

Simulation de colonies d'abeilles

SYMUA 2023

Bastien Pouessel - Tom Genlis - Quentin Fisch - Théo Ripoll - Antoine Boutin



I. Introduction	2
II. Théorie derrière la simulation	2
1. Environnement du papier	2
2. Environnement de la simulation	2
3. L'agent "abeille" au sein de la simulation	3
III. Notre démarche	4
1. Roadmap globale	4
2. Description des étapes de développement	4
a. Étape 1: Mise en place de l'environnement	4
b. Étape 2: Simulation basique	5
c. Étape 3: Implémentation d'une state machine	6
d. Étape 4: Gestion de plusieurs ruches	8
e. Étape 5: Évolution dynamique de l'environnement	9
f. Étape 6: Version finale avec suivi des indicateurs	10
3. Simplifications réalisées	11
IV. Analyse de sensibilité et résultats	12
1. Impact sur le nombre moyen de d'abeille	13
2. Impact sur le nombre total de pollen	14
3. Impact sur le nombre total de pollen des fleurs	15
V. Conclusion	15
VI. Sources	17

I. Introduction

L'objectif de cette étude est de mettre en lumière l'impact de l'environnement sur les ruches d'abeille. Pour cela, afin de mener à bien cette étude, nous avons implémenté un système multi-agent en NetLogo. Ce rapport vise à décrire la démarche derrière la construction de ce SMA, en détaillant le processus de création, l'analyse réalisée et les résultats obtenus.

II. Théorie derrière la simulation

La réalisation de cette simulation se base fortement sur les deux études citées dans les sources de ce rapport. Ces études sont très complètes et détaillées, et nous allons résumer les fondamentaux théoriques derrière la simulation que nous souhaitons mettre en place.

1. Environnement du papier

Dans le papier, l'environnement est modélisé comme un système complexe comprenant les informations sur la source et le contexte de butinage.

- Le Climat : heures de lever et de coucher du soleil ainsi que l'utilisation des données météorologiques réelles pour déterminer si une abeille peut sortir de la ruche. Les conditions de sortie sont influencées par la longueur de la journée et la météo, notamment la température, l'humidité, la nébulosité, etc.
- Les Sources : représente les sources de nectar et de pollen environnantes, leur distance à la ruche, la période, la durée et le pic de floraison, ainsi que la concentration en sucre du nectar disponible. Il est possible de générer un certain nombre de sources aléatoires, de configurer les principales sources locales et de régler la concentration en sucre des sources artificielles en cours de simulation.

Ces deux facteurs sont intégrés dans un "Module Écosystème" qui simule l'activité de butinage en se basant sur une représentation symbolique et fonctionnelle de l'environnement extérieur de la ruche. Cela permet de modéliser les conditions environnementales auxquelles les abeilles sont confrontées lors de leur sortie pour la collecte de nectar et de pollen.

2. Environnement de la simulation

Dans cette simulation, nous nous concentrons sur un écosystème comprenant des fleurs et des ruches d'abeilles. Cet écosystème est l'environnement dans lequel les agents vont évoluer. Au sein de celui-ci, les fleurs, réparties aléatoirement, sont la source de pollen pour les abeilles. Chaque fleur a une quantité de pollen qui diminue lorsqu'une abeille la butine, mais elle peut régénérer son pollen avec le temps.

Les ruches, quant à elles, abritent les abeilles et stockent le pollen qu'elles collectent. Ce pollen est utilisé pour la naissance de nouvelles abeilles. De plus, chaque ruche garde une

trace de la quantité maximale de pollen qu'elle a stockée, ce qui lui permet d'évaluer la rentabilité de butiner une fleur spécifique.

Il est important de noter que cette simulation se concentre uniquement sur la source de pollen et ne prend pas en compte d'autres facteurs qui pourraient affecter le butinage, tels que la météo ou l'heure de la journée. Ainsi, bien que simplifiée, cette simulation offre une représentation significative des interactions entre les abeilles et les fleurs.

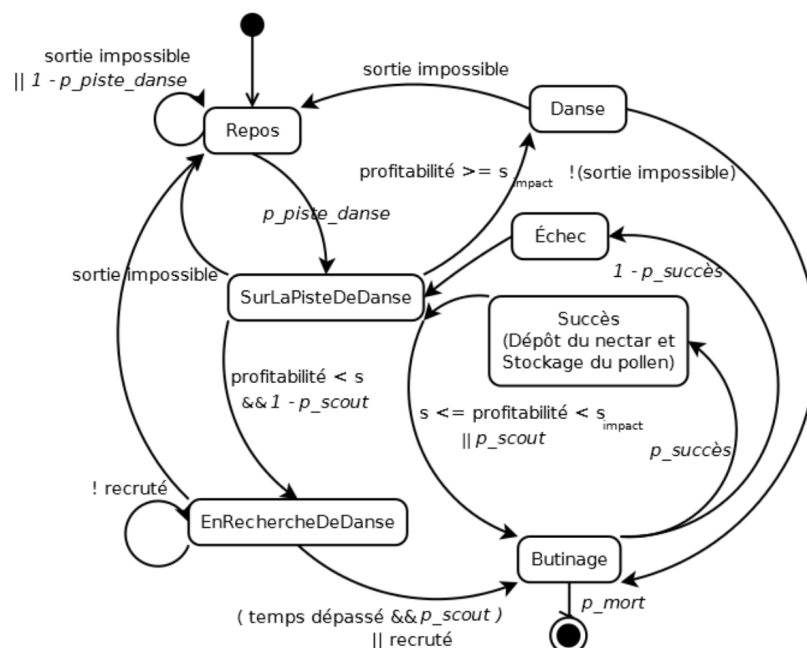
3. L'agent "abeille" au sein de la simulation

Dans le cadre de la simulation de l'écosystème des abeilles, l'agent abeille est conceptualisé comme un acteur autonome doté de capacités spécifiques et de comportements régis par des probabilités.

L'abeille est capable de se déplacer dans son environnement avec une certaine vitesse, qui peut être modulée en fonction de facteurs tels que la charge de pollen qu'elle porte. Sa capacité à localiser les fleurs pour le butinage est déterminée par une distance de recherche spécifique, qui représente la portée de sa perception de l'environnement.

Elle est également capable de cibler et de butiner une fleur spécifique, ce qui lui permet de collecter du pollen. La quantité de pollen qu'elle peut porter est une mesure de sa capacité de butinage. De plus, chaque abeille est associée à une ruche spécifique, qui sert de lieu de résidence et de dépôt pour le pollen collecté. L'abeille retourne à la ruche après le butinage pour déposer le pollen qu'elle a collecté.

Le comportement de l'abeille est également influencé par une série de probabilités. Par exemple, la probabilité de succès ou d'échec de ses actions, la probabilité de suivre une piste de danse pour localiser une source de pollen, la probabilité de mourir, la probabilité de devenir un scout à la recherche de nouvelles sources de pollen, et la probabilité qu'une sortie pour le butinage soit impossible. L'agent abeille présenté dans le papier repose sur le schéma de machine à état suivant:



En somme, l'agent abeille est un acteur complexe et dynamique dans l'écosystème simulé, dont les actions et les interactions sont déterminées par une combinaison de capacités intrinsèques, de comportements régis par des probabilités et de réponses aux conditions environnementales. L'abeille se comporte suivant une série d'états, ce qui rend son implémentation en tant qu'agent plus structurée.

III. Notre démarche

1. Roadmap globale

La mise en place de cette simulation s'est déroulée autour d'une roadmap visant à complexifier de plus en plus le système. L'objectif initial était de créer un environnement simple mais efficace, permettant de compléter les premières simulations. Ensuite, nous avons développé l'agent abeille très basiquement, afin de d'obtenir un visuel convenable plutôt qu'une simulation réaliste. Dans un troisième temps, nous avons revu l'agent abeille pour implémenter une state machine, avant d'ajouter la gestion de plusieurs ruches. Finalement, l'environnement a été dynamisé puis la version finale avec des plots a été développée.

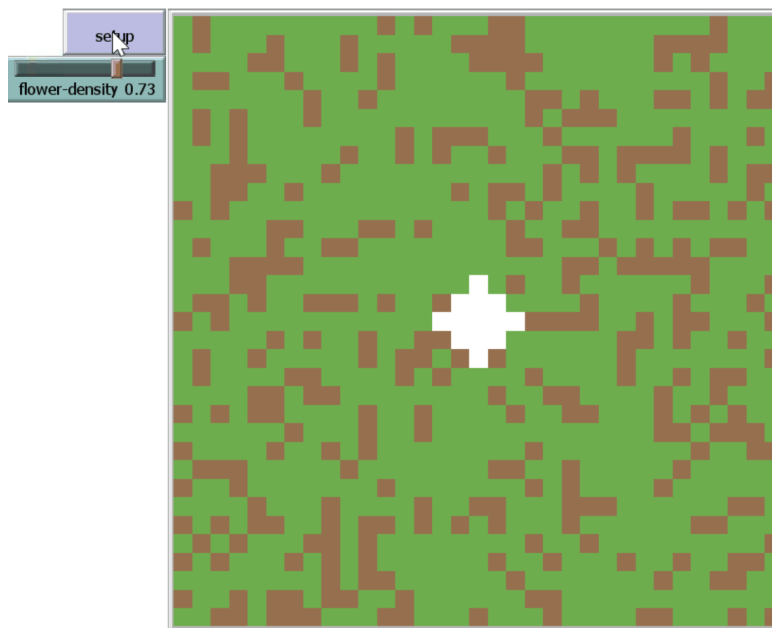
2. Description des étapes de développement

a. Étape 1: Mise en place de l'environnement

Dans le cadre du développement du système en utilisant NetLogo, plusieurs fonctionnalités clés ont été mises en œuvre pour simuler l'environnement des ruches d'abeilles. Les fleurs, qui représentent les ressources alimentaires pour les abeilles, sont générées de manière aléatoire sur la carte. L'hyperparamètre **flower-density** contrôle le nombre total de fleurs présentes dans l'environnement. Lors de l'initialisation de la simulation, des patches sont attribués aléatoirement à l'état de fleur en définissant l'attribut **flower?** à *true*. Une couleur spécifique est attribuée aux patches représentant les fleurs pour les distinguer des patches normaux.

La ruche, en tant que lieu central pour les abeilles, est instanciée au milieu de la grille. Cela permet de simuler la tendance des abeilles à se regrouper autour de leur colonie. L'emplacement de la ruche est pour l'instant défini par défaut au milieu car il n'est pas encore lieu d'effectuer une simulation finale.

Ces fonctionnalités implémentées dans le système multi-agent créent un environnement de base solide pour les améliorations futures. Voici une capture d'écran de la simulation après cette première phase de développement, avec la ruche au centre en blanc et les fleurs en vert (ici avec une forte densité):



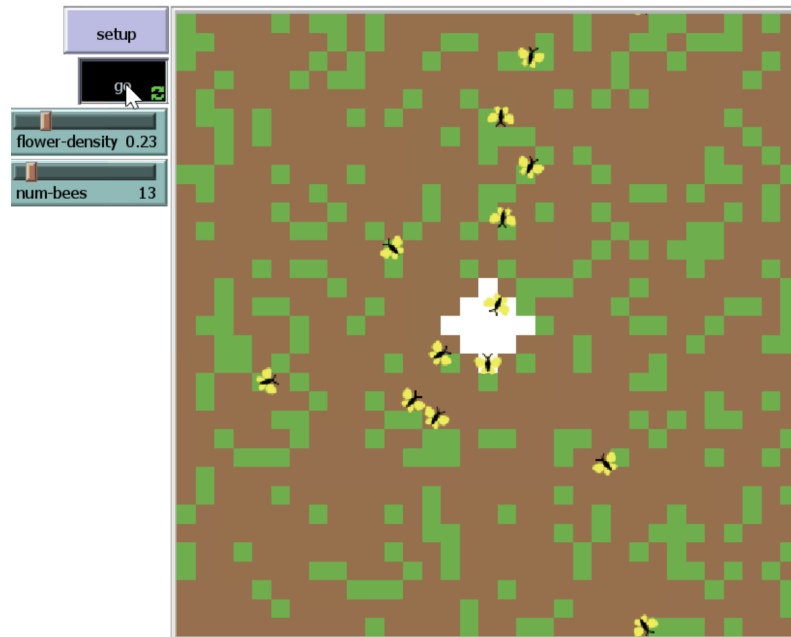
b. Étape 2: Simulation basique

La première amélioration faite à notre système est la mise en place des agents abeilles, avec la gestion du pollen et de retour à la ruche.

Les agents abeilles apparaissent tous au centre de la ruche et choisissent au hasard une fleur à butiner. Ils se dirigent ensuite vers la fleur sélectionnée en ligne droite. Lorsqu'une abeille collecte du pollen, sa vitesse est réduite de moitié, simulant ainsi la limitation de vol due au poids supplémentaire. Une fois l'abeille chargée de pollen de retour à la ruche, la quantité de pollen dans la ruche augmente de manière linéaire.

Nous avons également intégré un paramètre de réglage pour le nombre d'abeilles dans le système, ce qui permet d'explorer différentes populations et d'étudier leur impact sur la collecte de pollen et la croissance de la ruche.

Ce modèle n'est encore qu'une représentation inutilisable du système final, mais reste un POC intéressant montrant le comportement des abeilles dans un environnement simple. L'image ci-dessous est l'état du système après cette étape de développement:



c. Étape 3: Implémentation d'une state machine

Une autre évolution du système consiste à mettre en œuvre une machine à états dans l'agent abeille, permettant ainsi de modéliser de manière précise le comportement des abeilles. Cette approche repose sur l'utilisation d'une state machine présentée dans la partie théorique de l'étude. Les différentes tâches auxquelles une abeille peut être assignée sont représentées par des états distincts : Repos, Sur la piste de danse, En recherche de danse, Butinage, Succès, Échec et Danse.

Chaque abeille change de couleur en fonction de l'état dans lequel elle se trouve, offrant ainsi une visualisation claire de son activité et de sa progression au sein de la state machine. Cette représentation visuelle facilite l'observation du comportement des abeilles et permet de détecter d'éventuels problèmes ou erreurs dans leur séquence d'états.

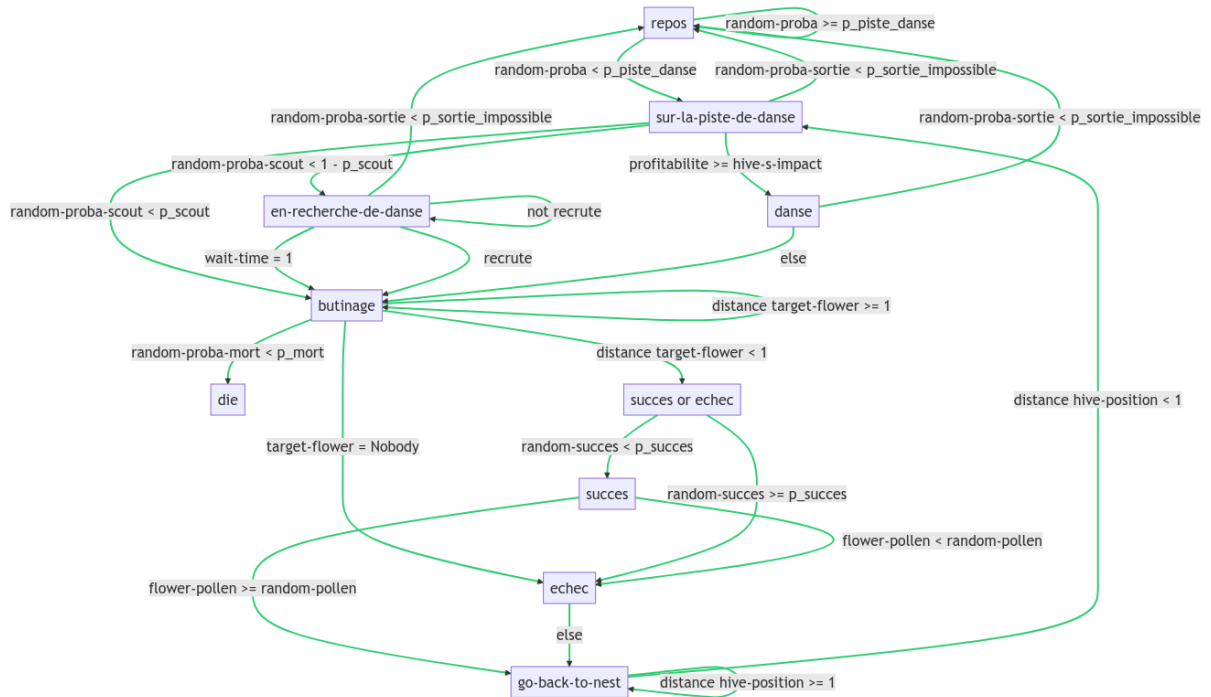
Chaque agent abeille est doté d'un attribut appelé **next-task** qui stocke la prochaine fonction à appeler, correspondant à l'état suivant dans lequel l'abeille se trouvera. Ce design basé sur la state machine permet de simplifier grandement la méthode **go** de l'agent abeille, tout en organisant efficacement le code. Voici un exemple de comment l'attribut **next-task** est utilisé, ainsi que le code final de la méthode **go**:

```
to go
  ask turtles [
    run next-task
  ]

  decrease-nest-pollen
  increase-flower-pollen
  plot-pollen
  tick
end

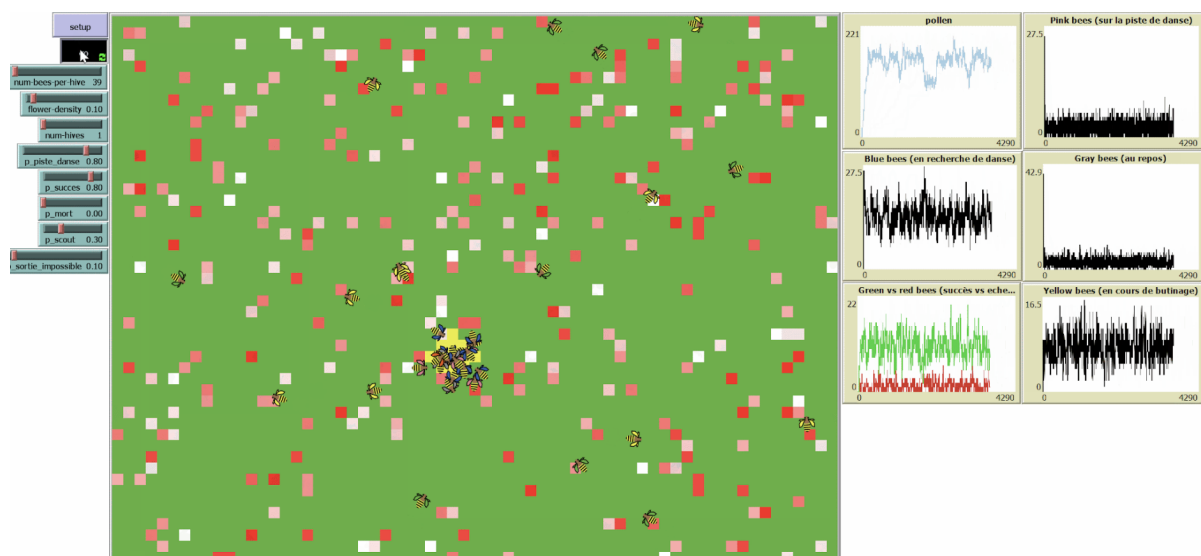
ifelse (random-proba < p_piste_danse)[
  set next-task [ -> sur-la-piste-de-danse ]
] [
  set next-task [ -> repos ]
]
```

En utilisant cette approche basée sur la state machine, le code de l'agent abeille devient plus modulaire et facile à comprendre. Chaque fonction correspondant à un état spécifique peut être clairement définie et gérée indépendamment, améliorant ainsi la maintenabilité et l'extensibilité du modèle. Finalement, la state machine implémentée suit ce schéma:



De plus, les fleurs sont maintenant représentées par un gradient de blanc à rouge, ou blanc signifie qu'elles n'ont plus de pollen, et rouge qu'elles en sont pleines.

L'évolution du système en introduisant une state machine dans l'agent abeille offre une représentation plus réaliste et précise du comportement des abeilles. Les abeilles passent d'un état à l'autre en fonction de leur activité, ce qui permet de mieux comprendre leur dynamique et leurs interactions avec l'environnement. Cette approche simplifie également le code et améliore la compréhension du modèle, renforçant ainsi sa robustesse et sa flexibilité.



d. Étape 4: Gestion de plusieurs ruches

L'évolution du système pour prendre en compte la gestion de plusieurs ruches a nécessité une révision de plusieurs aspects. D'abord, il a fallu repenser la manière dont les abeilles retournent à leur ruche. À cet effet, lors de l'initialisation, chaque abeille est assignée à une ruche spécifique en utilisant son attribut **hive**. Cette assignation permet de déterminer à quelle ruche chaque abeille appartient, facilitant ainsi la gestion des interactions entre les abeilles et leur colonie.

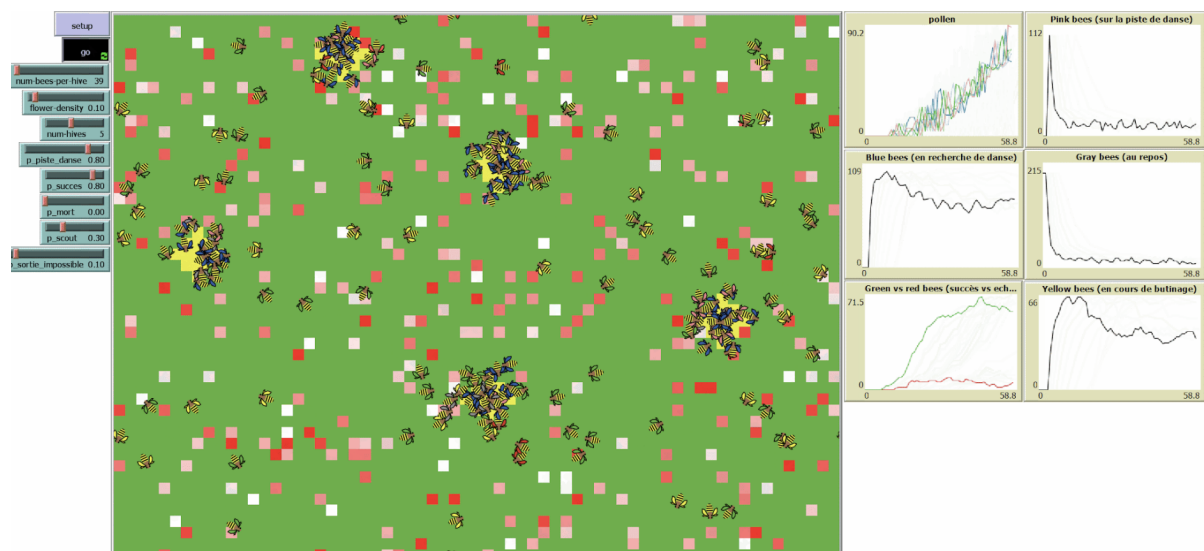
Ensuite, le système a été adapté pour générer un nombre spécifié d'abeilles par ruche, contrôlé par le paramètre **num-bees-per-hive**. Cette configuration permet de modéliser la population d'abeilles dans chaque ruche, prenant en compte les différences entre les colonies et leurs dynamiques spécifiques.

Les ruches elles-mêmes sont représentées par des patches qui possèdent des attributs spécifiques. Elles enregistrent la quantité actuelle de pollen (**hive-pollen**), qui varie en fonction des activités des abeilles de la ruche. De plus, les ruches enregistrent le ratio actuel de pollen par rapport au pollen maximum atteint (**hive-s-impact**) - nécessaire pour calculer la probabilité de sortir butiner - et la quantité maximale de pollen enregistrée (**hive-max-pollen**). Ces caractéristiques permettent de suivre la quantité de pollen dans chaque ruche et d'évaluer l'impact des activités des abeilles sur les ressources disponibles.

Pour simuler une dispersion réaliste des colonies d'abeilles, les ruches sont placées de manière aléatoire sur la carte, en respectant le nombre spécifié par le paramètre **num-hives**. Cette distribution aléatoire reproduit la dispersion naturelle des ruches dans un environnement donné, ajoutant ainsi un aspect réaliste à la simulation.

L'évolution du système pour prendre en compte plusieurs ruches offre une représentation plus réaliste de l'organisation sociale des abeilles. Les abeilles sont assignées à des ruches spécifiques, ce qui influence leur comportement et leurs interactions. Les caractéristiques des ruches permettent de suivre l'évolution du pollen dans chaque colonie, fournissant ainsi des informations précieuses sur les ressources disponibles et les performances des ruches individuelles.

Cette évolution du système offre donc une approche plus complète pour étudier les interactions complexes entre les colonies d'abeilles, l'impact de leurs activités sur les ressources et la dynamique globale des ruches. Voici l'état du modèle après ces modifications:



e. Étape 5: Évolution dynamique de l'environnement

Lorsqu'une abeille butine une fleur, le pollen de la fleur diminue. À chaque butinage, une abeille sélectionne de manière aléatoire entre 20 et 30 unités de pollen, qu'elle retire directement de la fleur. Cette diminution du pollen des fleurs simule la collecte de pollen par les abeilles et la réduction des ressources disponibles.

Le pollen dans une ruche diminue également à chaque itération. Ce processus est régulé par le paramètre **flower-pollen-increase-rate**. Il permet de maintenir un équilibre dans la quantité de pollen présente dans la ruche, compensant ainsi l'augmentation de pollen provenant des fleurs butinées et la naissance de nouvelles abeilles.

Les abeilles naissent à intervalles réguliers grâce au paramètre **birth-timer**. Ce mécanisme permet de compenser la mortalité des abeilles qui sortent butiner. Les nouvelles abeilles viennent renforcer la population de la ruche, assurant ainsi la continuité de ses activités et la collecte de pollen.

Grâce à ces améliorations de l'environnement, le modèle parvient à mieux simuler les interactions entre les abeilles, les fleurs et les ruches. La diminution du pollen des fleurs lors du butinage par les abeilles reproduit le processus de collecte de pollen, tandis que la diminution du pollen dans la ruche régule les ressources disponibles et compense les pertes liées aux sorties butinage.

De plus, la naissance régulière des abeilles permet de maintenir une population active et de remplacer celles qui meurent en quittant la ruche pour butiner. Ces améliorations contribuent à une simulation plus réaliste de la dynamique des ruches d'abeilles et de leur interaction avec l'environnement.

Voici un récapitulatif des composants des patches, pour les ruches et les fleurs:

- Apparition de fleurs sur le terrain qui ont les variables :
 - Pollen stocké (par fleur)
 - Initialement choisi aléatoirement entre min et max

- Diminue à chaque butinage
 - Régénère au cours du temps
- Apparition de ruches d'abeilles qui ont les variables :
 - Nombre de ruches (global)
 - Pollen stocké (par ruche)
 - Augmente à chaque butinage réussi
 - Diminue à chaque naissance d'abeille
 - Suivi du nombre maximal de pollen pour calculer la profitabilité d'un potentiel
 - Population initiale d'abeille (global)

L'amélioration de l'environnement du système en prenant en compte la réduction du pollen des fleurs, la diminution du pollen dans les ruches et la naissance régulière des abeilles permet d'obtenir une représentation plus fidèle du fonctionnement des colonies d'abeilles et de leurs activités de butinage. Ces ajustements enrichissent la simulation et offrent une meilleure compréhension des interactions entre les abeilles et leur environnement.

f. Étape 6: Version finale avec suivi des indicateurs

Les abeilles se déplacent désormais en effectuant de petits mouvements latéraux. Bien que cela soit purement esthétique, cela contribue à rendre la simulation plus réaliste et immersive, en ajoutant des mouvements fluides aux abeilles lorsqu'elles interagissent avec leur environnement. Les paramètres et fonctions finales du modèles sont résumés sur la mindmap suivantes:

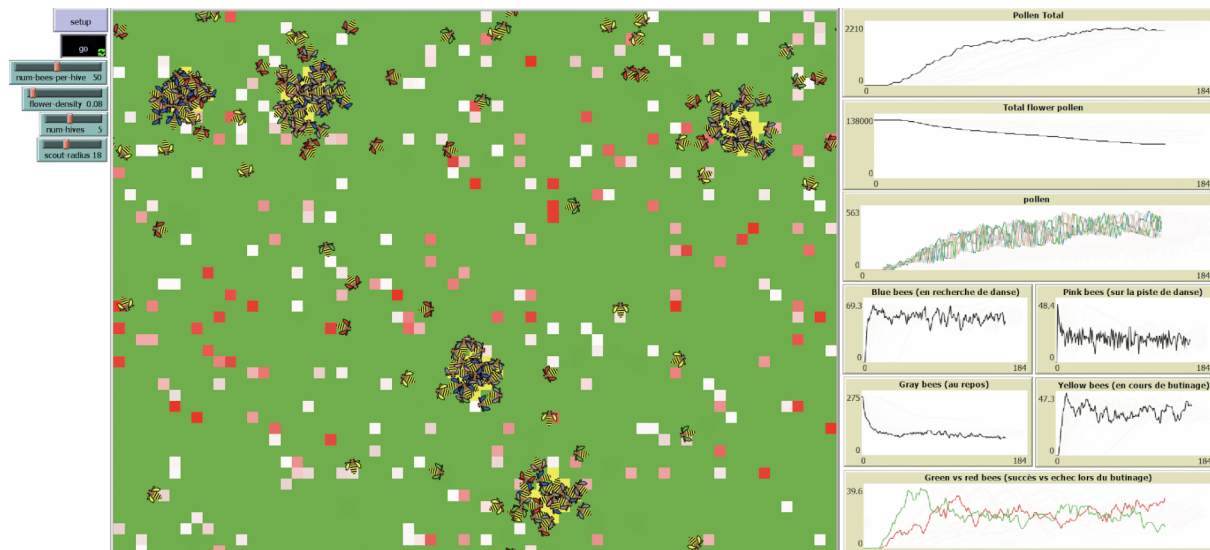


Des méthodes spécifiques ont été ajoutées pour tracer le pollen total des ruches et le pollen total des fleurs. Ces tracés permettent de visualiser facilement l'évolution des quantités de pollen dans les ruches et les fleurs au fil du temps. Ces informations graphiques offrent une meilleure compréhension des variations et des tendances dans la disponibilité des ressources.

Le formatage du système a été optimisé pour simplifier l'utilisation de la bibliothèque PyNetLogo et de l'outil SALib. Ces améliorations facilitent la réalisation de l'analyse de sensibilité et l'obtention des résultats finaux. Les utilisateurs peuvent ainsi plus facilement appliquer des méthodes d'analyse avancées pour étudier l'impact de différents paramètres sur le comportement du système et obtenir des conclusions plus précises.

Ces changements finaux améliorent l'expérience globale de la simulation et facilitent l'analyse des résultats. L'aspect esthétique des mouvements des abeilles ajoute du réalisme, tandis que les méthodes de traçage permettent une visualisation claire des données. En outre, le formatage du système simplifie l'utilisation d'outils d'analyse avancés, ce qui favorise une meilleure compréhension des relations entre les paramètres du système et son comportement.

En résumé, les dernières modifications apportées au système visent à améliorer l'aspect visuel, à faciliter l'analyse des données et à simplifier l'utilisation d'outils d'analyse externes. Ces améliorations contribuent à une simulation plus immersive et permettent une exploration plus approfondie du comportement des ruches d'abeilles.



3. Simplifications réalisées

Tout d'abord, dans le modèle, les abeilles restent dans la même ruche tout au long de la simulation. Cette simplification permet de réduire la complexité du modèle en éliminant les interactions entre différentes ruches et en se concentrant sur le comportement des abeilles au sein de leur propre colonie. Bien que cette simplification ne reproduise pas

pleinement les déplacements réels des abeilles entre les ruches, elle permet de mieux comprendre les dynamiques internes de chaque ruche individuelle.

Aussi, toutes les abeilles sont initialement les mêmes, ce qui n'est pas le cas en réalité, ou différents types d'abeilles - à la fois dans les rôles et la génétique - coexistent.

En ce qui concerne les fleurs, elles sont dotées d'un niveau de pollen initial aléatoire défini au début de la simulation. Ce niveau de pollen se régénère ensuite linéairement, toutes les fleurs à la même vitesse. Cette simplification permet de modéliser la disponibilité des ressources de manière générale, sans tenir compte des variations complexes qui peuvent exister dans la nature. Bien que cela ne capture pas toutes les nuances des dynamiques réelles des fleurs, cela permet de se concentrer sur l'interaction entre les abeilles et les fleurs dans un contexte simplifié.

De plus, à chaque itération, le niveau de pollen de chaque ruche diminue selon un taux fixe. Cette baisse régulière du pollen dans les ruches est une simplification qui ne prend pas en compte les fluctuations naturelles et les variations induites par les activités des abeilles. Cela permet néanmoins de représenter la diminution générale des ressources dans la ruche au fil du temps.

Enfin, la naissance des abeilles est déterminée par un intervalle de temps fixe. Cette simplification permet de compenser la mortalité des abeilles qui sortent butiner en garantissant une présence constante d'abeilles dans la ruche. Cependant, cela ne reproduit pas les mécanismes complexes de régulation de la population des abeilles qui peuvent exister dans la réalité.

Ces simplifications ont été apportées pour rendre le modèle plus accessible et moins complexe à implémenter. Bien qu'elles ne capturent pas tous les détails des études scientifiques, elles permettent néanmoins de simuler et d'explorer certains aspects fondamentaux des interactions entre les abeilles et leur environnement. Il est important de garder à l'esprit ces simplifications lors de l'interprétation des résultats obtenus à partir du modèle.

IV. Analyse de sensibilité et résultats

L'analyse de Sobol a été utilisée pour effectuer une analyse de sensibilité sur les variations de pollens, le nombre d'abeilles et le pollen des fleurs. L'objectif principal était d'évaluer l'impact des différents paramètres sur ces variables d'intérêt.

L'analyse de Sobol a été réalisée en prenant en compte les variations des paramètres un par un, afin de déterminer l'effet individuel de chaque paramètre sur le nombre moyen d'abeilles. Cela a permis de quantifier l'importance relative de chaque paramètre dans les fluctuations observées. La méthode de l'analyse de Sobol nous a permis d'établir les valeurs des paramètres et d'explorer différentes combinaisons afin d'évaluer leur impact sur le nombre moyen d'abeilles. Pour assurer une évaluation robuste, nous avons effectué des simulations sur une période de 10 000 ticks. Ce choix de durée s'est avéré pertinent, car il

permet de réduire l'influence des variations initiales de la simulation et de se concentrer sur les effets à long terme.

Les paramètres pour l'analyse de Sobol sont définis de la manière suivante :

- Nombre d'abeilles par ruche (**num-bees-per-hive**) : dans l'intervalle [1, 100] avec un pas de 1.
- Densité des fleurs (**flower-density**) : dans l'intervalle [0, 1] avec un pas de 0.01.
- Nombre de ruches (**num-hives**) : dans l'intervalle [1, 10] avec un pas de 1.
- Rayon de recherche des éclaireuses (**scout-radius**) : dans l'intervalle [3, 40] avec un pas de 1.

L'analyse de Sobol permet d'obtenir trois indices:

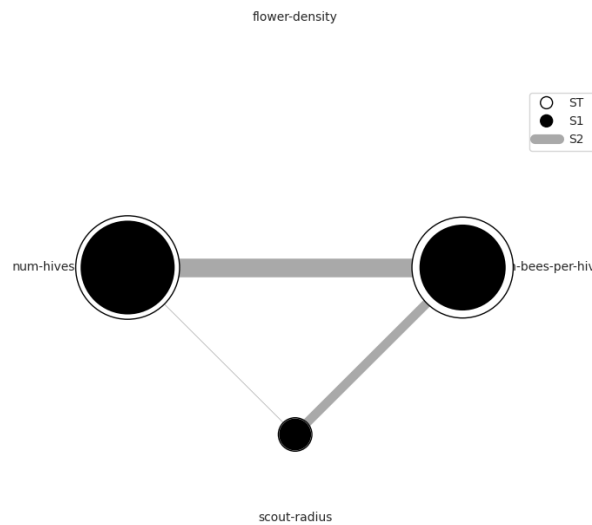
- **S1**: L'indice de sensibilité de premier ordre, tenant compte de la variation de ce paramètre uniquement, en ignorant les interactions avec d'autres paramètres.
- **S2**: L'indice de sensibilité de deuxième ordre, mesure l'effet conjoint de deux paramètres sur la sortie
- **ST**: L'indice de sensibilité total, est la somme de tous les indices de sensibilité d'ordre supérieur pour un paramètre donné.

1. Impact sur le nombre moyen de d'abeille

L'analyse a révélé que la densité des fleurs n'a pas d'impact direct sur le nombre d'abeilles. En revanche, le nombre de ruches et le nombre initial d'abeilles dans les ruches ont une influence majeure sur la simulation. Les observations suivantes ont été faites :

- Au cours de la simulation, les naissances et les décès d'abeilles atteignent rapidement un équilibre, ce qui indique que les paramètres d'initialisation ont un impact significatif sur la simulation.
- Une forte variation est observée lorsque les paramètres num-hives et num-bees-per-hive sont modifiés dans la même direction.
- L'augmentation du rayon de recherche des éclaireuses (scout-radius) en fonction du nombre d'abeilles par ruche permet d'augmenter la quantité de pollen et, par conséquent, d'accroître les naissances d'abeilles et leur impact sur le nombre total d'abeilles.

Ces observations soulignent l'importance des paramètres liés au nombre de ruches, au nombre d'abeilles par ruche et au rayon de recherche des éclaireuses dans la dynamique de la population d'abeilles et la disponibilité du pollen.

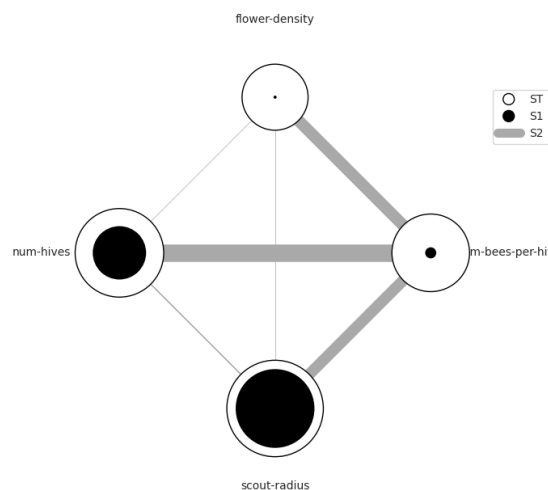


2. Impact sur le nombre total de pollen

L'analyse a révélé que l'ensemble des paramètres a une contribution significative sur le nombre moyen du pollen total dans la simulation. Cependant, certains paramètres se sont avérés plus importants que d'autres lorsqu'ils étaient variés individuellement.

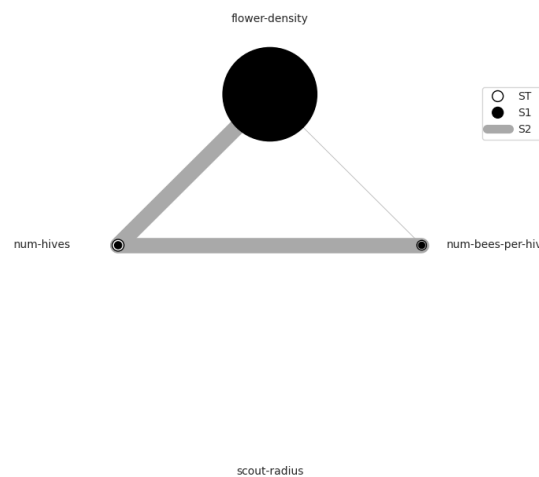
- L'analyse a révélé que l'ensemble des paramètres a une contribution significative sur le nombre moyen du pollen total dans la simulation.
- Cependant, certains paramètres se sont avérés plus importants que d'autres lorsqu'ils étaient variés individuellement.

Cela met en évidence que la contribution d'un seul paramètre, comme la densité des fleurs (flower-density) ou le nombre d'abeilles par ruche (num-bee-per-hive), peut avoir un impact limité sur le système. Cependant, lorsque ces paramètres sont combinés avec d'autres, leur contribution peut devenir significative.



3. Impact sur le nombre total de pollen des fleurs

Le nombre total de pollen des fleurs est principalement impacté par la densité de fleurs. Cela s'explique par la manière dont nous mesurons le pollen des fleurs, en observant le pollen total dans le système. Nous constatons qu'une contribution minime provient principalement du nombre d'abeilles dans le système, qui est influencé par le nombre de ruches ainsi que le nombre d'abeilles lors de l'initialisation.



En conclusion, pour réaliser notre analyse de Sobol, nous avons développé un script Python afin d'automatiser le processus. Cette approche nous a permis de mener une expérimentation approfondie et de quantifier les contributions, à la fois simples et complexes, des différents paramètres sur le système étudié.

V. Conclusion

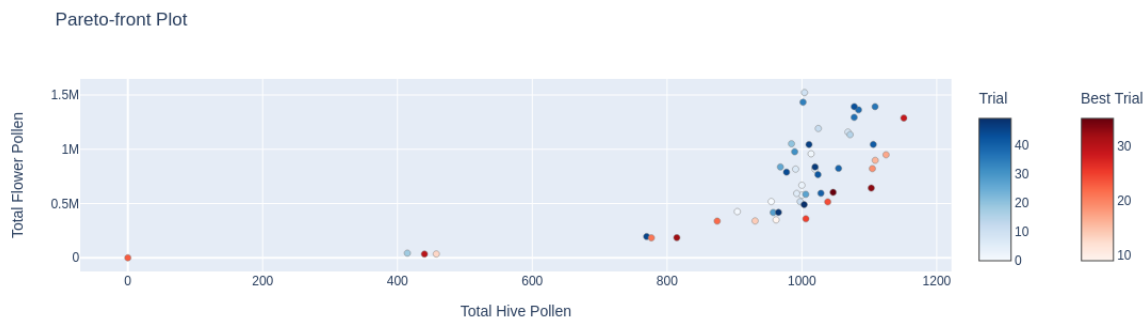
Dans cette étude, notre objectif était de minimiser le nombre de fleurs nécessaires pour soutenir cinq ruches, en se basant sur les résultats obtenus à partir d'un article scientifique préexistant. Pour cela, nous avons fixé certains paramètres du modèle. Le rayon de recherche des abeilles a été défini à 20, le nombre de ruches à cinq, et le nombre d'abeilles à 50.

L'optimisation de notre système repose sur deux critères principaux : le niveau de pollen dans les ruches et le niveau de pollen dans les fleurs. Notre objectif consiste à maximiser la quantité de pollen présente dans les ruches tout en minimisant la quantité de pollen dans les

fleurs. Cette approche vise à assurer un environnement durable et équilibré pour les abeilles, en optimisant l'allocation des ressources.

En cherchant à déterminer l'emplacement optimal des ruches et le nombre minimal de fleurs nécessaires, nous visons à créer un équilibre entre les besoins des abeilles et les ressources disponibles. En minimisant le nombre de fleurs tout en maintenant un niveau adéquat de pollen dans les ruches, nous pouvons fournir un environnement favorable à la survie et à la prospérité des abeilles.

En conclusion, cette étude s'est concentrée sur la minimisation du nombre de fleurs nécessaires pour soutenir un nombre spécifique de ruches. En fixant certains paramètres du modèle et en optimisant la quantité de pollen dans les ruches tout en minimisant la quantité de pollen dans les fleurs, nous avons cherché à déterminer l'emplacement optimal des ruches et le nombre minimum de fleurs requises. Ces résultats contribuent à la création d'un environnement soutenable pour les abeilles, en assurant un équilibre entre leurs besoins et les ressources disponibles..



L'optimisation de notre modèle pose un défi, car nous cherchons à trouver un compromis entre deux valeurs : maximiser le pollen dans les ruches tout en minimisant le pollen des fleurs. En explorant les résultats du schéma, nous avons identifié les points optimaux qui correspondent à un total de pollen de 1000 dans les ruches et à un niveau de pollen inférieur à 0,5 million dans les fleurs.

Pour atteindre ces points optimaux, nous avons trouvé que les valeurs de densité de fleurs idéales se situent entre 0,25 et 0,35 sur une grille d'environnement de taille 32x32. Cela signifie qu'environ 25% à 35% de la surface totale de l'environnement est occupée par des fleurs.

En conclusion, cette étude a permis d'étendre les résultats du papier de référence en déterminant la densité de fleurs optimale requise pour soutenir cinq ruches. Nos résultats suggèrent qu'une densité de fleurs d'environ 30% de la superficie totale de l'environnement est nécessaire pour atteindre un équilibre optimal entre les besoins des abeilles et les ressources disponibles.

Cette conclusion fournit des informations supplémentaires pour compléter le papier de référence, en soulignant l'importance de la densité de fleurs dans la soutenabilité des colonies d'abeilles. Elle met en évidence la nécessité de prendre en compte cet aspect

crucial lors de la conception de stratégies de gestion des ruches et de préservation des populations d'abeilles.

VI. Sources

La grande majorité des informations scientifiques relatives à notre modèle s'appuient sur les deux études suivantes:

- <https://www.perennia.ca/wp-content/uploads/2018/04/02-effect-of-hb-stocking-density-on-wb-french.pdf>
- <https://roia.centre-mersenne.org/item/10.5802/roia.38.pdf>