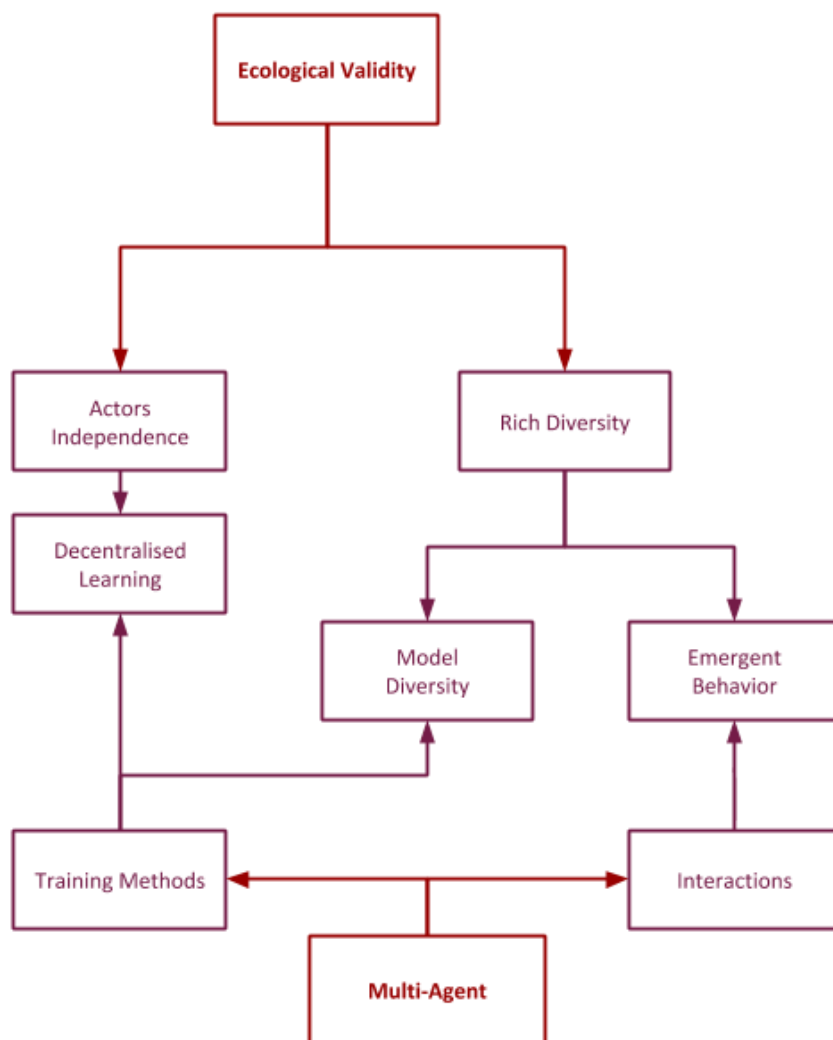


Fig 4: Mise en évidence des fonctionnalités implicites (violet) qui apparaissent lorsque deux paradigmes différents (rouge) sont pris en compte

Enfin, j'ai pu expliciter des patrons de conception (*design pattern*) qui vont permettre d'implémenter chaque fonctionnalité désirée. Pour pouvoir couvrir chacun de ces besoins avec les ressources à nos dispositions, on privilégie les patrons qui peuvent couvrir plusieurs besoins à la fois.

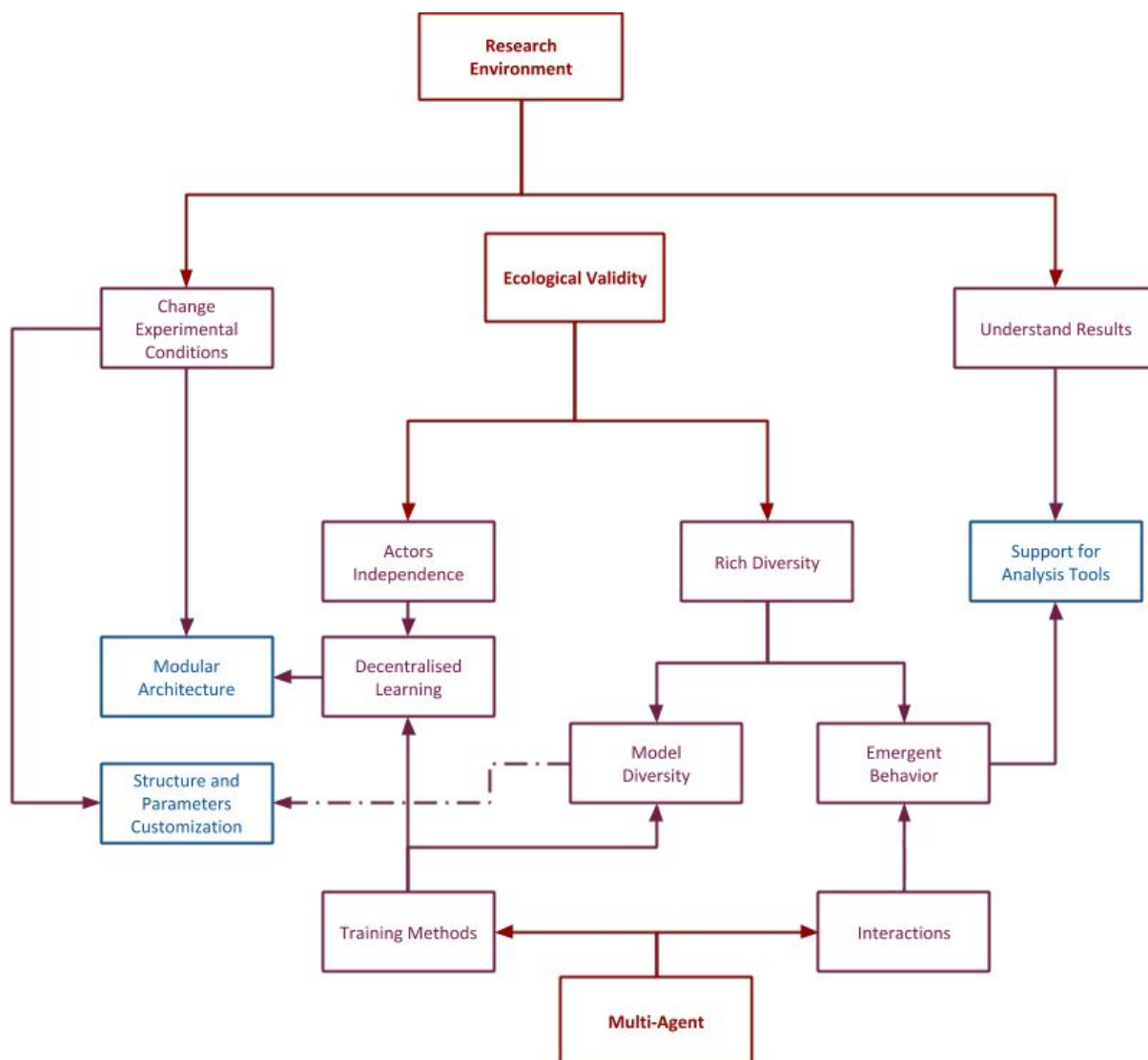


Fig 5: Schéma final explicitant les besoins techniques (bleus) à partir des fonctionnalités désirées (violet) tirées des paradigmes initiaux du projet (rouge)

À la fin de ce processus, j'obtiens des objectifs d'implémentation plus clairs qui vont permettre de guider mes choix de conception durant tout le projet. En voici une courte description :

- **Structure Internes Personnalisables**

L'environnement doit permettre d'intégrer des agents dont les structures internes peuvent fortement varier: entrées sensorielles, actions possibles, algorithmes d'apprentissage... Toutes ces paramètres doivent être facilement configurables par

l'expérimentateur dans le code de l'environnement.

- **Architecture Modulaire**

L'environnement doit permettre de développer et d'intégrer de nouvelles structures internes (algorithme d'apprentissage, capteurs sensoriels,...) facilement. Son architecture doit être modulaire pour faciliter l'ajout et la cohésion de ces différentes structures.

- **Outils d'analyses**

Les résultats expérimentaux contiendront des exemples de comportements émergents qui ne pourront pas être analysés via les métriques disponibles sur un seul agent. L'environnement doit fournir des outils d'analyse et de visualisations, ou faciliter l'utilisations d'outils externes.



## VI - Réalisations

### Comparatifs des environnements existants

Au début du projet, s'est soulevé le choix entre développer un tout nouvel environnement à partir de zéro ou d'en reprendre un existant et de l'adapter à nos besoins. Cette question fut cruciale car elle allait grandement impacter notre manière de répartir nos ressources temporelles et l'ampleur de nos objectifs d'implémentation. Pour opérer ce choix, j'ai listé les critères qui sont importants dans le projet et j'ai effectué un comparatif sur une présélection de 4 environnements qui pourraient éventuellement convenir à nos besoins. J'ai évalué chacun de ces environnements en les installant et en reproduisant des scénarios classique de la littérature IA sur la machine qui m'a été fournie à l'INRIA.

### Critères d'étude

- **Type de coordonnées:** Comment est encodé l'espace ? Coordonnées flottantes (Continues) ou avec des entiers ? (Case par case)
- **Diversité des tâches d'évaluation:** Le type de tâches possibles à évaluer dans l'environnement. Elles varient d'un environnement à l'autre mais présentent toutes au moins de la navigation spatiale.
- **Algorithmes d'apprentissage utilisés:** Les algorithmes déjà implémentés dans l'environnement d'après la littérature scientifique.
- **Multi-Agent:** Est-ce que la simulation contient plusieurs agents ?
- **Apprentissage Décentralisé:** Est-il possible de faire de l'apprentissage décentralisé ?
- **Type de diversité des modèles:** Est-ce que les agents peuvent présenter de la diversité dans leurs caractéristiques ?
- **Échelle de la simulation:** Combien d'agents peuvent être simulés en même temps pour des performances raisonnables ?

- **Architecture logicielle:** L'architecture est-elle similaire à celles de la littérature (Gym) ou est-elle personnalisée ? Cela sera-t-il facile d'y intégrer nos propres composants (Légère) ou plus coûteux ? (Lourde)
- **Coût computationnel estimé:** Combien de temps de calcul est-il nécessaire pour faire tourner une simple simulation ?

**Table comparative**

Nom	Type de coordonnées	Diversité des tâches d'évaluation	Algorithmes d'apprentissage utilisés	Architecture logicielle	Coût computationnel estimé
MiniGrid / BabyAi	Case par case	Navigation, Planification, Interprétation d'un ordre	<i>Actor-Critic</i>	Gym	Légère
Particles	Continu	Navigation, Coopération, Communication, Confrontation	<i>Multi-Agent Actor-Critic (MADDPG)</i>	Gym Multi-Agent	Légère
Flatland	Continu	Vision, Navigation, Collecte, Physique réaliste	<i>Deep Q Network, Actor-Critic, Direct Future Prediction</i>	Personnalisée - Légère	Légère
Neural MMO	Case par case	Navigation, Collecte, Confrontation	-	Personnalisée - Lourde	Lourde

Nom	Multi-Agent ?	Apprentissage Décentralisé ?	Type de diversité des modèles ?	Échelle de la simulation
MiniGrid / BabyAi	Non / Interaction Humaine	-	-	1 agent

Particles	Oui	Non	Taille, Actions, Objectifs variés	6 agents
Flatland	Oui	-	-	> 1 agent
Neural MMO	Oui	Non	Classe des joueurs, Armes, etc	100 agents

## Choix d'environnement et collaboration externe

Après une étude approfondie, notre choix d'environnement s'est porté sur **Flatland**. Il s'agit d'un environnement 2D codé en Python qui comporte des éléments d'interactions physiques réalistes (ex: un agent peut pousser un objet). De la même manière que des animaux en 3D peuvent percevoir des images en 2D, les agents bidimensionnels virtuels dans Flatland sont capables de percevoir des images de dimension 1.

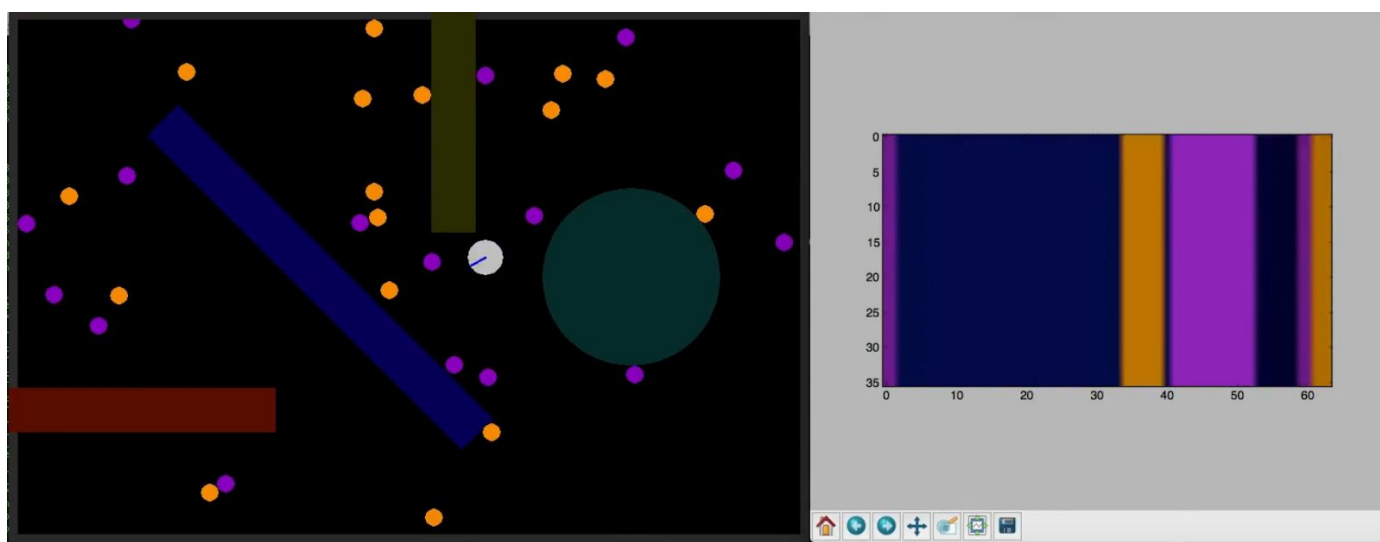


Fig 6: Visualisation de l'environnement Flatland. Monde simulé habité par un agent de forme circulaire (gauche). Visualisation de l'image 1D perçue par les capteurs de l'agent. (droite).

Cet environnement correspondait aux critères établis précédemment sur les points suivants:

- Les agents ont des informations locales sur leur environnement, qui peuvent leur parvenir via une grande diversité de capteurs: capteur de couleur, de profondeur, de toucher
- Les interactions physiques réalistes permettent aux agents d'avoir des comportements complexes comme déplacer des objets pour se cacher derrière eux ou rassembler des ressources à un même endroit.
- La structure modulaire de Flatland permet d'ajouter aisément des nouveaux composants qui seront utiles dans nos expériences.

#### ⇒ Difficultée rencontrée

Un point essentiel pour notre projet qui manquait cependant à l'environnement était la capacité d'avoir plusieurs agents dans la même simulation.

#### ⇒ Moyens de résolutions

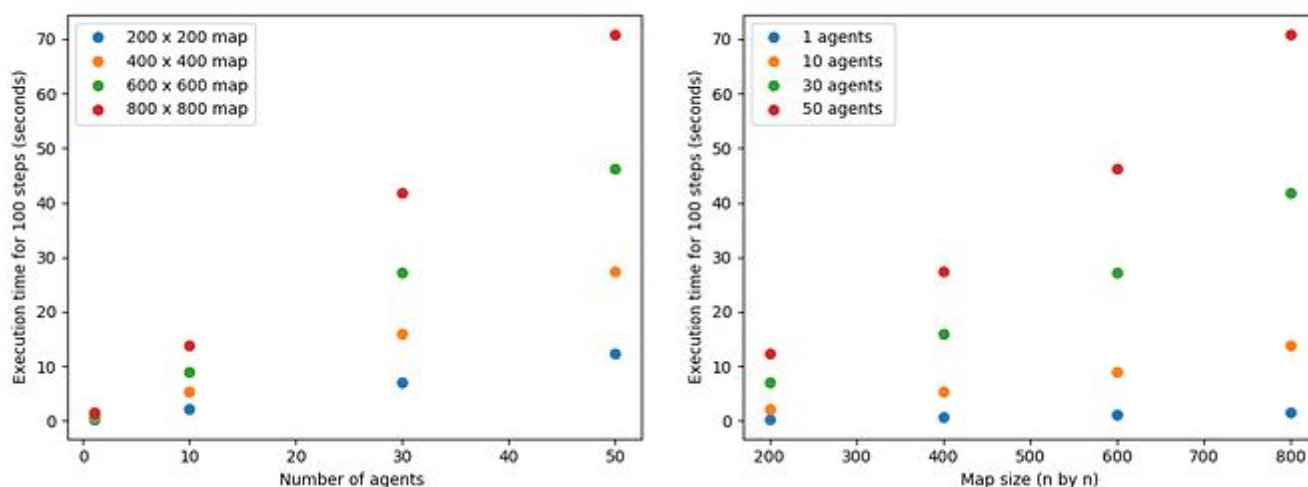
Nous avons contacté le chercheur Michaël Garcia Ortiz, un des auteurs du projet Flatland qui continue de travailler sur son développement. Une collaboration a été entamée avec lui pour pouvoir développer ensemble des fonctionnalités qui seraient utiles dans notre environnement d'expérience. Michaël Garcia Ortiz fut particulièrement intéressé car cela lui permit d'étendre son environnement pour le besoin de chercheurs comme nous, ainsi que de bénéficier de retours constructifs sur les implémentations en cours.

En l'occurrence, l'aide de Michaël Garcia Ortiz nous a permis d'ajouter plusieurs agents simultanément dans une simulation.

À ce jour, le lien de collaboration entre Michaël Garcia Ortiz et le tuteur Clément Moulin-Frier est maintenu sur des projets professionnels qui concernent l'équipe FLOWERS.

## Prise en main et tests de performances

Afin de prendre en main l'environnement Flatland et d'avoir une estimation du nombre d'agents que nous pourrions placer dans une simulation, j'ai conduit des tests de performances. J'ai mesuré le temps de calcul nécessaire pour 100 pas de simulation sur des cartes de tailles différentes, avec un nombre d'agent différents. Chaque agent avait un capteur visuel unidimensionnel.



*Fig 6: Temps de calcul pour 100 pas de simulation en faisant varier la taille de la carte et le nombre d'agents. Chaque graphique présente exactement les mêmes données, en alternant simplement d'axe des abscisses.*

Pour les plus grands paramètres testés, l'ordre de grandeur était de 70 secondes. Le coût augmente:

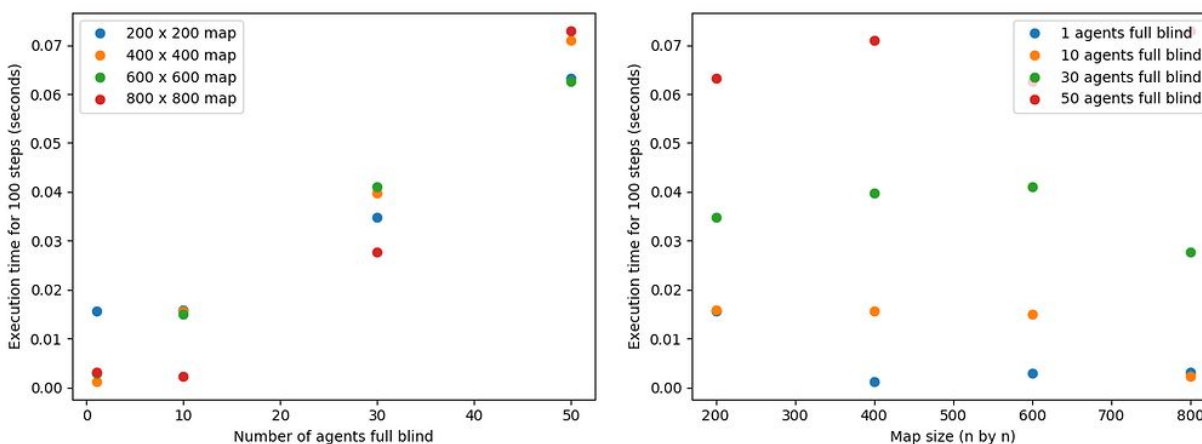
- linéairement avec le nombre d'agents
- environ quadratiquement en fonction de la taille de la carte

⇒ **Difficulté rencontrée**

Sachant qu'une expérience classique nécessite une 20aine d'expérience de chacune environ 5000 pas, les performances mesurées demanderaient environ 2000 heures de calculs sur la machine qui m'a été fournie. Ces ressources sont bien au-delà du budget disponible.

## ⇒ Moyens de résolutions

J'ai opéré une étude approfondie en menant une autre expérience qui supposait que chaque agent ne possédait pas de capteurs visuels.



*Fig 7: Temps de calcul pour 100 pas de simulation en faisant varier la taille de la carte et le nombre d'agents. Les agents ne possèdent pas de capteurs. Chaque graphique présente exactement les mêmes données, en alternant simplement d'axe des abscisses.*

Les performances sont bien plus raisonnables et l'ordre de grandeur est 1000 fois plus petit: 0.07 secondes pour les paramètres maximaux. De plus, la taille de la carte n'impacte pas les performances d'une manière significative.

Cela est explicable par le fait que les capteurs visuels nécessite d'effectuer des calculs de conversions de l'environnement en pixels pour chaque agent. Plus il y avait d'agent et plus la carte était grande, plus ces coûts devenaient onéreux.

Ces observations m'ont permis d'établir que des capteurs qui n'utilisent pas de conversions en pixels pourraient être bien plus performants par rapport à nos besoins expérimentaux. De plus, un nouveau type de capteur ajouterait de la diversité dans les caractéristiques des agents, ce qui est un des besoins de ce projet.

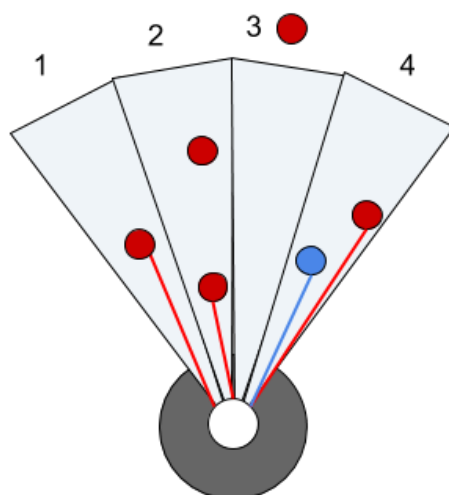
## **Développement d'un Senseur Géométrique**

*Cette sous-partie présente une version abrégée du document final produit, disponible en annexe.*

Pour pallier au problème de performances détaillé plus haut, j'ai entamé le développement d'un nouveau type de capteur dont les coûts computationnels seront plus faibles.

Les travaux de Braitenberg (1984) [4] dans la littérature de la robotique bio-inspirée, indiquent que des comportements complexes peuvent être observés même chez des agents qui ne peuvent que percevoir la présence d'objets proches d'eux, dans un cône de vision limitée. L'émergence de comportements complexes à partir de caractéristiques simples étant une thématique importante du projet, l'implémentation de capteurs similaires était particulièrement pertinente.

Inspirés par ces travaux, j’ai conçu une procédure algorithmique complète (disponible en annexe) pour implémenter ce capteur dans l’environnement Flatland.



*Fig 8: Perception des objets (rouge et bleus) dans les cônes de vision (1,2,3,4) d’un agent circulaire doté d’un capteur géométrique.*

L’agent a un champ de vision séparé en plusieurs cônes (annotés de 1 à 4)

Chaque cône est capable de détecter l’entité la plus proche dans son champ de vision, et renvoie la distance normalisée entre l’entité perçue et l’agent. Puisque l’agent n’a pas besoin d’accéder à l’image pixelisée de son environnement mais uniquement à la forme géométrique et aux coordonnées de l’entité perçue, on appellera ce type de capteur un “Senseur Géométrique”.

J’ai donc procédé à l’implémentation de ce capteur dans l’environnement Flatland qui, comme

### ⇒ Difficulté rencontrée

Une conséquence de notre choix d’environnement de développement a été sous-estimée. En effet, Michaël Garcia Ortiz développait en parallèle de notre travail ses propres fonctionnalités pour ses propres besoins sur notre base de code commune. De manière inattendue, ces changements ont parfois impacté mon propre rythme de production car ses changements



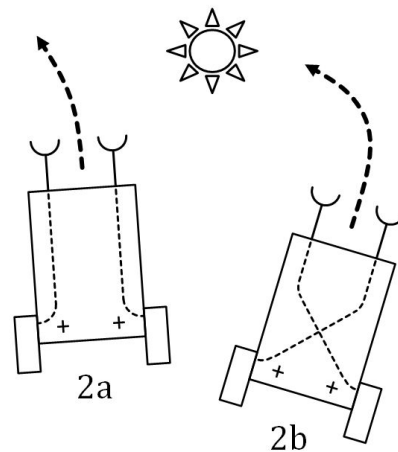
pouvaient réécrire certains de mes ajouts ou revenir à une précédente version de mes modifications. Cela a été accentué par le fait que ce collaborateur ne faisait pas partie de la même organisation que la nôtre, et que nos conventions de travail étaient différentes.

#### ⇒ Moyens de résolutions

J'ai mis en place des contacts réguliers avec notre collaborateur pour que nous ayions une même conscience de situation sur nos changements respectifs sur la base de code de Flatland. Nous nous sommes mis d'accord sur des conventions de développement, et interfaces d'implémentation communes. J'ai aussi eu l'occasion de lui transmettre mes connaissances sur les bonnes pratiques du développement logiciel, pour qu'il puisse collaborer avec d'autres contributeurs éventuels.

### **Développement des Comportement Types "Véhicule de Braitenberg"**

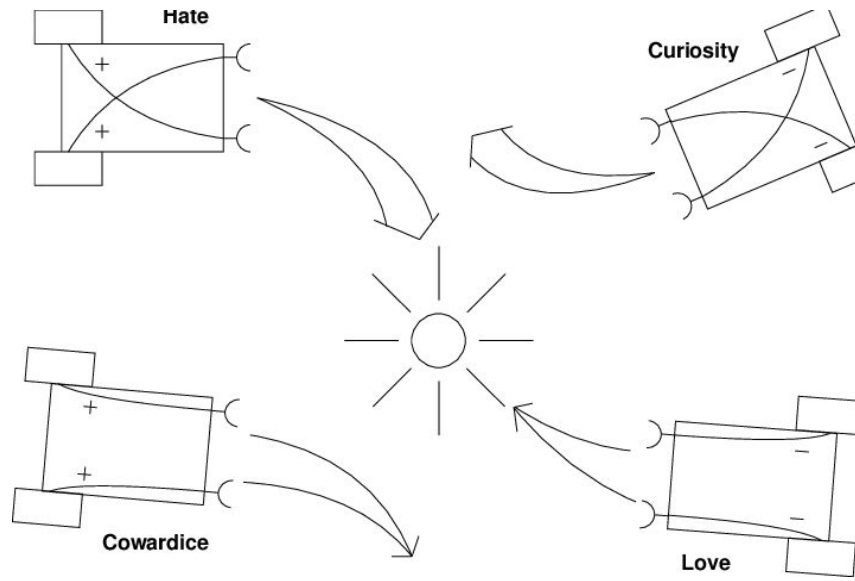
Avant de pouvoir observer des dynamiques de groupe dans nos expériences, il faut d'abord implémenter des comportements individuels chez les agents qui réagissent aux entrées fournies par leurs capteurs. Les travaux de Braitenberg [4] indiquent que de simples réponses aux stimuli fournis par le capteur géométrique défini plus haut permettent déjà d'avoir des comportements émergents complexes comme de l'évitement d'obstacle ou de la collecte de ressources. Les agents qui implémentent ces comportements sont appelés "Véhicules de Braitenberg".



*Fig 9: Schéma de deux véhicules de Braitenberg qui ont respectivement un comportement d'évitement (2a) et de chasse (2b)*

Un véhicule de Braitenberg est composé d'un senseur géométrique qui a deux cônes de vision (droite et gauche) ainsi que deux roues motrices (droite et gauche). Les deux capteurs peuvent détecter une entité (ex: une récompense) et sont chacun câblés à une des deux roues, d'une manière excitatrice ou inhibitrice. Dans le mode excitateur, plus le capteur est proche d'une récompense, plus la roue associée est activée. Dans le mode inhibiteur, plus le capteur est proche, plus la roue ralentit.

En fonction du câblage des roues et des modes excitateurs ou inhibiteurs, l'agent peut manifester 4 types de comportements différents.



*Fig 10: Les 4 types comportements possibles manifestés par un véhicule de Braitenberg  
Chasse, Curiosité, Évitement d'obstacle,*

Ces comportements encodent des primitives de mouvement qui sont proches de celles de petits insectes, et qui correspondent à l'idée d'un environnement avec des dynamiques proches d'un écosystème. Ils vont notamment permettre aux agents de naviguer dans l'espace et d'éviter des obstacles ou des prédateurs, ou chasser des proies.

Les véhicules de Braitenberg sont initialement pensés pour réagir qu'à une seule sorte d'entité, comme un mur ou des récompenses. Puisque que nous voulions que notre environnement puissent contenir une diversité d'éléments, j'ai conçu et implémenté une version étendue qui peut réagir à plusieurs entités. La structure étendue permet de configurer plusieurs comportements de Braitenberg sur plusieurs entités, combinant par exemple un mouvement d'évitement d'obstacle avec un mouvement de collecte de ressources.

### ⇒ Difficultée rencontrée

Un comportement émergent - comme celui des Véhicules de Braitenberg - est un phénomène produit par l'interaction entre plusieurs composants, qui ne peut pas être analysé

complètement par le prisme d'un seul de ses composants. Par sa nature, lorsqu'un tel mécanisme ne fonctionne pas comme attendu, il est complexe de trouver quelle partie du code en est fautive. Chaque partie peut être fonctionnelle individuellement, mais la structure globale peut ne pas se comporter comme prévu en fonction de la composition des éléments ou d'autres éléments dont l'impact direct n'est pas anticipable. Durant le processus de débogage, le choix des variables à analyser n'est pas une tâche triviale et certaines conditions ne sont parfois pas reproductibles si le développeur n'a pas une bonne idée de ce qu'il faut isoler. J'ai notamment été confronté à ce problème lors du développement des comportements des agents, qui, couplé à l'environnement est assimilable à un système avec des dynamiques émergentes.

### ⇒ Moyens de résolutions

Pour résoudre des problèmes de cette nature durant le développement, j'ai mis en place un processus avec mes propres outils: J'enregistrais systématiquement chaque simulation en vidéo, tout en traquant chaque variable sur un graphique de visualisation. Ce processus était certes plus long qu'un débogage classique, mais il permettait d'avoir une vision plus globale du système et d'émettre des hypothèses selon les tendances générales du comportement émergent. Sur suggestion de mon tuteur, j'ai aussi mis en place des scénarios très simples de tests qui permettent d'observer la réaction du système à des stimuli très simples. Je reproduisais ensuite pas à pas les calculs théoriques de réponse du système et les comparais à ceux obtenus en pratique. Ces méthodes m'ont permis à la fois d'élaborer plus rapidement des hypothèses sur la cause des soucis, ainsi que de les tester pour les confirmer ou les infirmer.

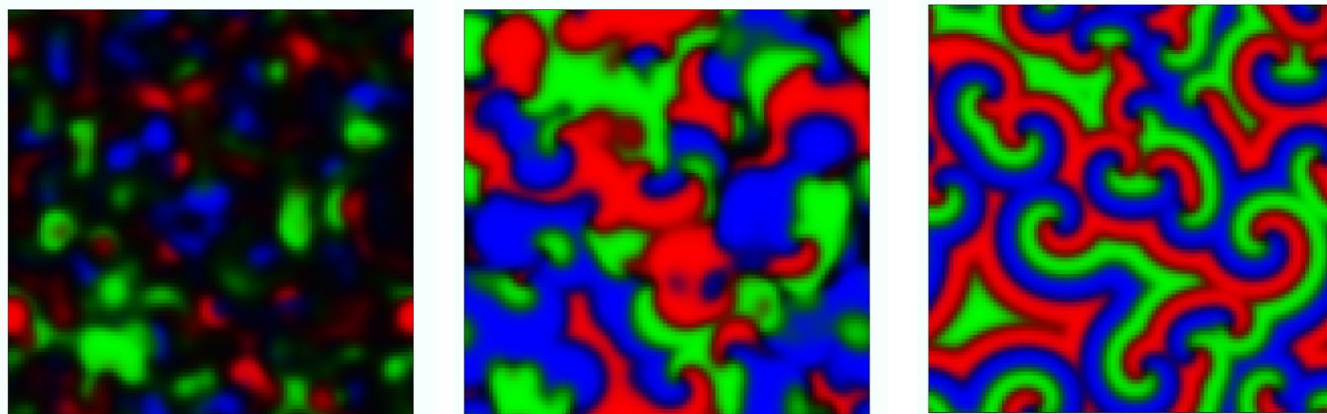
## **Conception d'une preuve de concept expérimentale**

### **Cadre expérimental**

Pour explorer l'intérêt d'une approche plus écologiquement valide dans un contexte expérimental et pour mettre en valeur les capacités de l'environnement développé au cours du

stage, nous souhaitons monter une preuve de concept d'expérience conductible avec cet outil.

Nous avons choisi de reproduire une simulation pré-existante en adaptant le contexte expérimental vers un paradigme plus écologiquement valide. Le système que nous avons choisi est un modèle qui étudie les conditions nécessaires pour que la biodiversité persiste dans un écosystème [6]. Il s'agit d'un automate cellulaire nommé "Cycledelic" qui simule les mouvements de population de trois espèces (Bleue, Rouge, Verte) et qui ont une relation de type Pierre-Feuille-Ciseaux où chaque espèce se nourrit d'une d'elle et est mangée par une autre.



*Fig 11: Images successives (de gauche à droite) d'une simulation par l'automate cellulaire 'Cycledelic'. Chaque couleur représente la présence d'une espèce différente. Elles ont tendance à former des spirales cycliques (droite).*

Les auteurs du système 'Cycledelic' s'intéressent notamment à l'impact de la mobilité des populations sur la diversité des espèces dans la simulation. Leurs résultats indiquent que si les espèces peuvent trop facilement se déplacer, une d'entre elle pourrait dominer tout l'écosystème et effacer la présence des autres.

Bien que leur modèle est censé représenter les dynamiques d'un écosystème, il est relativement abstrait et ignore beaucoup des caractéristiques d'un monde où les agents sont supposés être des êtres vivants. Dans notre expérience, nous avons voulu adapter ce cadre en

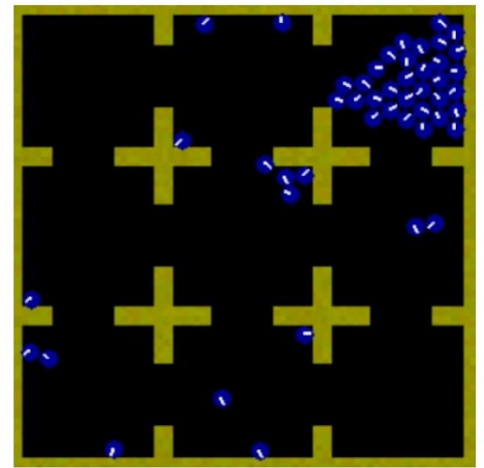
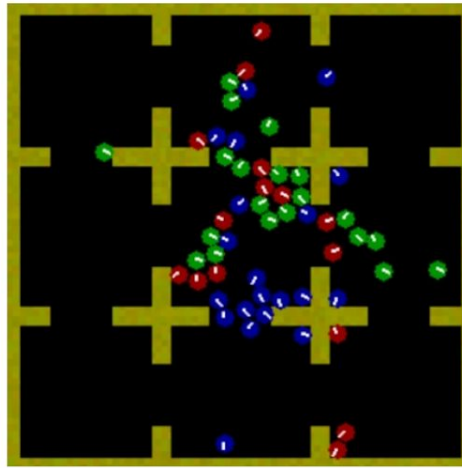
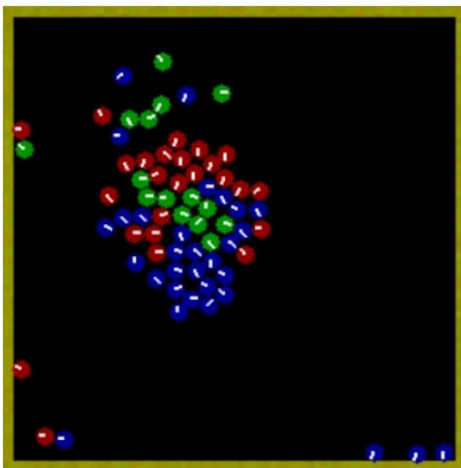
l'enrichissant de caractéristiques que nous avons estimées être plus écologiquement valides pour observer si ces changements ont un impact sur la dynamique du système.

### Adaptations plus écologiques

- Chaque agent possède un corps physique. Les agents peuvent se pousser, bloquer des espaces et ne peuvent pas être plusieurs au même endroit.
- Les agents réagissent à leur environnement: ils évitent leurs prédateurs, sont attirés vers les proies et évitent les obstacles. Ces comportements ont été modélisés avec des Véhicules de Braitenberg.
- Chaque agent n'a pas une vision globale mais locale, limitée à ce qu'il y a devant eux.
- Les agents ne peuvent se reproduire que s'ils ont déjà pu accumuler de l'énergie en se nourrissant de leurs proies.

Le modèle précédent faisait varier la 'mobilité', c'est-à-dire la portée de déplacement des cellules qui représentent les populations d'espèces. Nous avons fait correspondre ces notions à deux paramètres que l'on nous a fait varier durant l'expérience :

- Une mobilité géographique, qui correspond à la répartition d'obstacles sur la carte, la segmentant en plusieurs espaces.
- La vitesse de déplacement des agents.



*Fig 12: Captures d'écran de la visualisation de 3 expériences différentes effectuées dans l'environnement développé. Chaque couleur représente un agent d'une espèce différente. Carte sans obstacles (gauche) Carte avec obstacle (centre et droite) Biodiversité perdue par domination de l'espèce Bleue (droite)*

## Premiers résultats

- ❖ L'environnement développé est fonctionnel et stable. En terme de performances, les expériences nécessitent un temps de calcul satisfaisant relativement à nos ressources. (Quelques minutes pour les expériences les plus coûteuses)
- ❖ L'environnement collecte automatiquement des données analysables à posteriori par les expérimentateurs (Vidéo des simulations et graphiques des métriques pertinentes)
- ❖ On observe des phénomènes similaires à ceux du modèle initial, comme la présence de spirales sur la carte ou de cycles dans la proportion relative des espèces. Ces aspects indiquent que le cadre expérimental et l'implémentation dans l'environnement sont cohérents avec des résultats de l'état de l'art.
- ❖ Fait surprenant, la variation des paramètres correspondant à la 'mobilité' des agents dans l'environnement semble avoir un effet inverse sur la biodiversité dans l'écosystème. En effet, des espèces sur le point de disparaître ont plus tendance à se maintenir dans les environnements où elles possèdent plus de mobilité.

Les résultats produits ne sont pour l'instant pas assez poussés pour discuter sur la pertinence relative du modèle original par rapport au nôtre. Le point qu'il faut noter, et que nous avons réussi à montrer qu'une approche de simulation écologiquement valide pouvait remettre en question nos hypothèses sur certains phénomènes et peuvent ouvrir la porte à de nouveaux

angles d'études, complémentaires aux précédents.

Des résultats plus approfondis seront analysés en dehors du temps alloué à ce stage et seront l'objet d'une collaboration scientifique potentielle entre le tuteur et moi-même.

## Planning effectif

Mois	FEVRIER			MARS				AVRIL				MAI				JUIN				JUILLET	
Semaine n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Recherches initiales																					
Lecture de la littérature																					
Précision des besoins																					
Etude des environnements existants																					
Etude de Flatland (+tests de performances)																					
Développement de notre environnement																					
Dév. Capteur de Braitenberg																					
Dév. Véhicule de Braitenberg																					
Mise en place d'une expérience																					
Dév. Environnement de l'expérience																					
Analyse des résultats																					

Fig 13: Répartition effective du temps durant ce projet

La répartition effective diffère peu de celle planifiée en début de projet. Les majeures différences sont une extension de 2 semaines pour la phase de *Recherches initiales* et de *Mise en place d'une expérience*. Il s'agit d'investissements supplémentaires en ressources temporelles décidés en accord avec le tuteur. Ils correspondent aux besoin d'approfondir nos études préliminaires pour préciser nos spécifications et produire un projet innovant et intéressant par rapport au reste de l'état de l'art scientifique.

Le confinement national français décidé en réponse à la crise sanitaire mondiale a duré du 17 Mars au 11 Mai 2020. Cela a impacté nos méthodes de travail durant les phases de développement. Dans un contexte nouveau de télétravail, les entretiens individuels entre mon tuteur et moi-même étaient initialement plus complexes à mettre en place que durant notre



temps de travail sur site. Pour y pallier, nous avons mis en place des rendez-vous réguliers durant lesquels nous discutons de nos avancées respectives, même s'il n'y avait aucun nouveau résultat qui imposait le besoin d'un entretien. En résultat, même si j'ai dû adapter ma façon de travailler, les cycles de développement ont été relativement peu impactés en terme de retard.

## VII - Impact socio-économique du projet

Un des objectifs du développement d'un environnement de recherche plus écologiquement valide était d'explorer ce récent paradigme de recherche dans le domaine de l'Intelligence Artificielle. Les études effectuées durant ce stage et les outils développés ont pour but de profiter directement à la recherche en IA :

- ★ Mes observations et les rapports que j'ai produits en interne contribuent à l'échange de connaissance et à développer les compétences de l'équipe FLOWERS
- ★ L'environnement créé servira principalement à l'équipe FLOWERS, mais il s'agit aussi d'un outil destiné à être utilisé par n'importe quel chercheur intéressé par ces questions. Notre collaborateur Michaël Garcia Ortiz est un premier exemple de chercheur en dehors de l'organisation de l'INRIA qui a bénéficié de nos travaux.
- ★ Dans le futur proche, les idées et les méthodologies développées durant ce projet seront réinterprétées, redéveloppées et enrichiront d'autres études conduites par le tuteur, les autres membres de FLOWERS et les collaborateurs qui les côtoient

Ce stage a été possible car l'INRIA met à disposition du financement pour les thématiques centrées sur la recherche en IA. Ce financement vient en grande partie de la *stratégie nationale de recherche en intelligence artificielle* de l'État Français [5], qui souhaite développer son industrie à l'aube de cette nouvelle révolution industrielle. Ce changement est supposé révolutionner le rapport au travail et la vie économique à l'échelle internationale. À son échelle, ce stage s'inscrit dans une stratégie de négociation de ce grand tournant pour la société

française.

## **VIII - Analyse des Enjeux de Développement Durable et de Responsabilité Sociétale**

En tant qu'Institut National de recherche , l'INRIA est amené à participer activement aux stratégies nationales de développement durable durable. Parmi les nombreuses initiatives, j'ai choisi d'en préciser deux dans cette partie:

### **Exemple d'initiative en interne**

Dans un souci de diminuer l'empreinte écologique de l'INRIA, le projet MANAO a mis en place une procédure pour évaluer les coûts en carbone des activités à plusieurs échelles: celles des centres entiers, celles des équipes et celles individuelles.

Elle aussi étudié les usages de chaque agent du centre, et recensé les changements qu'ils étaient prêts à faire ou non pour diminuer leur impact. Le projet MANAO a ensuite émis des recommandations applicables à l'échelle du centre. Cette initiative a permis la sensibilisation du personnel aux problématiques de développement durable liées à leurs activités ainsi qu'à la diminution de l'empreinte carbone de l'INRIA.

### **Exemple d'initiative externe**

Lors de la récente crise sanitaire du COVID, l'INRIA a participé directement à la stratégie de gestion nationale. L'équipe FLOWERS (lieu du stage) a activement participé avec l'équipe

SISTEM pour créer un modèle de prédiction de l'épidémie dans le Grand Est afin de guider les stratégies de prise de décision pour le déconfinement.

L'INRIA a aussi coordonné le déploiement de l'application *STOP COVID* qui a pour but de réduire l'exposition aux risques d'infection en prévenant les personnes qui ont été en contact avec des personnes elles-mêmes exposées à des risques.

## IX - Conclusion

Durant ce stage, j'ai été amené à concevoir un nouveau type d'environnement de simulation pour la recherche en Intelligence Artificielle, à le développer et à mettre en valeur son intérêt. Les résultats obtenus sont encore à approfondir avant de pouvoir constituer une contribution à part entière, mais ils sont prometteurs et indiquent que le projet servira de base de travail solide pour la recherche que mène l'équipe FLOWERS, au sein de l'INRIA.

Plus encore qu'une conception et une réalisation technique, ce stage représente le parachevement de mes trois années d'études en tant qu'élève ingénieur de l'ENSC. J'ai pu y mettre à profit les compétences que j'ai développées durant mes études, la plus importante d'entre elle étant sans doute la **faculté d'adaptation**.

Elle m'a notamment permis de réagir...

- ...au bouleversement organisationnel du télétravail, en adoptant une méthodologie qui assure une bonne conscience de situation partagée entre collaborateurs
- ...à la confrontation à de nouveaux domaines d'étude, en puisant dans ma formation pluridisciplinaire pour faire le lien entre les disciplines
- ...au besoin d'expertise complémentaire, en créant une nouvelle collaboration entre l'équipe FLOWERS et le chercheur Michaël Garcia Ortiz
- ...au flou initial qui accompagne une démarche exploratoire, en suivant une méthode de conception qui précise les besoins et guide les choix techniques

Ce stage a été l'occasion d'acquérir les méthodologies de travail propres au monde la recherche et de pouvoir collaborer plus efficacement avec des membres de ce milieu dans le futur.

Dans mon rapport de stage précédent, j'ai mentionné mon "mon souhait de me diriger vers un secteur de travail avec une composante importante de recherche et d'innovation".

C'est avec beaucoup de satisfaction que je constate que ce stage actuel est un tremplin dans cette direction, et qu'il m'ouvre des perspectives de travail épanouissantes.

## X - Glossaire

**Machine Learning:** Sous-domaine de l'Intelligence Artificielle, où l'on s'intéresse à l'acquisition de nouvelles compétences par des agents autonomes.

**Renforcement Learning:** Méthode d'apprentissage algorithmique qui consiste pour un agent autonome à apprendre les actions à prendre à partir d'expériences passées de façon à optimiser une récompense fournie par son environnement.

**Écologiquement Valide ou Validité Écologique:** Dans notre contexte, il s'agit d'un ensemble de caractéristiques (non-exhaustif) que l'on retrouve dans des écosystèmes naturels. Ceux qui nous intéressent principalement sont:

- de la **diversité** chez les agents qui y habitent (dans leurs caractéristiques morphologiques mais aussi comportementales)
- un **population élevée**, soit un grand nombre d'agents
- des **dynamiques propres** à l'environnement comme des interactions entre des objets physiques ou un besoin en ressources nécessaire pour la subsistance des agents.

## XI - Bibliographie

- [1] Antón, S. C., Potts, R., & Aiello, L. C. (2014). Evolution of early Homo: an integrated biological perspective. *Science*, 345(6192), 1236828.
- [2] Borgerhoff Mulder, Monique; and Schacht, Ryan ( 2012) *Human Behavioural Ecology*. In: eLS. John Wiley & Sons, Ltd:Chichester
- [3] Larman, Craig (June 2003). "Iterative and Incremental Development: A Brief History"
- [4] Braitenberg, V. (1984). *Vehicles: Experiments in synthetic psychology*. Cambridge, MA: MIT Press
- [5] "Stratégie Nationale de Recherche en Intelligence Artificielle"  
<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid136649/la-strategie-nationale-de-recherche-en-intelligence-artificielle.html>
- [6] Reichenbach, Tobias, Mauro Mobilia, and Erwin Frey. "Mobility Promotes and Jeopardizes Biodiversity in Rock–paper–scissors Games." *Nature* 448.7157 (2007): 1046–1049. Crossref. Web.

## XII - Annexes

*Ces documents ont été produit dans le cadre d'un stage dans un laboratoire international avec des collaborateurs non-francophones. Par contrainte professionnelle, certains de ces documents sont rédigés en Anglais.*

### Définition d'une simulation Écologiquement Valide

The notion of an ecological simulation is a bit vague, but we can set up a list of (non-exhaustive) characteristics which can help describing it. We consider here that the more of these characteristics an environment displays, the closest it is to an ecological paradigm.

**Independence:** A living being has control only over its own body and can perceive new information only through its own sensors. This can be translated in an independence of the agents in the simulation:

An agent only has access to its own observations to choose its own individual actions, and its reward is individual. Agents cannot directly act and learn as a group. (No Hive Mind)

There is no bias on other agents. The architecture of each agent is independent of the number and type of other agents.

**Diversity:** There is some diversity in the characteristics of agents.

Keeping the analogy 1 Agent model  $\rightarrow$  1 Species in mind, it can be expressed in one or more of these parameters:

- Physical parameters  $\rightarrow$  Morphology (size, speed)
- Observation space  $\rightarrow$  Sensors
- Action space  $\rightarrow$  Physiological characteristics (picking objects, communication, camouflage, etc.)
- Reward function  $\rightarrow$  Needs
- Learning Algorithm  $\rightarrow$  Cognitive Ability (for learning)

Diversity in agents characteristics creates diversity in the challenges they face and create for other agents - therefore creating diversity in their strategies too.

**Population scale:** The number of agents in the simulation and their interactions makes it possible to witness the emergence of phenomenons at the scale of groups rather than on individuals.

**Environmental complexity:** The environment in itself contains complex dynamics (renewal of resources, disappearance of waste, season cycles, etc.)

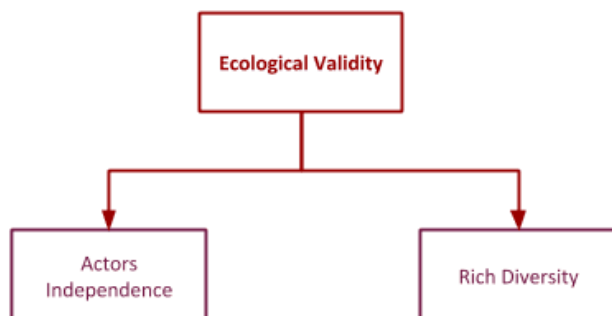
## Analyse des besoins & Schéma de conception

In this report, I'll focus on identifying the key challenges for this project's design, and where they come from. I followed a step-by-step process, with each stage illustrated here. It starts with the main paradigms we want to feature, then shows how they interact to create interesting properties and finally how we should design the environment to study them efficiently.

Following my discussions with Clément and my readings, I outlined 3 main paradigms for this project: we want to build an **Ecologically Valid** (1) **Multi-Agent RL** (2) **Research Environment** (3). I'll specify what it means, and perform a need analysis for the project.

### Ecological Validity

In research, the ecological validity of a study is the extent to which its conditions approximate the real-world. We still have to give a proper definition of what it exactly means in our context, but we intuit it as being close to the conditions of living ecosystems that can be found in nature - especially on those two aspects:



- **Rich Diversity**

We are interested in the complexity and diversity featured in eco-systems. Various species with different characteristics and behaviours live together in the same environment. The environment itself contains complex dynamics like seasonal cycles for resources renewal or shifting landscapes.

- **Actors Independance**

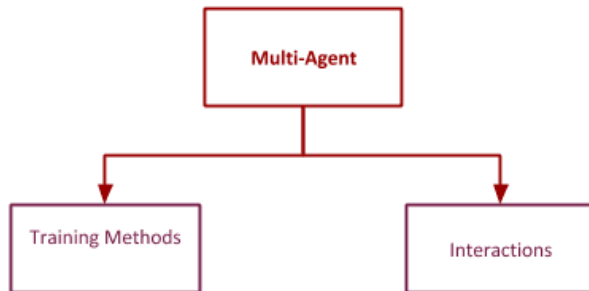
In the real world, each agent has an autonomous body and makes decisions on its own. Thus, we are interested in environments where every agent is simulated independently from the others. No sharing of



information hard-coded in the models.

## Multi-Agent RL

We want our environment to simulate several RL agents at the same time. Without going into many details, this means the environment will feature:



- **Training Methods**

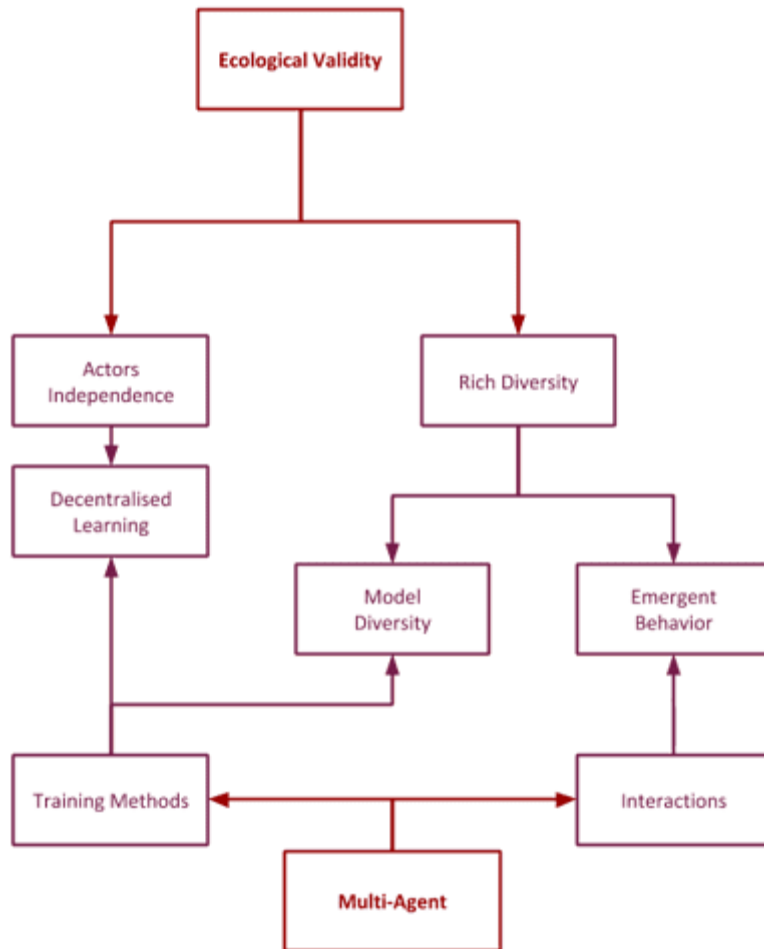
The environment must provide ways for agents to be trainable using current RL algorithms. This means being able to give it observations on the current state of the simulation, take into account its actions and handle rewards according to the environment's and/or agent's rules.

- **Interactions**

The main interest in multi-agent systems lies in the way agents can interact together to display complex collective behavior and/or adversarial strategies.

## An Ecological & Multi-Agent Environment...

Now that we outlined the main paradigms and their immediate properties, let's see how they combine to create other features we consider interesting to research. We can visualize them in the following diagram.



- **Emergent Behaviors**

Our main hypothesis is that in the presence of **Rich Diversity** in the environment's composition and dynamics, the **Interactions** between agents will give rise to complex **Emergent Behaviors** that can't be analyzed through the lens of a single agent. We hope to witness how social behaviors like swarms or primitive languages can arise in such conditions.

- **Decentralised Learning**

The ecological requirement of **Actors Independence** has a direct impact on the way **Training Methods** must be defined. Agents can't learn directly as a group, only as individuals. Their learning algorithms can't directly share information and can only use from their own observations, actions, and rewards. The desired environment must then support **Decentralised Learning**.

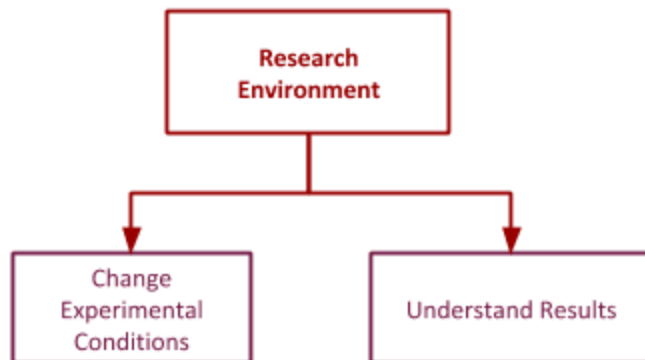
- **Model Diversity**

In nature, each species has its own characteristics, own sensors, and own abilities. This means the **Diversity** of the ecological simulation must also be reflected on the **Training Methods**: not only different population of agents can have diverse properties (size, speed, etc), but they can also have different

observation spaces, action spaces, reward functions, and learning algorithms.

## ...Plus a Research Tool

The last core paradigm of the project is that we want it to be a research tool that can be used for a wide range of experiments inside FLOWERS, but probably outside too. To do so, we have to focus our design around the needs of researchers like us. The two main ones are:



- **Change Experimental Conditions**

We need to quickly change the parameters of our experiments to explore the simulation and test other hypotheses.

- **Understand the Results**

We need to easily gather the results of our simulations and analyze them.

## Design Patterns

Now that we outlined the desired features of our environment and our needs as researchers, we can deduce the design decisions that should guide our development during the whole project. The final diagram is a bit big, but it can be read with this color legend:

- Red: Main paradigm
- Purple: Project feature
- Blue: Design solution

We need to easily **Change** the parameters of **Diverse Agent Models** whose inner structures and parameterizations may vary from one another. The environment should provide support to integrate populations of agents with different action and observation spaces, reward functions, learning algorithms, information sharing, etc.

We also want for each population of agents the ability to do both joint or **Decentralised Learning**, according to what the experiment requires. Populations must then follow a modular structure, in which it's easy to plug new independent agents or agents learning as a group, at the experimentator's will.

Expected experimental results will feature **Emergent Behaviors** that can't be **Understood** from the lens of a single agent's metrics. To study them, we should be able to use adapted analysis tools. In the literature, researchers have used video to build intuitions on emergent behaviors and then define custom metrics across all agents to explore their evolution.

43 / 48

replaying, focusing on one agent's point of view, and plotting the environment's evolution on custom metrics. Visualizing the simulation should be independent of running it, allowing us to run the long calculations on a dedicated server and then post-analyzing them without having to run it again.

Development of a full visualization engine may not happen in the short term, but the environment should at least produce simulation logs that can be stored and post-analyzed without re-running it.

## Capteur de Braitenberg, Plan Algorithmique

### Entrées:

- Agent capteur A:
  - ses positions  $x, y, \text{rot}$
  - Liste d'angles  $C = [C_0, C_1 \dots, C_n]$
  - Liste de types d'entité  $T = T.\text{transp} + T.\text{opaque}$  avec
    - les transparentes,  $T.\text{transp}$
    - les opaques,  $T.\text{opaque}$

Eg:

$T = [\text{fruit}, \text{lapin}, \text{mur}]$

$T.\text{transp} = [\text{fruit}, \text{lapin}]$

$T.\text{opaque} = [\text{mur}]$

- Dictionnaire de toutes les entités  $E$  où les clefs sont les types d'entité, et les valeurs sont des listes contenant les entités de ce type.

Eg  $E[\text{fruit}] = [\text{fruit1}, \text{fruit2}, \text{fruit3}]$

$E[\text{lapin}] = [\text{lapinA}, \text{lapinB}]$

$E[\text{mur}] = [\text{mur1}]$

$!\backslash E[\text{tous}] = [\text{fruit1}, \dots, \text{mur1}, \text{phéromones}]$

### Sortie:

- Matrice  $M$  de taille  $\text{len}(T) * \text{len}(C)$  de valeurs dans  $[0 ; 1]$  (distance normalisée)
- 1 = l'entité perçue est au-delà de la distance maximale du capteur
- 0.5 = l'entité est à la moitié
- 0 = l'entité est à notre position

### Algorithme :

1.  $M$  est une matrice de taille  $\text{len}(C) * \text{len}(T)$ .  
Les valeurs de  $M$  sont initialisées à 1

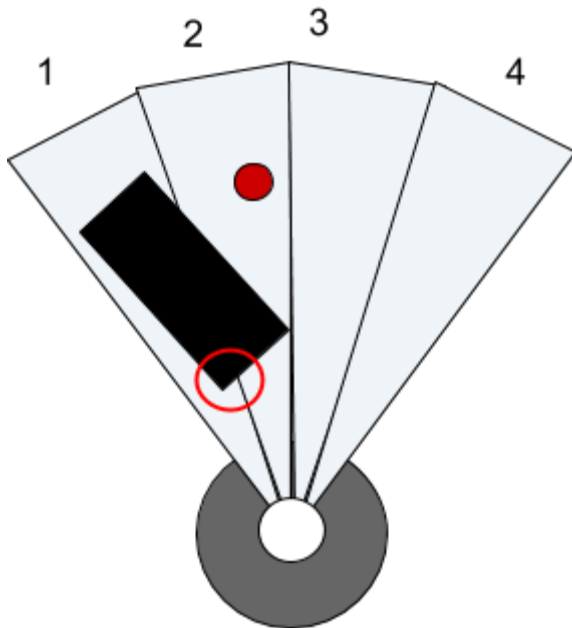
2. Pour chaque type d'entité X dans la liste de type T :
  - 2.1. Pour chaque entité B dans E[X] :
    - 2.1.1. Calculer P le point sur la surface de la forme B le plus proche du centre de A  
 $P = \text{projection}(A, B)$
    - 2.1.2. Calculer  $D = \text{distance}(A, P)$
    - 2.1.3. Si  $D > \text{FoV}$ , revenir à la boucle 2.1
    - 2.1.4. Calculer  $G = \text{angle}(A, P)$
    - 2.1.5. Calculer  $C_i$ , le cône correspondant à l'angle G.
    - 2.1.6. Si G ne rentre dans pas dans un cône, revenir à la boucle 2.1
    - 2.1.7. Si  $M[C_i][X] > D/\text{Fov}$  :
      - 2.1.7.1. Alors:  $M[C_i][X] = D/\text{FoV}$
3. Pour chaque cône  $C_i$  :
  - 3.1. Calculer  $\text{minD} = \text{minimum}(M[C_i][X])$  avec X appartenant à la liste de types opaques T.opaque
  - 3.2. Remplacer toute les valeurs supérieures à minD dans  $M[C_i]$  par 1

#### Notes :

- 2 Boucles principales (2 et 3)  
 La 3ème est très peu coûteuse, toute la complexité viendra de la 2nde, qui viendra du nombre d'élément total de E, et non pas le nombre d'éléments distincts ! A avoir en tête si on veut une catégorie qui compte toutes les entités.
- Il y a une ambiguïté entre un objet qui est pile à la frontière du capteur et qui est en-dehors. Les deux renvoient une valeur de 1. Mais c'est solvable si on dit que le capteur ne voit pas dans le range  $[0 ; \text{Fov}]$  mais dans  $[0 ; \text{Fov}[$  avec Fov exclusif. Mathématiquement parlant, dans un monde continu, c'est presque

strictement équivalent.

- Schéma d'un edge case qui concerne un cas où on peut voir à travers un mur :



L'entité rouge sera perçue par l'agent alors qu'elle nous apparaît derrière le mur. C'est parce que le point le plus proche du mur se situe dans le cône 1 et qu'il ne peut donc obstruer la vision que sur ce cône là. Le moyen de calculer de façon précise, serait de redécouper le polygone du mur en 2 moitiés : celle dans le cone 1 et celle dans le cone 2 puis de recommencer les calculs.

Les soucis à ça sont :

- Avoir des algorithmes de découpage de polygones ça peut commencer à être trop poussé pour nous niveau technique
- Ça multiplie les calculs dans les boucles par le nombre de fois qu'un polygone puisse être découpé. Il est possible que ça soit très coûteux.
- Eventuellement mettre un warning si plus de 100 entités utilisées
- liste d'entité dynamique, mais pas tout recalculer à chaque fois

