

1. INTRODUCTION

1.1 Présentation du problème

1.1.1 Le phénomène de la tortue

Dans ce Travail Encadré de Recherche, nous avons choisi de traiter le sujet intitulé "*La marche de l'empereur*". Ce titre fait référence au manchot empereur vivant en Antarctique. Nous allons plus précisément étudier un phénomène particulier qui est propre à cette espèce d'oiseau. Avant de présenter ce phénomène, intéressons-nous aux conditions de vie du manchot empereur.

Tout d'abord précisons que le manchot empereur est un oiseau qui vit en colonie. Cette dernière qui peut comporter plusieurs milliers d'individus est plus précisément appelée une horde. Étant donnée la zone géographique où il vit, le manchot est confronté durant les mois d'hiver à des conditions climatiques très rudes. En effet, la température atteint couramment -40°C et le vent peut souffler jusqu'à 150 km/h . Une des explications au fait qu'il survit très bien dans un domaine si hostile est la particularité de son plumage qui est le plus dense de tous les plumages d'oiseau ($15\text{ plumes par cm}^2$). Seulement, en cas de conditions extrêmes, le plumage ne suffit pas à lui seul à maintenir la température interne du manchot à 39°C . Ce dernier adopte alors une stratégie particulière durant les périodes de grand froid.

Nous en arrivons alors au sujet d'étude de ce TER. Afin de maintenir leur température corporelle, tous les manchots d' une horde se regroupent afin de former un amas compact d'oiseaux. Ce phénomène est appelé "tortue" par les ornithologues car comme nous le voyons sur la figure ci-dessous, la horde de manchots forme une espèce de grosse carapace très dense.



Au sein de cette tortue, la densité peut atteindre jusqu'à 8 oiseaux au m^2 .

Parmi les manchots de la horde, certains sont beaucoup plus exposés au froid que d'autres. En effet, nous imaginons très bien qu'un manchot situé en bordure de horde aura plus froid qu'un manchot qui est situé au centre. De même, l' intuition nous fait penser que parmi les oiseaux du bord, ceux qui auront le plus froid sont ceux situés du côté le plus exposé au vent.

Les biologistes expliquent alors que lorsqu'un manchot a trop froid, il se déplace afin de trouver une position où les conditions sont plus acceptables. Ils constatent que suite aux différents déplacements individuels, la horde voit sa forme être sensiblement modifiée. De plus, ils remarquent que l'ensemble de manchots avance sur la banquise en suivant apparemment le sens du vent. Ces déplacements peuvent prendre une ampleur conséquente étant donné que les manchots font parfois la tortue durant des temps très longs (plusieurs jours sans interruption).

1.1.2 Objectifs de l'étude

Au vu du phénomène présenté précédemment, l'idée est alors de modéliser la situation afin de pouvoir expliquer et prédire les différents mouvements de la horde. Les trois chercheurs américains Aaron Waters, François Blanchette et Arnold D. Kim se sont penchés sur ce problème avant nous et nous disposons d'un résumé de leur étude sur lequel nous pouvons nous baser. Le but ici est de refaire la modélisation par nous-même en s'inspirant de ce résumé, notamment pour ce qui est de la définition du modèle et de ses hypothèses. Dans l'article des chercheurs, sont exposées les méthodes utilisées de manière très générale. Notre tâche consistera dans un premier temps à développer la théorie qui permet de les mettre en application.

Ensuite, nous devons mettre en place la partie programmation qui elle n'est pas mentionnée dans l'article. Le résumé qui est à notre disposition traite en grande partie les résultats obtenus après simulation. Cela nous permettra de comparer nos propres résultats avec ces derniers. Les chercheurs proposent un modèle particulier que nous tenterons de reproduire en nous posant systématiquement la question de sa cohérence et en tentant d'en améliorer certains points. Mais notre but est aussi de proposer un autre modèle qui nous semble plus naturel afin de comparer les conclusions obtenues.

L'objectif est donc de créer une simulation qui génère une tortue et la fait évoluer au cours du temps en fonction de différents paramètres comme par exemple la vitesse du vent. Afin d'y parvenir, nous devons être capable de déterminer la température aux alentours de la horde pour savoir quel manchot a le plus froid et se déplacera. La connaissance de la température nécessite bien sûr la connaissance du vent car il y a une interaction entre ces deux grandeurs.

Une grande partie du problème consiste alors à calculer ces quantités sur le domaine situé autour de la horde. Ce dernier est très particulier par deux aspects :

- La forme même du domaine est irrégulière
- Le domaine change à chaque fois qu'un manchot se déplace

1.2 Présentation des recherches

1.2.1 Modèle et hypothèses

Pour réaliser cette étude, nous avons besoin de définir le modèle utilisé, ainsi que les hypothèses nécessaires à la modélisation.

a. Modèle d'évolution de la horde

L'hypothèse principale sur laquelle reposera l'étude est la suivante :
Au sein de la horde, chaque individu souhaite augmenter sa propre température corporelle. Les manchots ne cherchent donc pas à augmenter la température globale de la horde. Ils raisonnent en tant qu'individus et non en tant que membres d'un groupe.

Pour cela, nous considérons la modélisation suivante concernant l'évolution de la horde :

- Au début de l'expérience, la horde est constituée d'un ensemble de manchots qui sont tous en contact très serré les uns avec les autres. La horde d'oiseaux forme alors un ensemble compact de sorte à ne pas y laisser entrer le vent. De plus, chaque manchot est en contact avec au moins deux autres manchots afin de se tenir au chaud.
- Tous les manchots restent immobiles jusqu'à ce que l'un d'entre-eux ait trop froid. Il s'agit naturellement d'un manchot situé en bordure de horde. Lorsque le manchot en question ne supporte plus les conditions climatiques qui l'entourent, il décide de se déplacer afin de trouver une zone plus clémente. Il choisit alors la position la plus chaude sur le pourtour de la horde car il ne peut pénétrer en son intérieur du fait de la compacité de cette dernière.
- Après ce déplacement, le groupe d'oiseaux connaît un nouvel état d'équilibre jusqu'à ce que le phénomène se reproduise.

Dans ce modèle, nous supposons qu'un seul manchot se déplace à la fois. Nous supposons également que tous les individus ressentent le froid de la même façon.

Le nombre de manchots considérés ne comptabilise que les individus adultes car les petits sont couvés au sein de la horde, sous les individus adultes. Ainsi, les manchots étudiés dans ce problème peuvent tous être considérés de même taille. Au cours du temps de simulation, le nombre d'oiseaux reste constant.

La horde forme toujours qu'une seule partie. Elle ne peut se scinder.

b. Hypothèses concernant le vent et la température

Tout d'abord, étant donné que les manchots vivent sur la banquise, on peut considérer qu'ils se trouvent sur un plan parfait. De plus, au vu de leur petite taille (<120cm), nous négligerons les effets liés à l'altitude concernant le vent et la température. Même s'il est clair que le vent qui passe au dessus de la horde contribue à refroidir les manchots, nous considérons qu'il y contribue de la même manière pour tous les individus. Ce n'est donc pas un phénomène à prendre en compte. Ainsi, notre domaine de résolution sera un domaine du plan.

Dans cette étude, nous nous intéressons au cas où le vent est constant au large de la horde. De plus, nous supposons qu'il n'est pas tourbillonnant, même en présence de l'obstacle que représente la horde.

La température au sein de la horde est supposée être la même en tout point et ne varie pas au cours du temps de simulation. Nous verrons alors dans la partie 4.2 de quelle manière nous évaluons le sentiment de froid qu'a un manchot.

La température dans les zones éloignées de la horde connaît une répartition uniforme et sa valeur ne change pas au cours du temps.

Toujours concernant la température, nous considérons qu'il n'y a aucune source de chaleur en présence sur le domaine d'étude. Nous négligeons ainsi par exemple la chaleur que pourrait renvoyer les manchots à l'extérieur de la horde.

Enfin, nous considérons que la variable temps n'intervient pas dans la modélisation car au moment de la détermination des vents et températures, la horde est toujours à l'équilibre.

1.2.2 Structure de la horde virtuelle

a. Départ de constats simples

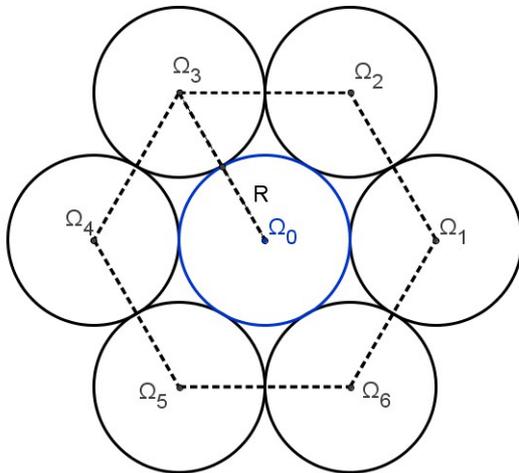


Le corps d'un manchot a une physionomie assez régulière, assimilable à une forme cylindrique. Nous nous intéressons ici à une visualisation du manchot dans un plan horizontal. Il est alors naturel de modéliser un individu par un disque.

D'autre part, on considère dans ce modèle que les manchots sont tous de même taille. Notre horde sera donc constituée d'un ensemble de disques de même rayon.

Pour pouvoir augmenter leur température interne, les manchots se tiennent très serrés. De cette manière, chaque manchot est en contact direct avec ses voisins. La horde est alors un **ensemble connexe du plan, constitué de disques de même rayon et juxtaposés**.

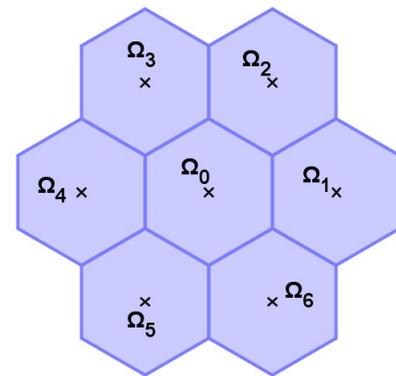
b. Structure de la horde



On considère un disque D_0 du centre de la horde. On note Ω_0 son centre et R son rayon. Étant au cœur du groupe d'oiseaux, D_0 est entouré de voisins qui sont des disques D_i de centre Ω_i . Les points Ω_i sont donc situés à une même distance de $2R$ de Ω_0 et sont entre-eux distants de cette même longueur (car les disques sont tous tangents). On obtient alors un hexagone $\Omega_1\Omega_2\Omega_3\Omega_4\Omega_5\Omega_6$ et on peut alors conclure qu'un manchot du centre de la horde possède 6 voisins.

Ainsi, la horde sera décrite par un ensemble de points situés sur les nœuds d'un maillage hexagonal.

Afin de rendre compte de la compacité de la horde, nous avons décidé de remplacer les disques par les hexagones présents sur la figure ci-contre. En effet, les manchots sont tellement serrés les uns contre les autres que leur corps épouse la forme des manchots voisins.



c. Système de repérage

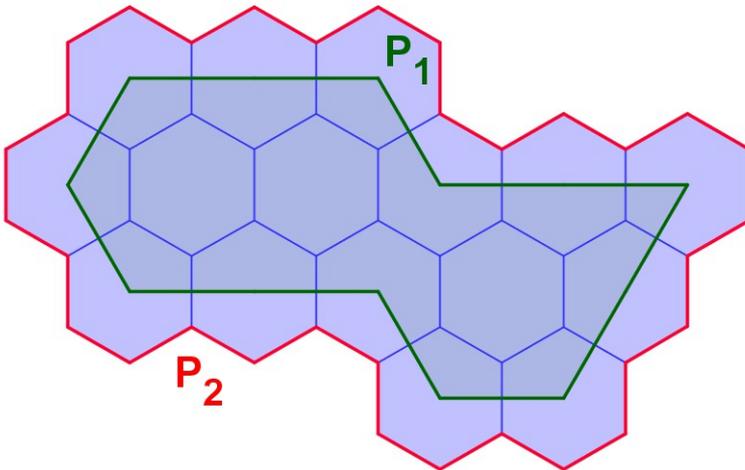
De par la forme du maillage, il est naturel d'introduire le repère $(\Omega_0, \overrightarrow{\Omega_0\Omega_1}, \overrightarrow{\Omega_0\Omega_2})$. Dans ce repère, les voisins de Ω_0 ont les coordonnées suivantes :

Point	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5	Ω_6
Voisin	E	NE	NW	W	SW	SE
Coordonnées	(1,0)	(0,1)	(-1,1)	(-1,0)	(0,-1)	(1,-1)

1.2.3 Domaine de résolution

Comme nous l'avons mentionné dans la partie 1.1.2, une grande partie de l'étude portera sur la détermination de la température et du vent autour de la horde de manchot. Ayant présenté la géométrie de la horde et au vu des hypothèses posées en 1.2.1, nous pouvons désormais présenter le domaine de résolution du problème.

Considérons la horde de manchots représentée ci-dessous :



Comme nous le verrons dans la suite de l'étude, nous avons choisi de tester deux modèles utilisant des domaines de résolution différents.

Pour le premier modèle, nous choisissons le polygone P_1 passant par les centres des manchots situés en bordure de horde.

Pour le second modèle, nous considérons le polygone P_2 qui décrit le contour de la horde.

Nous définissons alors le domaine de résolution Ω qui dans les deux modèles correspond à l'extérieur du polygone (P_1 ou P_2). Ce domaine est alors un sous ensemble connexe et non borné du plan. Nous observerons par la suite que grâce à l'hypothèse d'uniformité du vent et de la température au large de la horde, le fait de travailler sur un domaine non-borné n'est pas un obstacle à la résolution.

Ainsi, on constate que le problème possède deux particularités qu'il faudra savoir gérer :

- > Le domaine de résolution a une forme assez complexe et plutôt irrégulière
- > Le domaine de résolution change à chaque fois qu'un manchot modifie sa position.