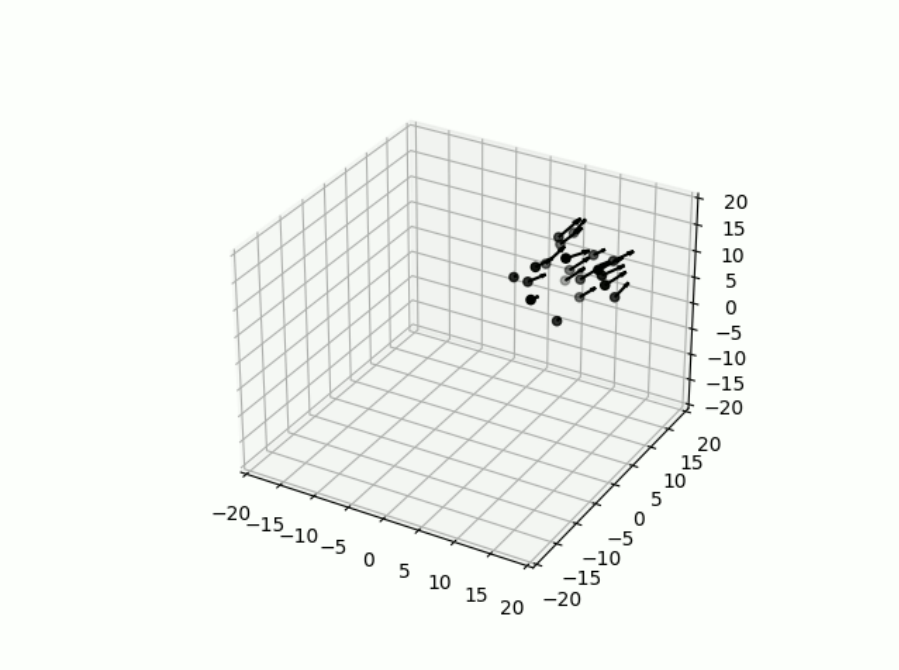
Licence 3 de Physique, Chimie, Astrophysique, Météorologie et Énergie

Rapport du projet numérique

Modèle de Vicsek

Alexis Peyroutet, Antoine Royer



Janvier – Juin 2023

Table des matières

Introduction

Notre sujet est intitulé « Modèle de Vicsek ». Le but de ce projet numérique est de reproduire de manière numérique le modèle de Vicsek.

Le modèle de Vicsek a été crée par le scientifique Tamás Vicsek. Il s'agit d'un physicien hongrois connu pour ses contributions à la physique statistique, à la biologie et à la dynamique des systèmes. Il est né le 10 mai 1948 (74 ans aujourd'hui) à Budapest. Il est aujourd'hui professeur à l'Université Eötvös Loránd de Budapest. Ce brillant physicien est d'ailleurs un des membres de l'Académie hongroise des sciences et a reçu de nombreux prix pour ses contributions à la physique, notamment le prix Széchenyi (en 1999) ou encore le prix Lars Onsager (en 2020).

Mais Tamás Vicsek est surtout connu pour son travail sur les systèmes auto-organisés ; ces modèles permettent d'étudier les mouvements collectifs. Il a ainsi travaillé sur le comportement d'agents individuels qui interagissent avec d'autres agents aux alentours, ses observations montrent que des motifs de mouvements collectifs émergent d'eux-même.

Le groupe se déplace alors de manière coordonnée sans qu'il n'y ait de leader comme on peut l'observer notamment dans la migration des grues. Nous pouvons citer comme exemples : les bancs de poissons, les regroupements de certains oiseaux, les essaims d'insectes, ou encore le mouvement de foules.

Le premier modèle de Vicsek voit ainsi le jour en 1995.

Chapitre 1

Présentation et explications

Le modèle de Vicsek permet d'étudier un groupe d'agents qui se déplace dans un espace.

Chacun des agents a une vitesse donnée (en norme et en direction) et va interagir avec ses voisins. Ce qui concrètement se traduit par des changements concernant la norme et la direction de la vitesse.

Nous nous attendons alors à observer la création d'un mouvement de groupe du aux interactions entre les agents.

Cependant, les agents observables dans la vie réelle ne suivent pas toujours le groupe à la perfection, et il peut arriver qu'un agent s'écarte, de manière aléatoire, des autres. C'est pour cela que Vicsek a introduit une notion de bruit dans son modèle. En effet, à chaque pas de temps, chaque agent va prendre la direction moyenne des agents autour de lui et à cette direction va venir se superposer un bruit qui le fera peut-être dévier dans une autre direction.

En augmentant significativement le bruit, le groupe pert son mouvement collectif et les agents prennent alors des directions aléatoires.

Le modèle de Vicsek s'implémente très simplement puisqu'il se réduit à deux équations :

$$\begin{cases} \Theta_i(t+\mathrm{d}t) &= \Theta_{j|r_i-r_j|<r} + \eta_i(t) \\ r_i(t+\mathrm{d}t) &= r_i(t) + v_i \Delta t \end{cases}$$

dans lesquelles r_i la position de chaque individu donnée par un vecteur de position, nous prendrons i comme indice de l'agent en question et t le temps. Nous noterons également η le bruit et Θ pour l'angle définissant la direction de sa vitesse. Ici, $\Theta_{j|r_i-r_j|<r}$ nous indiquera la direction moyenne des vitesses des agents dans un cercle de rayon r. L'indice j représentera alors l'ensemble des voisins de i compris dans ce cercle.

Ce qui est intéressant, c'est que nous pouvons, en modifiant certains paramètres du système étudié, observer un mouvement de foule plus fort ou plus faible. Nous pourrons alors jouer sur la surface et les dimensions du plan étudié, le nombre d'agent et donc par conséquent la densité de population et même le bruit.

Le modèle de Vicsek est important pour étudier le comportement de certains animaux en biologie ou encore l'étude des foules. Ce modèle peut même être utile à la construction de bâtiment. En effet, le comportement des foules peut être intéressant dans la conception d'entrées et de sorties d'un espace fermé, notamment dans un moment de panique. La foule va s'éloigner du danger est emprunter les sorties. Il est alors crucial de prévoir le comportement des agents pour placer les sorties de manière à ce que le débit d'agent sortant soit le plus important possible.

Nous pouvons également retrouver le modèle de Vicsek dans la robotique. C'est un précieux outil pour la technologie du monde moderne. Il peut être utiliser dans des programmes informatiques qui gèrent le déplacement de systèmes de robots (comme les drones).

C'est avec tout cela que nous avons essayer, à travers ce projet, de reproduire numériquement des mouvements collectifs et ainsi étudier le modèle de Vicsek.

Chapitre 2

Méthode employée

2.1 Classes et méthodes

Pour ce projet, la programmation orientée objet s'est naturellement imposée. Nous utilisons ainsi deux classes appelées `Agent` et `Group` qui fixent respectivement les paramètres de l'agent et du groupe. Assez simplement, la classe `Group` contient une liste d'instances de la classe `Agent` et permet de les représenter dans l'espace et le temps. La classe `Agent` permet d'encapsuler toutes les données de chaque agent : position, vitesse et direction, bruit, champ de vision etc.

Ainsi, nous pouvons retrouver dans chaque classe, plusieurs méthodes qui vont nous aider à mieux définir les groupes et les agents ainsi qu'à les faire évoluer.

2.2 Création et manipulations d'agents

Pour représenter nos agents, nous avons créé une classe qui contient la position de l'agent, sa direction, ainsi que sa vitesse.

À ces paramètres de bases, nous avons rajouté la distance de vision qui permet à chaque agent d'avoir une vue limitée d'une part, mais aussi variable d'un agent à l'autre, ce qui nous permet de simuler une population avec des aveugles par exemple ou des individus d'âges différents (ce qui n'est pas le cas dans le modèle de Vicsek) . Les agents ont également un champs de vision unique. Cela caractérise son angle de vue.

Le bruit d'un agent caractérise l'écart angulaire aléatoire entre sa direction et la direction moyenne de ses voisins. Un bruit fort entraîne donc des écarts importants et les groupes se dissocient plus facilement.

Avec l'apparition des agents répulsifs (voir chapitre 4), nous avons également rajouté une sensibilité à ces agents, ce qui rend compte d'une peur des agents répulsif. Ainsi un agent normal avec une peur nulle ne fuira pas les agents répulsifs. Nous avons ainsi étudié des groupes avec des valeurs limites de bruits et de sensibilité.

Les agents sont également muni d'un attribut qui caractérise leur type, cela permet de savoir si l'agent est un agent normal, leader, répulsif ou un obstacle. En effet, les obstacles sont gérés comme des agents répulsifs immobiles et qui ne peuvent pas tuer (contrairement aux agents répulsifs). La répulsion stérique n'ayant pas été prise en compte, les agents peuvent théoriquement traverser un obstacle, nous avons dit forcer les obstacles à avoir la priorité sur les autres agents. Autrement dit, si un agent normal fuit un agent répulsif et qu'il voit un mur, il fera demi tour car le mur est plus puissant que l'agent répulsif. Dans ce genre de cas, il arrive que l'agent normal fasse des aller-retours entre le mur et le prédateur jusqu'à sa mort.

Les agents sont également munis de plusieurs méthodes qui permettent de les manipuler le plus simplement possible.

Nous avons commencé par définir la soustraction comme étant la distance entre les deux agents, ainsi `agent_1 - agent_2` nous renvoie la distance séparant les deux agents ce qui simplifie les écritures dans la suite du programme.

De manière assez standard nous avons créé une méthode `Agent.copy` qui renvoie une copie profonde de l'objet ce qui nous permet de nous affranchir des problèmes d'alias de Python.

la dernière méthode de cette classe est `Agent.next_step`, elle permet de faire évoluer l'agent en fonction de ses voisins qu'il faut donner en argument. C'est dans cette méthode que sont implémentées les équations en qui régissent le modèle.

2.3 Création et manipulations de groupes

À l'instar des agents, les groupes sont munis d'un certain nombre d'attributs.

Le plus important d'entre eux est sans doute la liste d'agents. En effet, cette liste contient les instances des agents qu'il faut faire évoluer.

Les groupes ont également une liste d'agents morts et qui correspondent aux agents qui ont été touchés par des agents répulsifs. Les stocker permet de faire des statistiques sur ces agents à la fin de la simulation.

Les deux derniers attributs concernent l'espace : la longueur, la dimension (2 ou 3) et la densité du groupe.

La classe `Group` contient cependant bien plus de méthodes que les agents.

Tout d'abord, nous avons écrit une méthode qui permet de rajouter des agents au groupe. Cela est pratique en particulier pour rajouter des agents spéciaux. Nous pouvons ainsi générer un groupe de 50 agents et rajouter un agent répulsif.

Comme pour la classe `Agent`, nous avons également créer une méthode de copie profonde qui nous permet de dupliquer le groupe en nous affranchissant des problèmes d'alias.

La méthode `Group.get_neighbours` retrouve tous les agents voisins d'un agent donné en argument en fonction de ses caractéristiques.

Pour la représentation graphique, nous avons deux méthode : `Group.compute_figure` et `Group.compute_animation` qui renvoient respectivement une image et une animation. Mais, de manière à faire des tests sans forcément avoir une trace sous forme d'image ou d'animation, nous avons également fait une méthode `Group.run` qui permet de faire évoluer le groupe.

La dernière méthode a un sens un peu plus physique puisqu'elle correspond au paramètre d'alignement. Ce dernier est défini pour N agents comme :

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{\mathbf{v}_i}{v_i}$$

où $\mathbf{v}_i$ est le vecteur vitesse de l'agent i et où v_i est la norme ce de même vecteur. Dans son papier Vicsek divise la somme des vitesses par le nombre d'agents multipliés par la norme de la vitesse ce qui présuppose que tous les agents n'ont pas la même vitesse. Dans notre implémentation, nous avons choisit de ne pas imposer une vitesse unique et tous nos agents ont des vitesses qui leur sont propres.

Chapitre 3

Premières interprétations physiques

3.1 Animations en fichier GIF

Pour pouvoir observer un mouvement, il est plus utile de regarder une vidéo que des images. Nous avons alors créé une méthode : `Group.compute_animation` qui utilise la classe `Artist_animation` du module `matplotlib`. Nous arrivions alors à générer des fichiers GIF avec le nombre de frames souhaité.

Après avoir généré plusieurs animations avec des groupes de tailles différentes, nous avons pu déjà tirer quelques conclusions. En effet, nous observions des mouvements de groupes. Les agents qui avaient des positions de départ aléatoires, sont influencés les uns les autres selon la distance avec leurs voisins.

On observe d'ailleurs des mouvements collectifs plus importants quand la densité d'agent est plus forte. En revanche, quand les agents sont moins nombreux dans un même espace, nous observons davantage de formations de petits groupes ou des agents solitaires. Nous pouvons régler ce paramètre de densité avec `length` qui correspond à la longueur de l'espace considéré.

Cela s'explique par le fait que les agents ne se voient plus.

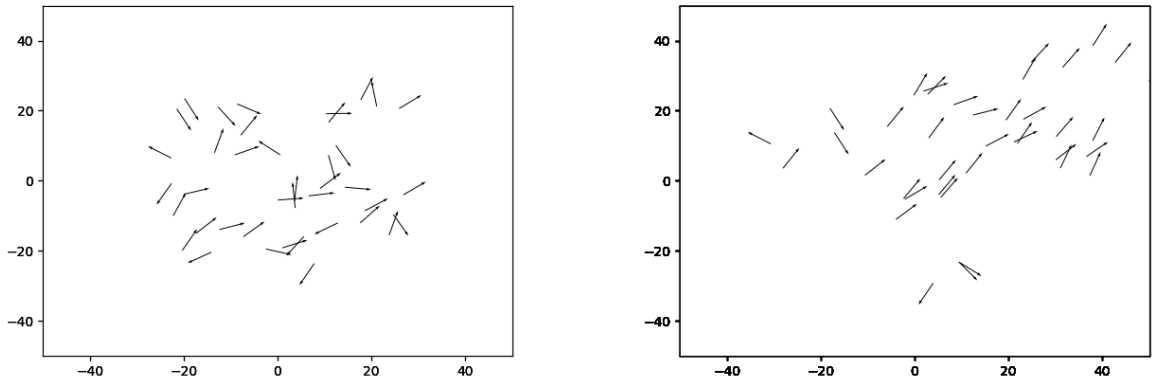


FIGURE 3.1 – Début et fin d'une animation 2D

Nous avons très vite privilégié la représentation 2D pour la suite du projet. En effet, celle-ci permet d'observer plus facilement le comportement des agents, et les différents groupe crées.

3.2 Mouvements de groupe

Pour mieux observer les mouvements de groupe, nous avons décidé de mettre une couleur à nos agents selon leur direction. Cela permet de mieux visuliser les différents groupe et de s'affranchir des flèches qui étaient devenues gênantes pour bien discerner le mouvement collectif à haute densité.

Nous avons alors crée une fonction appelée `get_colors`. Avec une boucle `for` et 361 itérations, nous balayons les 360 degrés de l'espace considéré. Avec une suite de `if` et `elif`, nous répartissons la gamme de couleur sur l'ensemble des angles.

Puis, en appelant cette fonction, dans la méthode `get_color` de la classe `Agent`, nous pouvons en fonction de l'angle entre l'horizontale ascendante et le vecteur vitesse de l'agent considéré, associé une couleur particulière.

Nous avons gardé cette représentation de l'angle des agents pour tout le reste du projet.

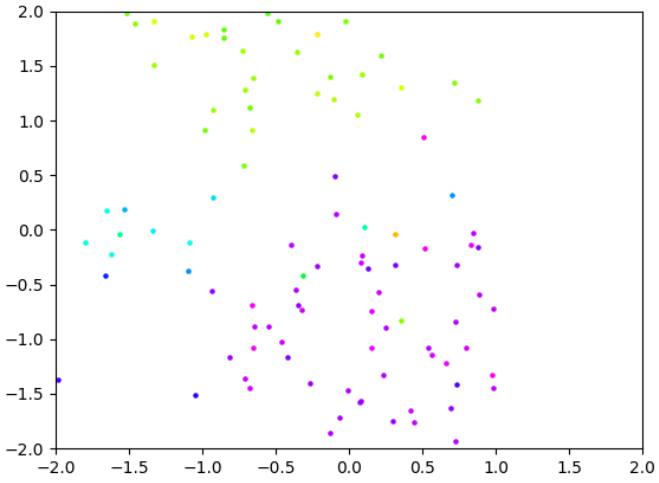


Figure 3.2 – Image colorée pour la visualisation de groupe

Sur cette nouvelle figure 3.2, nous voyons bien les différents groupes crées. On distingue encore mieux les mouvements lors de l'animation.

Nous avons d'ailleurs pu observer une organisation intéressante des agents sur certaines animations. En effet, les agents se regroupent premièrement en plusieurs petits groupes (sur l'image de gauche de la figure 3.4, on discerne en effet trois groupe principaux en violet, vert et cyan). Enfin, les petits groupes s'unissent pour former un seul et même grand groupe.

Ceci montre encore un fois très bien l'influence entre les agents.

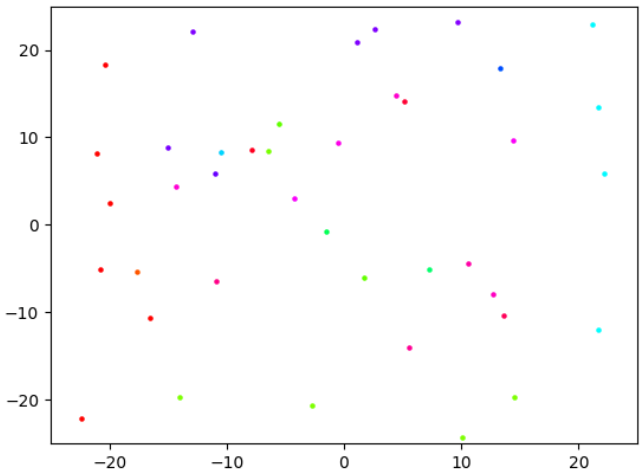


Figure 3.3 – Image de départ

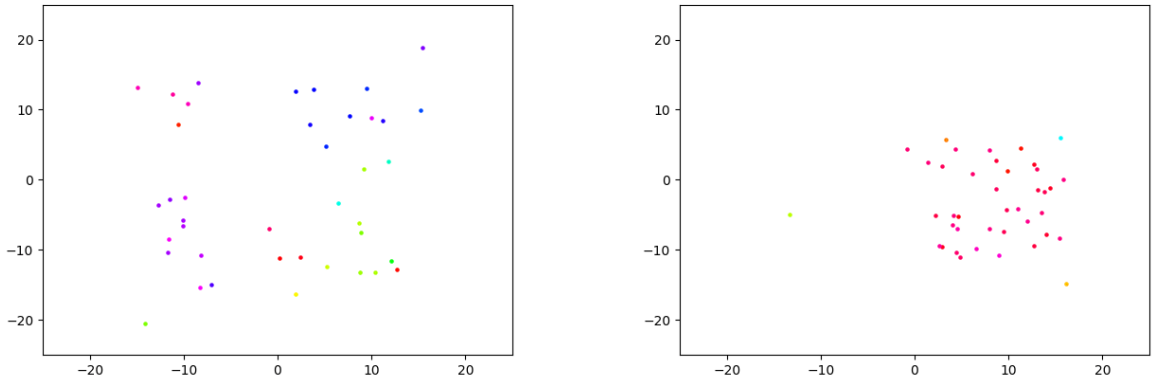


Figure 3.4 – Formations de petits groupe puis d'un seul et même groupe

3.3 Paramètres en jeu

3.3.1 Cône de vision

Afin de mieux visualiser ce que peut voir un agent en particulier, nous avons alors décidé de rajouter un cône de vision.

Pour ce faire, nous avons utilisé le module `import matplotlib.patches` qui nous a permis de tracer ces cônes en 2 dimensions. Nous nous sommes servis de ce module, qui demande la position et l'angle de vue de l'agent en radian. Nous avons alors converti au préalable l'angle de vue (paramètre `field_sight`) en radians.

Puis, avec le module `matplotlib.collections`, nous avons fait apparaître le cône directement sur la figure générée.

Nous sommes ainsi capable de mieux voir comment un agent réagit selon ce qu'il voit.

Ainsi, un agent un considéré comme voisin s'il est dans le cône de vision de l'agent testé. En refaisant le même test que précédemment, nous observons que les agents restent alignés moins longtemps.

En effet, les agents étant plus sensible à l'orientation pour voir les autres, si le bruit aug-

mente, les agents vont avoir des déviations angulaires plus importante et peuvent donc perdre de vue les autres agents plus facilement ce qui fait chuter le paramètre d'alignement plus rapidement.

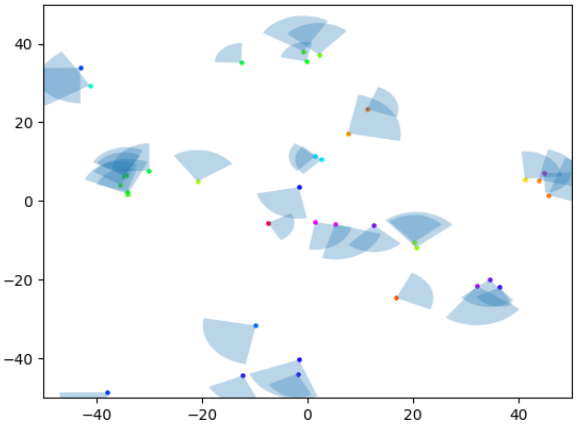


Figure 3.5 – Image de l'animation générée avec cône de vision

Nous avons cependant préféré retirer la représentation visuelle de ce cône dans la suite du projet. En effet, l'animation générée devenait trop chargée et riche en informations. Il était alors difficile de bien observer le comportement des agents.

3.3.2 Paramètre de bruit

Le bruit correspond à l'influence des voisins sur un agent du groupe. C'est un paramètre essentiel du modèle de Vicsek. Nous le retrouvons (sous la lettre grecque η) dans les équations qui définissent le modèle dont nous avons parlé dans le chapitre 1.

Plus le bruit est fort, plus celui-ci aura tendance à ne pas s'occuper de ses voisins et prendre sa propre direction. A l'inverse, avec un bruit qui tend vers zéro, l'agent aura tendance à imiter ses voisins et prendre une direction similaire aux agents autour de lui.

Nous avons déjà pu observer l'impact du bruit sur les populations. Nous voyons alors que ce paramètre est capital pour l'observation de mouvements collectifs. Si celui-ci est trop fort, les agents feront route seuls et ne s'occuperont pas du mouvement des voisins. En revanche, les mouvements collectifs seront davantages présents avec un bruit qui tend vers zéro.

Ce paramètre perturbe ainsi la communication entre les agents et affecter leur capacité à se coordonner efficacement. Par exemple, si un agent ne peut pas détecter les mouvements de ses voisins en raison d'un niveau de bruit élevé, il peut suivre une trajectoire différente et rompre la cohérence du groupe.

Pour bien comprendre, nous avons créer cette figure en mettant un bruit très fort :

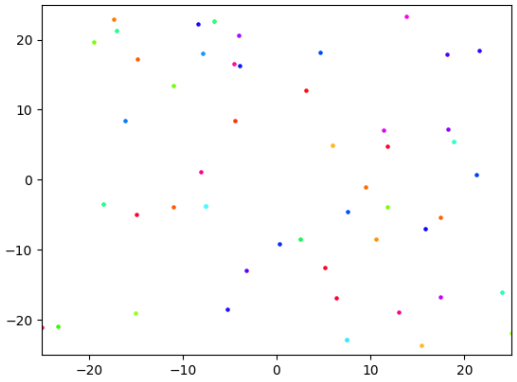


Figure 3.6 – Visualisation de l'impact du bruit (bruit fort dans ce cas)

Avec cette image, nous voyons bien ici que les agents ont des directions plutôt différentes. Nous avons un bruit qui est fort dans ce cas, et nous remarquons que les agents ont tendance à prendre des directions sans s'occuper de leurs voisins.

En effet, la cohésion du groupe est significativement réduite. Nous pouvons d'ailleurs remarquer que les agents, de ce fait occupent la quasi totalité de l'espace définit. Au contraire des mouvements de groupe qui font que les agents sont plus regroupé à un endroit précis.

De plus, nous avons également remarqué que certains agents, sous l'influence du bruit changent brutalement de direction au cours de leur déplacement.

Il est alors évident que le bruit est un paramètre essentiel dans le modèle de Vicsek.

Chapitre 4

Résultats expérimentaux

4.1 Résultats historiques de Vicsek

4.1.1 Paramètre d'alignement en fonction du bruit

Nous avons commencé par chercher à reproduire les résultats obtenus par Vicsek en reprenant les mêmes paramètres.

Chaque agent n'est ainsi influencé que par ses plus proches voisins et évolue dans un espace torique. En laissant la densité constante et en faisant varier le bruit pour voir son influence sur le paramètre d'alignement, nous observons alors un profil de transition de phase.

Nous avons alors créer de nouvelles fonctions qui permettent de calculer ce paramètre d'alignement. La première fonction `op_noise` renvoie un tuple composé du bruit et des valeurs du paramètre d'alignement (pour une densité fixe). Il en va de même pour la seconde fonction `op_density` qui renvoie un tuple composé de la densité et des valeurs de paramètre d'alignement mesuré (pour un bruit fixe).

Bien sûr, pour calculer ce paramètre, nous nous sommes servi de la formule dont nous avions parlé dans la partie 2.3.

Sur la figure suivante chaque points est la moyenne sur cinq mesures de 200 pas et 50 agents.

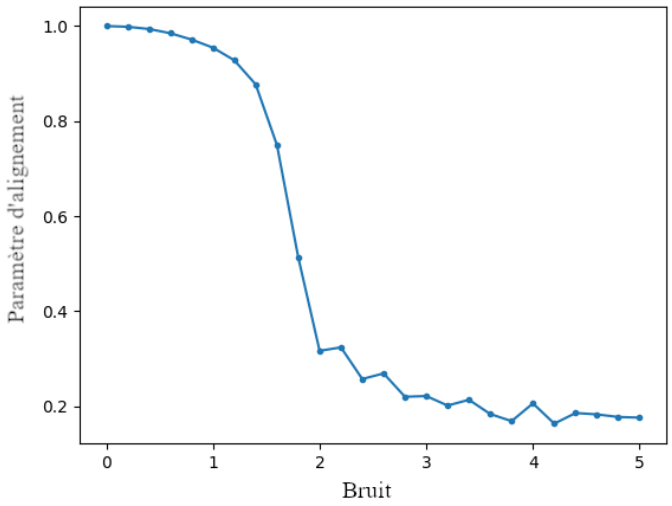


Figure 4.1 – Paramètre d'alignement en fonction du bruit

Pour un bruit très faible, les agents sont alignés avec un paramètre d'alignement de 1 ce qui est cohérent puisqu'ils vont s'aligner sans aucune part d'aléatoire. Pour un bruit élevé, ce qui correspond en fait à une probabilité d'avoir une déviation angulaire importante par rapport à la direction moyenne, les agents sont très peu alignés pour un même nombre d'itération.

Nous avons ici exactement les mêmes résultats que ceux obtenus par Vicsek et son équipe. Nous sommes également cohérent avec ce que nous avions observé dans la partie 3.6.

Nous avons voulu voir, pour une même densité, le même graphe pour différents nombres d'agents. Ainsi, nous avons augmenté progressivement le nombre d'agents ainsi que la longueur de l'espace considéré en gardant la même densité. Nous avons obtenu ce graphe :

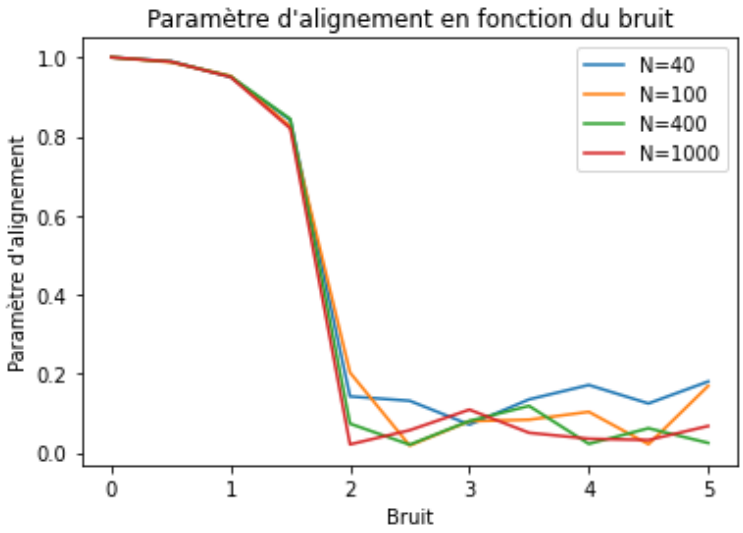


Figure 4.2 – Paramètre d'alignement en fonction du bruit pour différents nombre d'agents

Nous remarquons que le paramètre d'alignement diminue drastiquement pour une valeur de bruit passant de 1,8 à 2 (et ce, dans tous les cas que nous avons tracé).

Malgré le fait que l'espace augmente considérablement à chaque fois, les agents ont tendances à s'aligner de moins en moins quand ils sont en grand nombre. En effet, le paramètre d'alignement est de plus en plus proche de zéro (pour un bruit fixé à 2) quand on augmente le nombre d'agents.

C'est une constatation intéressante. Cela voudrait dire que plus le groupe est nombreux dans un même espace, plus le bruit affecte la cohésion de celui-ci.

Nous en avons d'ailleurs profité pour mesurer l'effet du cône de vision sur le paramètre d'alignement, nous avons tracé ce graphe avec 50 mesures par points sur la figure 4.3.

Nous pouvons ainsi constater que le cône de vision précipite la transition de phase entre un état parfaitement ordonné et un état chaotique. Cela est logique puisque avec l'augmentation du bruit, les agents peuvent prendre des trajectoires de plus en plus aléatoires. Ses voisins peuvent alors sortir du cône de vision, ce qui change radicalement la manière dont l'agent se déplace.

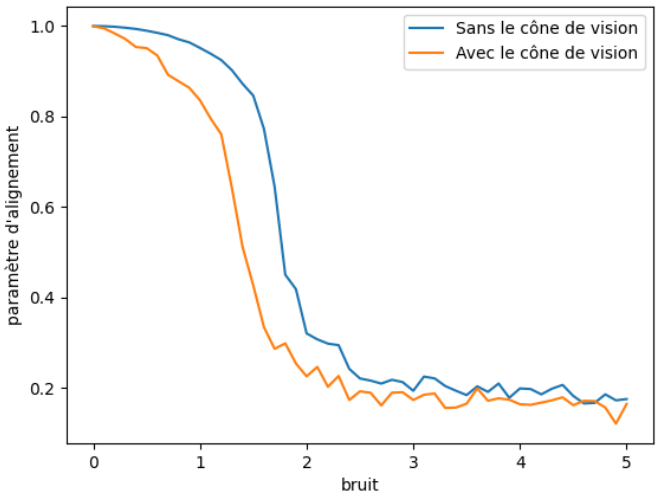


Figure 4.3 – Effet du cône de vision sur le paramètre d'alignement avec 50 agents

4.1.2 Paramètre d'alignement en fonction de la densité

Vicsek avait aussi mesuré le paramètre d'alignement en fonction de la densité d'agent dans l'espace (avec un bruit constant). En traçant le paramètre d'alignement en fonction de la densité, nous obtenons pas exactement la même figure que Vicsek même si cela s'en rapproche.

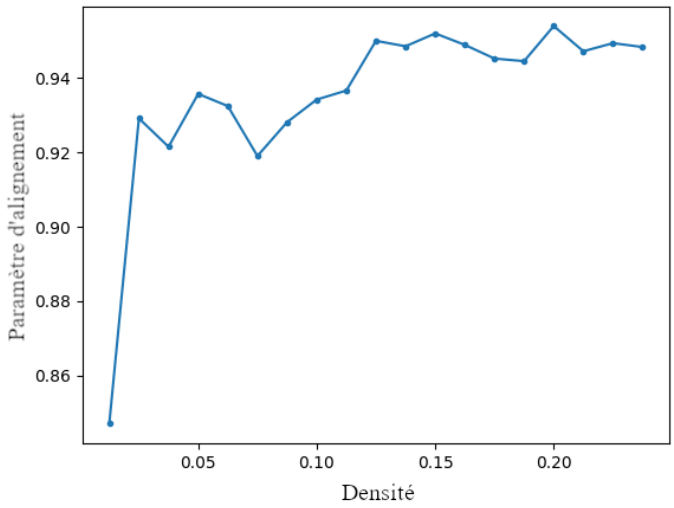


Figure 4.4 – Paramètre d'alignement en fonction de la densité d'agent (bruit=1)

Nous pouvons tout de même en déduire que plus le nombre d'agent est élevé dans un même espace (et donc la densité aussi), plus les agents s'aligneront sur la même direction rapidement. Nous pouvons même rajouter qu'à partir d'une valeur de densité d'environ de 0.13 agents par unité d'espace.

Nous n'avons pas clairement identifié quel paramètre différait entre notre modèle et celui de Vicsek. Cependant, il est probable qu'ils s'agisse d'une différence dans la manière de faire évoluer le groupe. En effet, pour chaque point nous repartons de zéro en générant un nouveau groupe alors qu'il est possible que Viscek garde le même groupe en rajoutant des agents pour faire augmenter la densité, mais même en procédant comme cela, nous ne sommes pas parvenu à retrouver les mêmes courbes.

4.2 Au-delà du modèle de Vicsek

4.2.1 Création d'un agent leader

Nous avons maintenant voulu nous écarter un peu du modèle de Vicsek, en étudiant un nouveau type de mouvement collectif. Nous avons alors crée un nouveau type d'agent, dit leader, qui influence davantage les agents normaux. Nous pouvons définir à quel point celui-ci à de l'influence (nous pouvons choisié une influence équivalente à n agents).

Nous avons alors créé le paramètre `agent_type` pour différencier les agents. Ainsi, il nous faut préciser l'indice correspondant à l'agent que l'on veut créer avec `agent_generator`. Il nous faudra ensuite rajouter cet agent au groupe avec la méthode `add_agent`. Nous avons décidé que agents classiques sont de type 0 et les agents leader de type 1.

Avec l'apparition de ce nouveau type d'agent, nous nous attendions à observer des groupe en forme de pyramide. C'est-à-dire une organisation hiérarchique des agents pour créer un mouvement de groupe. Nous pouvons par exemple observer ce comportement chez certains animaux, notamment lors de la migrations des grues.
Nous avons choisi de représenter l'agent leader en noir.

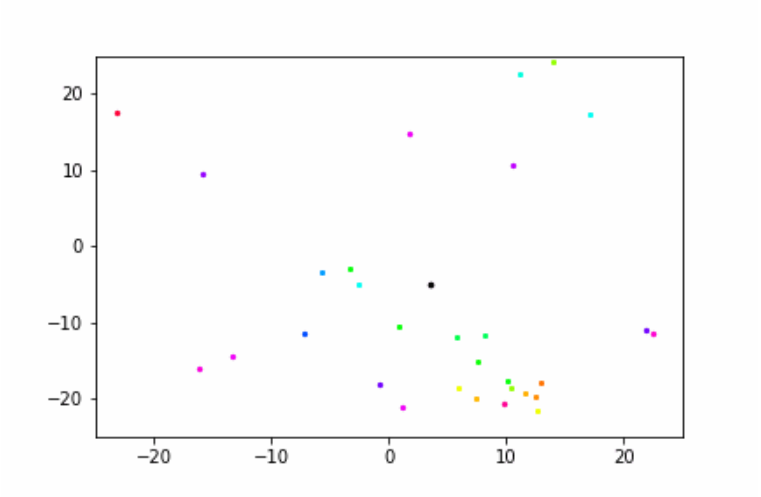


Figure 4.5 – Effet observée avec un agent leader

En effet, nous avons observé plusieurs fois une organisation en « triangle ou en arc de cercle », comme une sorte de hiérarchie. L'agent leader produit un mouvement de groupe organisé différemment de ce qu'on a pu observer dans le modèle de Vicsek.
Ainsi, cela montre que le mouvement collectif peut être amené de différentes manières et qu'il n'y a pas de méthode unique pour un déplacement d'un ensemble d'agent.

Nous avons d'ailleurs pu observer quelque chose d'intéressant. En effet, sur une animation, nous pouvons voir un groupe d'agent qui suit l'agent leader pendant un moment. Mais, ce groupe croise un autre groupe d'agent. Les agents qui suivait l'agent leader se sont mis subitement à suivre le nouveau groupe.
Ainsi, nous en déduisons que le groupe a eu plus d'influence que l'agent leader à ce moment là.

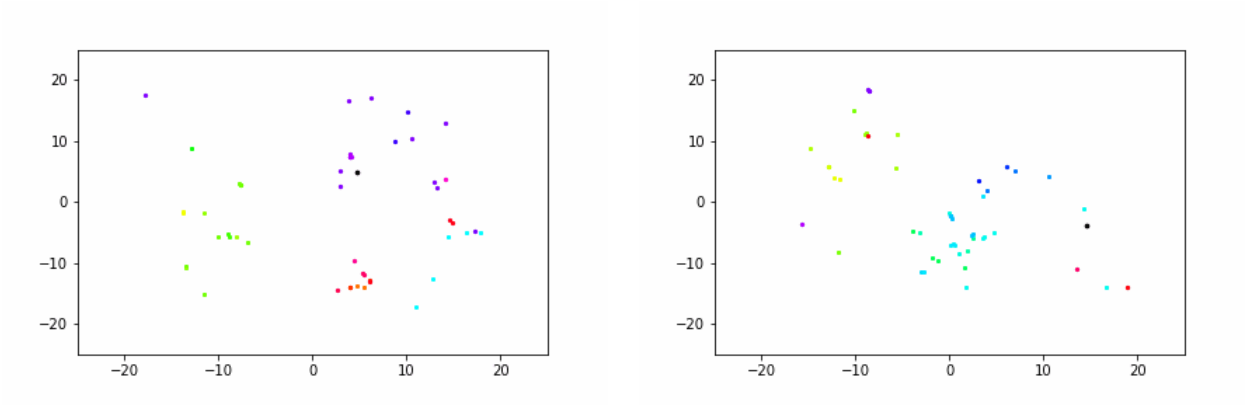


Figure 4.6 – Situation intéressante avec un agent leader

4.2.2 Mise en place d'une prédation et du paramètre de sensibilité

Nous avons trouvé intéressant de rajouter des agents dit répulsifs, qui joue le rôle de prédateurs. Ces nouveaux agents sont plus rapides que leurs proies. Ainsi, nous avons pu voir comment s'organisent les agents face à la menace.

Nous avons choisit de paramétrer la réaction des agents quand cet agent répulsif est dans la zone de vision indépendamment de l'angle – cela permet de forcer l'agent à fuir, même si l'agent répulsif est derrière. L'agent prendra immédiatement le vecteur de sens opposé à celui vers l'agent répulsif. Nous avons choisit de représenter les agents répulsifs en noir.

Pour créer ce type d'agent, il nous faut préciser `agent_type = 2` dans la méthode `agent_generator`.

Avec cette expérience, nous constatons que le mouvement de groupe est toujours présents avec un seul agent répulsif. Cet effet collectif est même souvent renforcé. Les agents fuient dans la même direction, tout en se servant de leur influence les uns sur les autres.

Cependant, lorsqu'il y a plusieurs agents répulsifs, le mouvement collectif n'est plus observé ou très peu. Ces prédateurs (qui prennent des directions différentes) sèment la panique au sein du groupe qui perd toute cohésion. Chaque agent développe alors un instinct de survie qui le pousse à fuir. La panique et la fuite prennent visiblement le pas sur la cohésion de groupe (cf. figure 4.7).

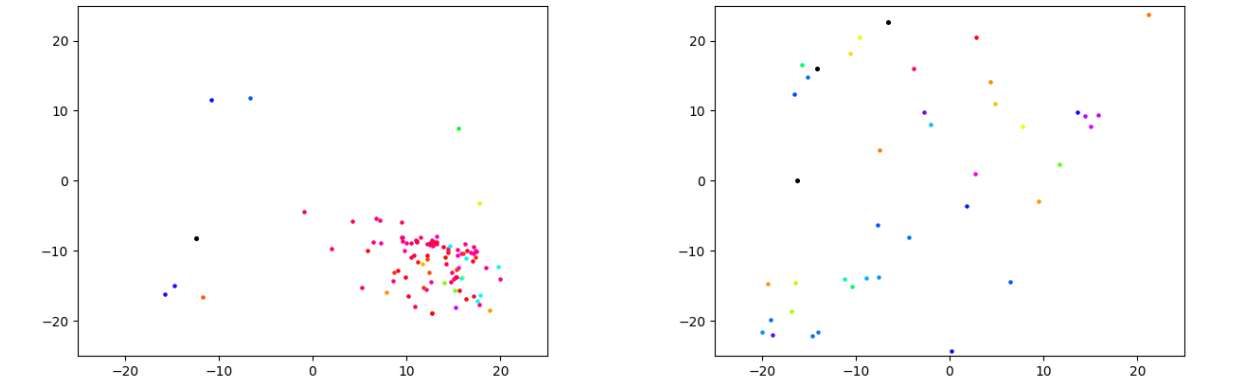


Figure 4.7 – Effet d'un (à gauche) ou plusieurs agents répulsifs (à droite) sur le groupe

Nous avons ensuite décidé de rajouter un nouveau paramètre que nous appelons `fear` dans

notre code. Il s'agit de la sensibilité des agents face aux prédateurs, c'est à dire à la peur des agents pour les agents répulsifs.

Ainsi, les agents prennent plus facilement la fuite face aux prédateurs.

4.2.3 Système évolutif

En ajoutant des agents répulsifs, nous avons eu l'idée de créer un système de « mort » où les agents touchés par un agent répulsifs sont retirés de la liste des agents et placés dans un autre attribut du groupe.

Cela permet notamment de comparer les caractéristiques des agents morts avec celles des survivants et de voir quels paramètres permettent de survivre. Nous avons créer de nouvelles fonctions appelées `test` qui calculent le pourcentage de survivants.

En générant différents groupes avec `group_generator`, ces fonctions ont 4 groupes à tester pour différents bruits et sensibilité.

En mettant des valeurs limites pour le bruit et la sensibilité aux agents répulsifs et en moyennant les résultats sur 10 mesures, nous obtenons les résultats suivants :

bruit	sensibilité	pourcentage de survivants
1	0	30
0	1	79
1	1	86
0	0	39

Nous voyons bien que statistiquement, les agents ont plus de chance de survivre avec un bruit et une sensibilité à 1. En effet, dans ce cas là, les agents avec une grande sensibilité cherche à fuir à tout prix le prédateur. De plus, le bruit fort fait que les agents ne cherche pas à imiter leurs voisins, ce qui ne perturbe pas la fuite qu'il avait entrepris.

Cependant, en enlevant le bruit, nous voyons tout de même que le pourcentage de survivant reste très élevé. La sensibilité est un élément clé pour la survie des agents.

Au contraire, les agents ont peu de chance de survie avec un bruit fort et un sensibilité nulle. En effet, les agents n'ont pas peur de leurs prédateurs, ce qui devient très dangereux. De plus, le bruit élevé, fait qu'il n'y a aucun mouvement de groupe.

Cependant, en retirant le bruit, nous voyons le que pourcentage de survivant est à peine plus haut. Nous revenons à la même conclusion : la sensibilité est un élément clé pour la survie des agents.

4.2.4 Ajout d'obstacles

De plus, nous avons voulu voir comment réagissent les agents face à des obstacles. Nous voulions voir le mouvement de groupe est conservé.

Cette approche permet de se placer dans des conditions encore plus réalistes. Par exemple, un banc de poissons peut rencontrer des rochers lors de son déplacement.

Nous avons alors crée des murs. À leur vue, les agents font demi-tour pour éviter l'obstacle.

Pour créer ces murs, il nous faut préciser `agent_type = 3` dans la méthode `agent_generator`.

Nous avons choisis dans un premier temps de représenter un mur au milieu de l'espace considéré. Ces agents de type 3, sont en noir et forment une ligne dans l'animation suivante.

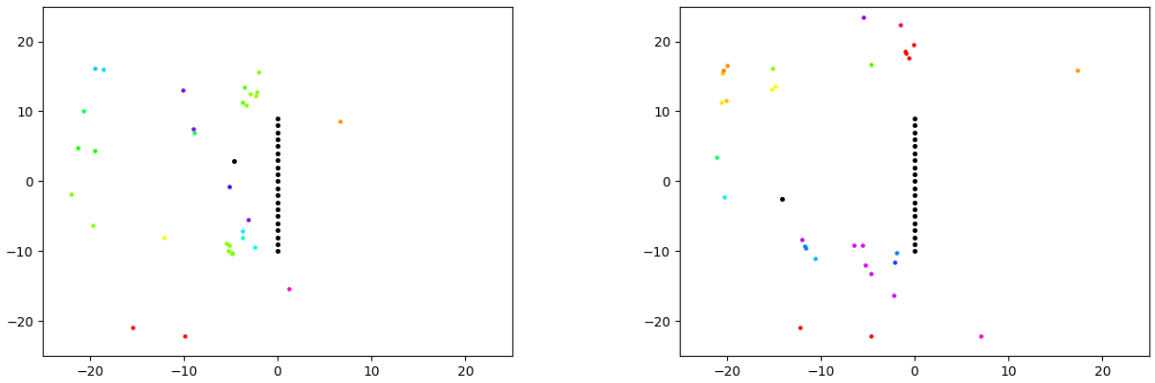


Figure 4.8 – Effet d'un obstacle sur le mouvement des agents (arrivée des agents vers le mur à gauche, directions prisent par les agents après avoir vu le mur à droite)

Nous voyons bien que les agents rebroussent un peu chemin. En réalité, nous pourrions plutôt nous attendre à ce que le groupe contourne l'obstacle. Il y a tout de même quelques agents qui ont visiblement contourné l'obstacle, mais la majorité du groupe fait demi-tour.

Cependant, il faut noter que l'obstacle est particulièrement imposant, et que cela explique sûrement le comportement du groupe.

Nous avons alors voulu voir l'effet de plusieurs petits obstacles sur un groupe. Pour ce faire, nous avons généré une animation avec six agents de type 3, qui forment un ensemble de petits obstacles répartis sur tout l'espace. Nous obtenons ces images :

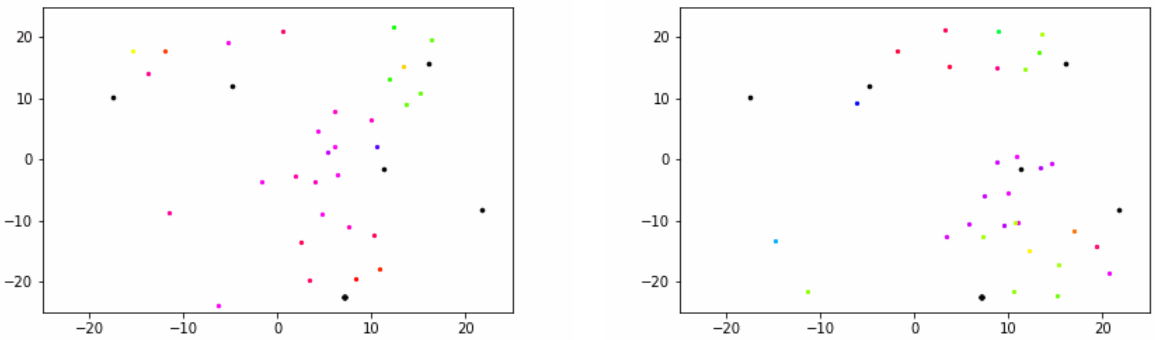


Figure 4.9 – Effet de plusieurs petits obstacles sur le mouvement des agents (avant et après l'obstacle)

Dans ce cas là, les agents ne font pas demi-tour mais se fraient un passage entre les petits obstacles. De plus, nous observons que les mouvements de groupes semblent peu affectés par ces six obstacles.

En effet, dans cette animation, les agents contournent les petits obstacles plus facilement. Cela explique le comportement des agents face au grand mur. L'obstacle était trop grand et les agents ont préférés faire demi-tour. Dans ce nouveau cas, ces obstacles sont petits et les agents ont plus d'espace libre pour pouvoir contourner.

La taille de l'obstacle est donc importante et détermine de comportement du groupe.

Conclusion

Avec la mise en place de ce programme, nous avons réussi à reproduire le modèle de Vicsek de manière numérique. Notre programme implémente le modèle grâce à deux classes composées de plusieurs méthodes qui définissent les paramètres du groupe ainsi que ceux de chaque agent de manière individuelle.

Nous avons pu observer les différents mouvements de groupe et observer le comportement des agents avec différents paramètres essentiels tels que le bruit ou encore le cône de vision. Le bruit, en augmentant, rend le groupe d'agent de plus en plus désordonné. Le cône de vision, nous a permis de mieux voir l'influence des agents entre eux en mettant en avant les agents voisins que l'individu était capable de voir.

De plus, nous avons de plus réussi à retrouver les résultats historique de Vicsek et son équipe concernant le paramètre d'alignement. Nous avons vu l'effet du bruit (densité fixe) ou encore de la densité d'agents (bruit fixe) sur le paramètre d'alignement. Nous confirmons alors ce que nous avions observé précédemment concernant le bruit. Quant à la densité, celle ci en augmentant, rend l'alignement des agents plus facile.

Par la suite, nous avons voulu aller plus loin que le modèle de base en créant de nouveaux types d'agents. Pour commencer, les agents leaders, qui prennent le rôle de guide dans le groupe. Ce comportement nous a fortement fait penser à la migration des grues. Ensuite, nous avons créé une prédation avec l'apparition des agents répulsifs qui sèment la panique dans le groupe. Avec nos statistiques, nous avons déterminer que la meilleure chance de survie est de 86 % avec un bruit et une sensibilité forte. Pour finir, nous avons mis en place un mur qui fait office d'obstacle. Nous voyons ici, que les agents ont tendances à faire demi-tour face à l'obstacle. Cela semble différent de ce que l'on peut observer dans la réalité avec des agents qui contourne le mur.

Il serait maintenant intéressant d'étudier les comportements collectifs chez certaines espèces végétales. Nous pensons notamment aux mécanismes de défense mis en place par certains arbres pour faire face à certains dangers (incendies, certains animaux herbivores ou insectes), notamment en communiquant avec leurs voisins. Lorsqu'un arbre est en danger, il peut émettre des signaux chimiques volatils. Ces signaux peuvent être détectés par d'autres arbres de la même espèce qui, à leur tour, peuvent déclencher des mécanismes de défense. Ce mécanisme est très souvent observé chez le séquoia géant (épaisseur de l'écorce face aux feu), ou encore l'eucalyptus (productions de toxines et apparition d'épines).

Annexe A

Code utilisé

```
"""
Vicsek -- 1.7.4
==============
(Alexis Peyroutet et Antoine Royer)


Description
-----------
Implémentation d'un modèle de Viscek en Python. Permet de simuler un groupe d'agents en deux ou
trois dimensions.

Cette adaptation se distingue du modèle de Vicsek par plusieurs aspects :
 - gestion d'agents attractifs, répulsifs et d'obstacles ;
 - gestion de l'espace (fermé ou torique) ;
 - les agents ont un angle de vue limité.

Exemples
--------
En important le module comme suit :

>>> import vicsek as vk

Pour créer un groupe de 20 agents avec les paramètres par défaut :

>>> mon_groupe = vk.group_generator(20)

Générer une animation de 100 images:

>>> mon_groupe.compute_animation(100)

Faire évoluer le groupe de 100 pas sans garder d'images :

>>> mon_groupe.run(100)
"""
```

```
35 import math
36 import random
37
38 import matplotlib.pyplot as plt
39 import matplotlib.patches as mpatches
40 import numpy as np
41
42 from matplotlib import animation
43 from matplotlib.collections import PatchCollection
44
45
46 __version__ = "1.7.4"
47
48
49 # Classes
50 class Agent:
51     """
52     Simule un agent avec sa position, sa vitesse, et le bruit
       ↪ associé qui traduit sa tendance naturelle à suivre le
       ↪ groupe ou pas.
53
54     Paramètres
55     ----------
56     position : np.array
57         Vecteur position, sous forme d'un tableau numpy de deux
           ↪ ou trois entiers.
58     speed : np.array
59         Direction du vecteur vitesse sous la forme d'un tableau
           ↪ de trois entiers.
60     velocity : float
61         Norme de la vitesse.
62     noise : float
63         Taux de bruit, qui traduit une déviation aléatoire sur la
           ↪ direction de la vitesse.
64         Si ``noise=0``, l'agent ne s'écartera jamais de sa
           ↪ trajectoire.
65         Si ``noise=1``, l'agent aura une trajectoire très bruitée
66     sight : float
67         Distance à laquelle l'agent voit les autres.
68     field_sight : float, optionnel
69         Angle du cône de vision de l'agent en radian.
70     agent_type : int, optionnel
71         Type d'agent
72         0 : agent normal
73         1 : agent répulsif
74         2 : agent leader
75     fear : float, optionnel
76         Sensibilité aux agents répulsifs.
77         Si ``fear=0`` l'agent sera complètement insensible aux
           ↪ agents répulsifs.
```

```
78          Si ``fear=1`` l'agent aura une sensibilité maximale
79
80      Attributs
81      ---------
82      max_velocity : float
83          norme maximale de la vitesse
84      """
85      def __init__(self, position: np.array, speed: np.array,
        ↪  velocity: float, noise: float, sight: float, field_sight:
        ↪  float=math.pi/2, agent_type: int=0, fear: float=1):
86          self.position = position.copy()
87          self.speed = speed.copy()
88          self.velocity = velocity
89          self.noise = noise
90          self.sight = sight
91          self.field_sight = field_sight / 2
92          self.agent_type = agent_type
93          self.fear = fear
94
95          self.max_velocity = self.velocity
96          if agent_type == 1:
97              self.max_velocity *= 2
98
99      def __str__(self):
100         """Affiche l'agent avec ses paramètres."""
101         return f"Agent(\n\tposition={list(self.position)},"\
102                f"\n\tspeed={list(self.speed)},"\
103                f"\n\tvelocity={self.velocity},"\
104                f"\n\tnoise={self.noise},"\
105                f"\n\tsight={self.sight},"\
106                f"\n\tfield_sight={self.field_sight * 360 /
                   ↪  math.pi},"\
107                f"\n\tagent_type={self.agent_type}"\
108                f"\n\tfear={self.fear}\n)"
109
110     __repr__ = __str__
111
112     def __sub__(self, agent):
113         """
114         Retourne la distance entre les deux agents.
115
116         Paramètres
117         ---------
118         agent : Agent
119             Un autre agent.
120
121         Signature
122         ---------
123         out : float
124             Distance entre self et agent.
```

```
125             """
126             return norm(self.position - agent.position)
127 
128         __rsub__ = __sub__
129 
130         def __eq__(self, agent):
131             """
132             Teste l'égalité entre deux agents.
133 
134             Paramètres
135             ----------
136             agent : Agent
137                 Un autre agent.
138 
139             Signature
140             ---------
141             out : bool
142                 True si les deux agents ont la même position, False
                     ↪ sinon.
143             """
144             return list(self.position) == list(agent.position)
145 
146         def copy(self):
147             """Renvoie une copie profonde de l'agent."""
148             return Agent(self.position.copy(), self.speed.copy(),
                     ↪ self.velocity, self.noise, self.sight,
                     ↪ self.field_sight, self.agent_type, self.fear)
149 
150         def get_color(self):
151             """Renvoie la couleur de l'agent en fonction de son
                     ↪ orientation."""
152             if self.agent_type == 3:
153                 return (0, 0, 1), 0
154             angle = np.angle(self.speed[0] + 1j * self.speed[1]) % (2
                     ↪ * math.pi)
155             angle = (180 * angle) / math.pi
156             return COLOR_MAP[math.floor(angle) % 360], angle
157 
158         def next_step(self, neighbours: list, dim: int, length: int,
             ↪ step: float=0.5):
159             """
160             Fait évoluer l'agent d'un pas temporel en fonction de ses
                     ↪ voisins.
161 
162             Paramètres
163             ----------
164             neighbours : list
165                 Liste des agents voisins.
166             dim : int
167                 Dimension de l'espace.
```

```
168             length : int
169                 Longueur caractéristique de l'espace.
170             step : float, optionnel
171                 Pas de temps considéré pour les équations
                    ↪ différentielles.
172             """
173             length //= 2
174             average_speed = 0
175             average_velocity = 0
176             nb_neighbours = 0
177
178             for agent in neighbours:
179                 if agent.agent_type != 3:
180                     average_velocity += agent.velocity
181                     nb_neighbours += 1
182
183                 if agent.agent_type == 0:
184                     if self.agent_type != 1:
185                         average_speed += agent.speed
186                     else:
187                         average_speed += (1 / (self - agent)) *
                            ↪ (agent.position - self.position)
188                         average_velocity += agent.velocity / 4
189
190                 elif agent.agent_type == 1:
191                     if self.agent_type != 1:
192                         average_speed += self.fear * len(neighbours)
                            ↪ * (self.position - agent.position)
193                     else:
194                         average_speed += agent.speed
195
196                 elif agent.agent_type == 2:
197                     if self.agent_type != 1:
198                         average_speed += 5 * agent.speed
199                     else:
200                         average_speed += (1 / (self - agent)) *
                            ↪ (agent.position - self.position)
201                         average_velocity += agent.velocity / 4
202
203                 elif agent.agent_type == 3:
204                     average_speed += len(neighbours) * 100 *
                        ↪ (self.position - agent.position)
205
206             average_speed /= nb_neighbours
207             average_velocity /= nb_neighbours
208             noise_min = - self.noise / 2
209             noise_max = self.noise / 2
210
211             self.position += self.velocity * step * self.speed
```

```
212             self.speed = average_speed + ((noise_max - noise_min) *
                ↪ np.random.random(dim) + noise_min)
213             self.speed /= norm(self.speed)
214
215             if average_velocity > self.max_velocity:
216                 average_velocity = self.max_velocity
217             self.velocity = average_velocity
218
219             for i in range(dim):
220                 if self.position[i] > length:
221                     self.position[i] = -length
222                 elif self.position[i] < -length:
223                     self.position[i] = length
224
225
226 class Group:
227     """
228     Simule un groupe d'agents, permet de le faire évoluer et de
        ↪ l'afficher.
229
230     Paramètres
231     ----------
232     agents : list
233         Liste des agents du groupe.
234     length : int, optionnel
235         Longueur caractéristique de l'espace.
236     dim : int, optionnel
237         Dimension de l'espace considéré (2 ou 3).
238
239     Attributs
240     ----------
241     density : float
242         Densité d'agents dans l'espace (nombre agent / longueur
            ↪ ** dimension).
243     dead_agents : list
244         Liste des agents touchés par un agent répulsif.
245     """
246     def __init__(self, agents: list, length: int=50, dim: int=2):
247         self.agents = agents
248         self.dead_agents = []
249         self.nb_agents = len(agents)
250         self.length = length
251
252         if dim not in (2, 3):
253             raise DimensionError("dim must be 2 or 3")
254         self.dimension = dim
255
256         for agent in agents:
257             if len(agent.position) != dim or len(agent.speed) !=
                ↪ dim:
```

```
258                 raise DimensionError("dimension of agents don't
                     ↪  match")
259
260         self.density = self.nb_agents / (self.length **
             ↪  self.dimension)
261
262     def __getitem__(self, index: int):
263         """
264         Renvoie l'agent d'indice donné.
265
266         Paramètres
267         ----------
268         index : int
269             Indice de l'agent.
270
271         Signature
272         ---------
273         out : Agent
274             Agent du groupe à l'indice donné.
275         """
276         return self.agents[index]
277
278     def copy(self):
279         """Renvoie une copie profonde du groupe."""
280         return Group([agent.copy() for agent in self.agents],
             ↪  self.length, self.dimension)
281
282     def add_agent(self, agent: Agent):
283         """
284         Permet d'ajouter un agent au groupe.
285         C'est un copie profonde de l'agent qui est ajoutée au
             ↪  groupe.
286
287         Paramètres
288         ----------
289         agent : Agent
290             Agent à ajouter.
291         """
292         if len(agent.position) != self.dimension or
             ↪  len(agent.speed) != self.dimension:
293             raise DimensionError("dimension of agent doesn't
                 ↪  match")
294         self.agents.append(agent.copy())
295         self.nb_agents += 1
296         self.density = self.nb_agents / (self.length **
             ↪  self.dimension)
297
298     def get_neighbours(self, targeted_agent: Agent, dmin: int,
         ↪  check_field: bool=True,
299                 check_wall: bool=True):
```

```
300             """
301             Calcule les voisins d'un agent en fonction de la distance
                ↪  et de l'angle.
302
303             Paramètres
304             ----------
305             targeted_agent : Agent
306                 Agent servant de référence pour le calcul de
                    ↪  distance.
307             dmin : int
308                 Distance minimale à partir de laquelle l'agent sera
                    ↪  compté comme voisin.
309             check_field : bool, optionnel
310                 Vérification de l'angle de vue. Si
                    ↪  ``check_field=False`` les agents voient à 360°.
311             check_wall : bool, optionnel
312                 Vérification des murs. Si ``check_wall=False``,
                    ↪  l'espace est considéré torique.
313
314             Signature
315             ---------
316             agents : list
317                 liste des agents voisins
318             """
319             length = self.length / 2
320
321             if self.dimension == 2:
322                 wall_agents = [
323                     Agent(position=np.array([length,
                        ↪  targeted_agent.position[1]]),
324                           speed=np.zeros(2),
325                           velocity=0,
326                           noise=0,
327                           sight=0,
328                           field_sight=0,
329                           agent_type=3),
330                     Agent(position=np.array([-length,
                        ↪  targeted_agent.position[1]]),
331                           speed=np.zeros(2),
332                           velocity=0,
333                           noise=0,
334                           sight=0,
335                           field_sight=0,
336                           agent_type=3),
337
                        ↪  Agent(position=np.array([targeted_agent.position[0],
                        ↪  length]),
338                           speed=np.zeros(2),
339                           velocity=0,
340                           noise=0,
```

```
341                     sight=0,
342                     field_sight=0,
343                     agent_type=3),
344 
                    ↪   Agent(position=np.array([targeted_agent.position[0],
                    ↪   length]),
345                     speed=np.zeros(2),
346                     velocity=0,
347                     noise=0,
348                     sight=0,
349                     field_sight=0,
350                     agent_type=3),
351             ]
352         else:
353             wall_agents = [
354                 Agent(position=np.array([length,
                    ↪   targeted_agent.position[1],
                    ↪   targeted_agent.position[2]]),
355                     speed=np.zeros(3),
356                     velocity=0,
357                     noise=0,
358                     sight=0,
359                     field_sight=0,
360                     agent_type=3),
361                 Agent(position=np.array([-length,
                    ↪   targeted_agent.position[1],
                    ↪   targeted_agent.position[2]]),
362                     speed=np.zeros(3),
363                     velocity=0,
364                     noise=0,
365                     sight=0,
366                     field_sight=0,
367                     agent_type=3),
368 
                    ↪   Agent(position=np.array([targeted_agent.position[0],
                    ↪   -length, targeted_agent.position[2]]),
369                     speed=np.zeros(3),
370                     velocity=0,
371                     noise=0,
372                     sight=0,
373                     field_sight=0,
374                     agent_type=3),
375 
                    ↪   Agent(position=np.array([targeted_agent.position[0],
                    ↪   length, targeted_agent.position[2]]),
376                     speed=np.zeros(3),
377                     velocity=0,
378                     noise=0,
379                     sight=0,
380                     field_sight=0,
```

```
                    agent_type=3),

                ↪ Agent(position=np.array([targeted_agent.position[0],
                ↪ targeted_agent.position[1], -length]),
                    speed=np.zeros(3),
                    velocity=0,
                    noise=0,
                    sight=0,
                    field_sight=0,
                    agent_type=3),

                ↪ Agent(position=np.array([targeted_agent.position[0],
                ↪ targeted_agent.position[1], length]),
                    speed=np.zeros(3),
                    velocity=0,
                    noise=0,
                    sight=0,
                    field_sight=0,
                    agent_type=3),
            ]

        agents = []
        if check_wall:
            total_agents = self.agents + wall_agents
        else:
            total_agents = self.agents

        if not check_field or self.dimension == 3:
            agents = [agent for agent in total_agents if
             ↪  (targeted_agent - agent) <= dmin]

        else:
            dead_index = []
            for index, agent in enumerate(total_agents):
                if targeted_agent.agent_type == 1 and not
                 ↪  agent.agent_type in (1, 3) and
                 ↪  (targeted_agent - agent) < self.length / 25
                 ↪  and index < self.nb_agents:
                    self.dead_agents.append(agent.copy())
                    dead_index.append(index)
                    self.nb_agents -= 1

                if agent != targeted_agent:
                    pos = agent.position -
                     ↪  targeted_agent.position
                    angle_spd = np.angle(targeted_agent.speed[0]
                     ↪  + 1j * targeted_agent.speed[1]) % 2 *
                     ↪  math.pi
                    angle_pos = np.angle(pos[0] + 1j * pos[1]) %
                     ↪  (2 * math.pi)
```

```
419                     if agent.agent_type != 3:
420                         if (targeted_agent - agent) <= dmin and
                            ↪  (agent.agent_type == 1 or
                            ↪  abs(angle_spd - angle_pos) <=
                            ↪  targeted_agent.field_sight):
421                             agents.append(agent)
422                     elif (targeted_agent - agent) <= self.length
                        ↪  / 25:
423                         agents.append(agent)
424
425                 else: agents.append(agent)
426
427             for index in dead_index:
428                 self.agents.pop(index)
429
430         return agents
431
432     def get_agents_arguments(self):
433         """Retourne un tuple de tableaux numpy contenant les
            ↪  positions et les vitesses de tous les agents du
            ↪  groupe."""
434         positions = np.zeros((self.nb_agents, self.dimension))
435         speeds = np.zeros((self.nb_agents, self.dimension))
436
437         for index, agent in enumerate(self.agents):
438             positions[index] = agent.position
439             speeds[index] = agent.velocity * agent.speed
440
441         return positions, speeds
442
443     def compute_figure(self):
444         """Génère une figure matplotlib avec le groupe d'agents
            ↪  sous forme d'un nuage de points en deux ou trois
            ↪  dimensions."""
445         fig = plt.figure()
446         if self.dimension == 2:
447             plot_axes = plt.axes()
448             sight_wedges = []
449
450             for agent in self.agents:
451                 color, dir_angle = agent.get_color()
452                 sight_angle = (180 * agent.field_sight) / math.pi
453
454                 if agent.agent_type:
455                     size, color = 7, (0, 0, 0)
456                 else:
457                     size = 5
458                 plt.scatter(agent.position[0], agent.position[1],
                    ↪  s=size, color=color)
459
```

```
460                 wedge = mpatches.Wedge((agent.position[0],
                     ↪  agent.position[1]), agent.sight,
461                                        dir_angle + 360 - sight_angle,
                                            ↪  dir_angle + sight_angle,
                                            ↪  ec="black")
462                 sight_wedges.append(wedge)
463
464
                ↪  plot_axes.add_collection(PatchCollection(sight_wedges,
                ↪  alpha=0.3))
465
466             plot_axes.axes.set_xlim(-self.length / 2, self.length
                ↪  / 2)
467             plot_axes.axes.set_ylim(-self.length / 2, self.length
                ↪  / 2)
468
469         return fig
470
471     def show(self):
472         """Affiche le groupe d'agent."""
473         self.compute_figure()
474         plt.show()
475
476     def compute_animation(self, frames: int=20, interval:
     ↪  int=100, filename: str="vicsek", check_field: bool=True,
     ↪  check_wall: bool=False, sight: bool=False, step:
     ↪  float=0.5):
477         """
478         Génère une animation.
479
480         Paramètres
481         ----------
482         frames : int, optionnel
483             Nombre d'images voulues dans l'animation.
484         interval : int, optionnel
485             Intervale temporel entre deux frames de l'animation
                ↪  en ms.
486         filename : str, optionnel
487             Nom du fichier de sortie GIF.
488         check_field : bool, optionnel
489             Vérification de l'angle de vue. Si
                ↪  ``check_field=False`` les agents voient à 360°.
490         check_wall : bool, optionnel
491             Vérification des murs. Si ``check_wall=False``,
                ↪  l'espace est considéré torique.
492         sight : bool, optionnel
493             Affichage du cône de vision de chaque agent.
494         step : float, optionnel
495             Pas temporel pris pour les équations différentielles.
496         """
```

```
497             def aux(frame_index, plot_axes, sight: bool=True):
498                 progress_bar(frame_index, frames,
                     ↪  finished="exportation GIF en cours")
499
500                 sight_wedges = []
501                 plot_data = []
502                 size = 5
503
504                 if self.dimension == 2:
505                     for agent in self.agents:
506                         if agent.agent_type != 3:
507                             agent.next_step(
508                                     self.get_neighbours(agent,
                                         ↪  agent.sight, check_field,
                                         ↪  check_wall),
509                                     self.dimension, self.length,
                                         ↪  step)
510
511                         color, dir_angle = agent.get_color()
512                         sight_angle = (180 * agent.field_sight) /
                             ↪  math.pi
513
514                         if agent.agent_type:
515                             size, color = 7, (0, 0, 0)
516                         else:
517                             size = 5
518
519
                         ↪  plot_data.append(plot_axes.scatter(agent.position[0
                         ↪  agent.position[1],
520                                 s=size, color=color))
521
522                         if sight or agent.agent_type == 1:
523                             wedge =
                                 ↪  mpatches.Wedge((agent.position[0],
                                 ↪  agent.position[1]), agent.sight,
524                                     dir_angle + 360 - sight_angle,
                                         ↪  dir_angle + sight_angle,
525                                     ec="none")
526                             sight_wedges.append(wedge)
527
528
                     ↪  plot_data.append(plot_axes.add_collection(PatchCollecti
                     ↪  alpha=0.3)))
529
530             else:
531                 for agent in self.agents:
532                     if agent.agent_type != 3:
```

```
533
                                ↪  agent.next_step(self.get_neighbours(agent,
                                ↪  agent.sight, check_field),
534                                     self.dimension, self.length,
                                     ↪  step)
535                         sight_angle = (180 * agent.field_sight) /
                             ↪  math.pi
536
537                         if agent.agent_type:
538                             size, color = 7, (1, 0, 0)
539                         else:
540                             size, color = 5, (0, 0, 0)
541
542
                             ↪  plot_data.append(plot_axes.scatter(agent.position[0
                             ↪  agent.position[1], agent.position[2],
                             ↪  s=size, color=color))
543
                             ↪  plot_data.append(plot_axes.quiver(agent.position[0
                             ↪  agent.position[1],
544                                 agent.position[2], agent.velocity *
                                     ↪  agent.speed[0],
545                                 agent.velocity * agent.speed[1],
                                     ↪  agent.velocity * agent.speed[2],
546                                 color=color))
547
548             return plot_data
549
550         images = []
551
552         fig = plt.figure()
553         if self.dimension == 2:
554             plot_axes = plt.axes()
555             plot_axes.axes.set_xlim(-self.length / 2, self.length
                 ↪  / 2)
556             plot_axes.axes.set_ylim(-self.length / 2, self.length
                 ↪  / 2)
557         else:
558             plot_axes = plt.axes(projection="3d")
559             plot_axes.axes.set_xlim3d(-self.length / 2,
                 ↪  self.length / 2)
560             plot_axes.axes.set_ylim3d(-self.length / 2,
                 ↪  self.length / 2)
561             plot_axes.axes.set_zlim3d(-self.length / 2,
                 ↪  self.length / 2)
562
563         for findex in range(frames):
564             plot_data = aux(findex, plot_axes, sight)
565             images.append(plot_data)
566
```

```
567             ani = animation.ArtistAnimation(fig, images,
                ↪  interval=interval)
568             ani.save(filename + ".gif")
569
570         def run(self, steps: int=20, check_field: bool=True,
            ↪  check_wall: bool=True, step: float=0.5):
571             """
572             Fait avancer le groupe d'agent sans gérérer d'animations.
573
574             Paramètres
575             ----------
576             steps : int, optionnel
577                 Nombre de pas dont il faut faire avancer le groupe.
578             check_field : bool, optionnel
579                 Vérification de l'angle de vue. Si
                    ↪  ``check_field=False`` les agents voient à 360°.
580             check_wall : bool, optionnel
581                 Vérification des murs. Si ``check_wall=False``,
                    ↪  l'espace est considéré torique.
582             step : float, optionnel
583                 Pas temporel pris pour les équations différentielles.
584             """
585             for index in range(steps):
586                 progress_bar(index, steps)
587                 for agent in self.agents:
588                     if agent.agent_type != 3:
589                         agent.next_step(
590                                         self.get_neighbours(agent,
                                            ↪  agent.sight, check_field,
                                            ↪  check_wall),
591                                         self.dimension, self.length,
                                            ↪  step)
592
593         def order_parameter(self):
594             """Renvoie le paramètre d'alignement."""
595             speed = np.zeros(self.dimension)
596             velocity = 0
597             for agent in self.agents:
598                 agent_speed = agent.velocity * agent.speed
599
600                 speed += agent_speed
601                 velocity += norm(agent_speed)
602
603             return (1 / velocity) * norm(speed)
604
605
606 class DimensionError(Exception):
607     """Erreur de dimension."""
608
609
```

```python
# Fonctions
def rarray(dim: int, minimum: float, maximum: float):
    """
    Retourne un tableau numpy de taille donnée rempli de nombres aléatoire pris entre les bornes communiquées.

    Paramètres
    ----------
    dim : int
        Dimension du tableau.
    minimum : float
        Valeur minimum du tableau.
    maximum : float
        Valeur maximum du tableau.

    Signature
    ---------
    out : np.array
        Tableau numpy de nombres aléatoires.
    """
    return minimum + (maximum - minimum) * np.random.random(dim)


def agent_generator(position: tuple=(-25, 25), speed: tuple=(-2, 2), noise: tuple=(0, 1), sight: tuple=(5, 10), field_sight: tuple=(math.pi/4, math.pi/2), agent_type: int=0, fear: tuple=(0, 1), dim: int=2):
    """
    Retourne un agent généré aléatoirement.

    Paramètres
    ---------
    position : tuple, optionnel
        Valeurs limites de la position.
    speed : tuple, optionnel
        Valeurs limites de la vitesse.
    noise : tuple, optionnel
        Valeurs limites du bruit de l'agent.
    sight : tuple, optionnel
        Valeurs limites de la portée de la vue des agents.
    field_sight : tuple, optionnel
        Valeurs limites du champ de vision des agents.
    agent_type : int, optionnel
        Type de l'agent
        0 : agent normal
        1 : agent répulsif
        2 : agent leader
        (3 : mur)
    fear : tuple, optionnel
```

```
656         Valeurs limites de la peur de l'agent aux agents
            ↪ répulsifs.
657     dim : int, optionnel
658         Dimension de l'espace, peut être 2 ou 3.
659 
660     Signature
661     ---------
662     agent : Agent
663         Agent généré dans la limite des paramètres donnés.
664     """
665     if noise == -1:
666         noise = random.random()
667     if fear == -1:
668         fear = random.random()
669     agent = Agent(
670         position=rarray(dim, position[0], position[1]),
671         speed=np.zeros(dim),
672         velocity=0,
673         noise=(noise[1] - noise[0]) * random.random() + noise[0],
674         sight=(sight[1] - sight[0]) * random.random() + sight[0],
675         field_sight=(field_sight[1] - field_sight[0]) *
            ↪ random.random() + field_sight[0],
676         agent_type=agent_type,
677         fear=(fear[1] - fear[0]) * random.random() + fear[0]
678     )
679 
680     velocity = 0
681     while velocity < 1e-3:
682         agent.speed = rarray(dim, speed[0], speed[1])
683         velocity = norm(agent.speed)
684 
685     agent.speed /= velocity
686     agent.velocity = velocity
687     return agent.copy()
688 
689 
690 def group_generator(nb_agents: int, position: tuple=(-25, 25),
    ↪ speed: tuple=(-2, 2), noise: tuple=(0, 1), sight: tuple=(5,
    ↪ 10), field_sight: tuple=(math.pi/4, math.pi/2), fear:
    ↪ tuple=(0, 1), length: int=50, dim: int=2):
691     """
692     Retourne un groupe d'agents normaux générés aléatoirement
        ↪ dans les limites données.
693 
694     Paramètres
695     ---------
696     nb_agents : int
697         Nombre d'agents à générer pour le groupe.
698     position : tuple, optionnel
699         Valeurs limites de la position.
```

```
700         speed : tuple, optionnel
701             Valeurs limites de la vitesse.
702         noise : tuple, optionnel
703             Valeurs limites du bruit de l'agent.
704         sight : tuple, optionnel
705             Valeurs limites de la portée de la vue des agents.
706         field_sight : tuple, optionnel
707             Valeurs limites du champ de vision des agents.
708         fear : tuple, optionnel
709             Valeurs limites de la peur de l'agent aux agents
                ↪ répulsifs.
710         length : int, optionnel
711             Longueur caratéristique de l'espace.
712         dim : int, optionnel
713             Dimension de l'espace, peut être 2 ou 3.
714
715         Signature
716         ---------
717         out : Group
718             Groupe contenant les agents générés dans les limites
                ↪ données et avec les paramètres de
719             longueur et de dimension donnés.
720         """
721         agents = [agent_generator(
722                 position=position,
723                 speed=speed,
724                 noise=noise,
725                 sight=sight,
726                 field_sight=field_sight,
727                 fear=fear, dim=dim)
728                 for _ in range(nb_agents)]
729         return Group(agents, length=length, dim=dim)
730
731
732 def norm(vect: np.array):
733         """
734         Renvoie la norme du vecteur passé en argument.
735
736         Paramètres
737         ---------
738         vect : np.array
739             Vecteur n-dimensionnel.
740
741         Signature
742         ---------
743         out : float
744             Norme du vecteur.
745         """
746         return math.sqrt(sum(vect ** 2))
747
```

```python

def get_colors():
    """Retourne une liste de couleur indexée sur l'angle avec l'horizontale ascendante."""
    color_map = []
    red, green, blue = 255, 0, 0
    for angle in range (360):
        if (angle // 60) == 0:
            green += 4.25
        elif (angle // 60) == 1:
            red -= 4.25
        elif (angle // 60) == 2:
            blue += 4.25
        elif (angle // 60) == 3:
            green -= 4.25
        elif (angle // 60) == 4:
            red += 4.25
        elif (angle // 60) == 5:
            blue -= 4.25
        color_map.append((red / 255, green / 255, blue / 255))
    return color_map


def progress_bar(iteration: int, total: int, finished: str=""):
    """
    Affiche une barre de progression.

    Paramètres
    ----------
    iteration : int
        Itération courante à afficher.
    total: int
        Nombre total d'itération sur la barre
    finished : str, optionnel
        Texte à afficher une fois la barre complète.
    """
    iteration += 1
    completed_length = math.floor(75 * iteration / total)
    track = "#" * completed_length + " " * (75 - completed_length)
    print(f"[{track}] {math.floor(100 * iteration / total)}%", end="\r")

    if iteration == total:
        if finished:
            print("\n" + finished)
        else:
            print()


```

```
795 def stat(agents):
796     """
797     Affiche des statistiques sur une liste d'agents.
798      - bruit moyen
799      - peur moyenne
800      - vitese moyenne
801     """
802     noise, fear, velocity = 0, 0, 0
803     nb_agents = 0
804 
805     for agent in agents:
806         if agent.agent_type in (0, 2):
807             nb_agents += 1
808             noise += agent.noise
809             fear += agent.fear
810             velocity += agent.max_velocity
811 
812     noise /= nb_agents
813     fear /= nb_agents
814     velocity /= nb_agents
815 
816     print("noise   :", noise)
817     print("fear    :", fear)
818     print("vitesse :", velocity)
819 
820 
821 # Constantes
822 COLOR_MAP = get_colors()
```