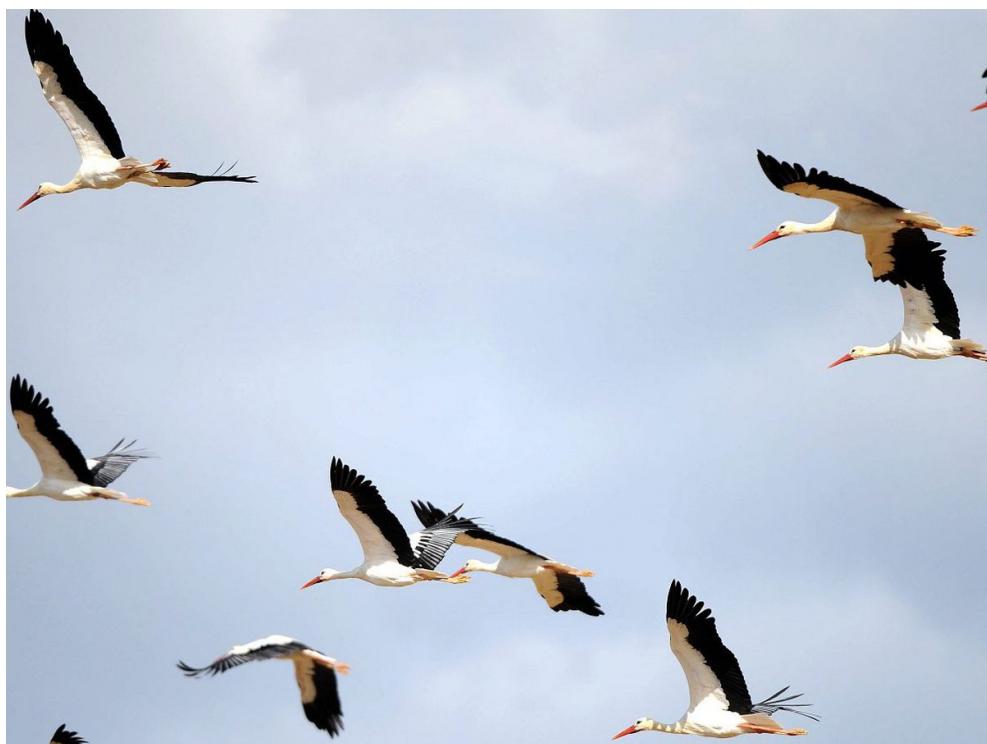


LBRTI2102 - PROCESS-BASED MODELLING

Modélisation spatiale d'un migration d'oiseaux sur base de l'équation d'advection-diffusion



Auteurs :

ClaesSENS OLIVER
HEROUFOSSE GAUTHIER

Professeur :

E. HANERT

2021 - 2022

Table des matières

1	Introduction	2
2	Matériel et méthodes	3
2.1	Choix des données	3
2.2	Équation et formulation du modèle	4
2.3	Hypothèses	5
3	Résultats	8
3.1	Paramétrisation initiale	8
3.2	Validation	10
4	Discussion	12
4.1	Fonctionnement du modèle	12
4.2	Améliorations	13
4.3	Applications	14
5	Conclusion	15
6	Bibliographie	16
7	Annexes	17
7.1	Graphes auxilliaires	17

1 Introduction

Chaque année, plusieurs milliards d'oiseaux entreprennent de longs voyages entre leur site de nidification et leur site d'hivernation. Ces mouvements incessants lient les écosystèmes et leur biodiversité à une échelle globale. Dès lors, il est nécessaire de considérer ce processus à une échelle internationale. Cependant, les populations d'oiseaux sont en diminution ces 30 dernières années, dû notamment aux changements rapides de leurs habitats ainsi qu'à l'encombrement des voies aériennes. De plus, avec la remontée progressive des températures à nos latitudes, les oiseaux raccourcissent parfois leurs routes migratoires, ne jugeant pas nécessaire de se rendre à plus basse latitude. Pour ces raisons, il nous semble pertinent de s'intéresser de plus près aux dynamiques qui dictent les déplacement aériens de ces animaux.

L'oiseau sur lequel porte notre modélisation est la cigogne blanche. Cet animal de grande taille se retrouve à de nombreux endroits à travers le monde, dont l'Europe occidentale.

L'objectif de ce travail est de parvenir à modéliser le déplacement de ces grands oiseaux de leur point de nidification jusqu'à leur zone d'hivernage. Les compétences développées sont les suivantes :

- Application de concepts mathématiques essentiels en modélisation ;
- Renforcement des connaissances théoriques sur ces mêmes concepts ;
- Maitrise des outils de modélisation informatique adéquats ;

Nous commencerons par présenter l'équation d'advection-diffusion utilisée pour décrire le modèle, ainsi qu'une justification détaillée des hypothèses correspondantes. Nous discuterons ensuite des résultats obtenus, et nous finirons par implémenter une méthode de validation du modèle sur base d'un échantillon extérieur. Enfin, nous présenterons des applications potentielles et des voies d'amélioration du modèle.

2 Matériel et méthodes

2.1 Choix des données

La modélisation de la migration porte sur les cigognes blanches. Ce choix est justifié par plusieurs raisons :

- Les routes migratoires des cigognes européennes sont représentatives pour d'autres espèces ;
- Ces routes sont assez directes, et donc plus simplement modélisables ;
- La cigogne est un animal connu du grand public. En effet, il est plus facile de s'imprégner d'un sujet avec lequel il existe un point d'attache.

Les données sur lesquelles nous nous basons pour modéliser la migration des cigognes proviennent du site [Movebank](#). Cette plateforme regroupe des données sur des animaux porteurs de traceurs GPS. Parmi les nombreuses données disponibles sur la cigogne blanche, nous avons choisi une population dont le trajet démarre de Saintonge en France et termine en Afrique subsaharienne à hauteur du Nigeria afin de paramétriser notre modèle .

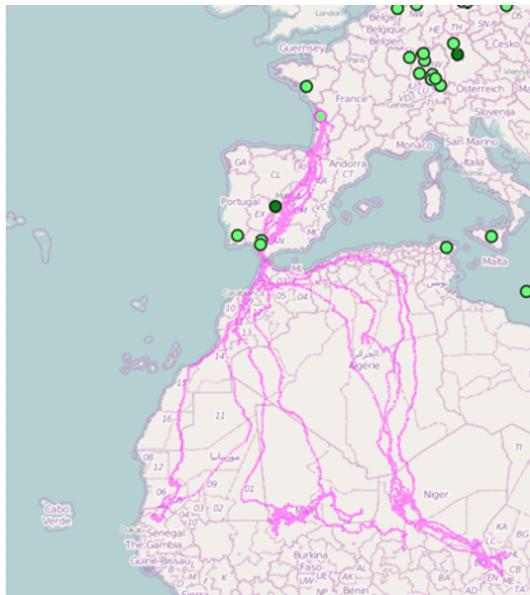


FIGURE 1 – Cigognes de Saintonge, Movebank

Cette figure représente les différents trajets empruntés par les individus de Saintonge lors de leurs migrations. On y aperçoit un net gradient Nord - Sud, et une large diffusion une fois le détroit de Gibraltar franchi. Ainsi, utiliser une équation d'advection-diffusion semble approprié.

2.2 Équation et formulation du modèle

Dans un environnement spatialement hétérogène, il n'est pas anodin de suggérer qu'une population d'individus aient une tendance particulière à se déplacer selon un gradient de ressources tel la nourriture ou l'eau en plus de simplement diffuser aléatoirement. Dans le cas d'une migration, le climat plus clément est la cause principal du déplacement des individus. Ce phénomène peut être représenté par un modèle d'advection-diffusion-réaction, qui permet de simuler de manière réaliste la migration d'une population animale.

L'équation d'advection-diffusion-réaction bidimensionnelle utilisée pour notre modélisation se trouve ci-dessous :

$$\frac{\partial d}{\partial t} + c_x \frac{\partial d}{\partial x} + c_y \frac{\partial d}{\partial y} = K \left(\frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 d}{\partial y^2} \right) - \lambda d$$

où,

- **d** est la densité de cigognes considéré au point (**x,y**) et au temps **t**, exprimée en unité de masse/km² ;
- **x** est la composante spatiale horizontale en km ;
- **y** est la composante spatiale verticale en km ;
- **cx** est la vitesse d'advection horizontale en km/jour ;
- **cy** est la vitesse d'advection verticale en km/jour ;
- **K** est le coefficient de diffusion à l'échelle considérée en km²/jour ;
- λ est le taux de réaction en jour⁻¹.

La résolution de cette équation différentielle partielle a été faite numériquement selon un schéma de différentiation exponentielle pour la discréétisation temporelle ([Virag & Trincas, 1994](#)). Cette résolution a été faite en *Python* avec la bibliothèque *FiPy* ([Guyer et al., 2009](#)), un solveur d'équations différentielles partielles. Afin d'obtenir une solution pour cette équation il a fallu spécifier des conditions aux limites ainsi qu'une solution initiale. Les conditions aux limites du domaine sont de type Neumann, c'est-à-dire que ce dernier est fermé et aucun flux n'est admis à travers les frontières. La grille de notre modèle est composé de mailles carrées de 55 km de coté et le pas de temps imposé est de T/1000, T étant la période totale de simulation. *FiPy* utilise une méthode des volumes finis basé sur le centre des cellules de la grille et également centrée dans l'espace.

La solution initiale de notre modèle en *Python* est calculée sur base de l'équation gaussienne ci-dessous :

$$\text{value} = \mathbf{Smax} * \text{numerix.exp}\left(-\left((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2\right) / (0.05 * \mathbf{sigma}^2)\right)$$

où,

- **Smax** est la densité maximale de la population ;
- x_0, y_0 sont les coordonnées de départ de la migration ;
- **sigma** est l'étendue sur laquelle repose la population initiale.

2.3 Hypothèses

Pour implémenter le modèle, une série d'hypothèses doivent être posées. Cette section va passer en revue les différentes dispositions prises afin d'obtenir un modèle simplifié mais au plus près de la réalité.

Le domaine est défini sur base du trajet parcouru par les cigognes ; ce dernier peut être déterminé par deux segments distincts (Figure 1) :

Le segment Saintonge - Gibraltar représente une distance approximative de 1200 km, et le second à partir du détroit jusqu'en Afrique subsaharienne mesure environ 2500 km. Afin d'englober notre domaine en entier, l'axe Y vertical est posé à 5500 km.

Concernant l'axe des X, on observe une large diffusion à partir du sud du détroit. La largeur de la bande d'arrivée est d'environ 3000 km. L'axe des X sera posé également comme étant de 5500 km afin d'englober l'entièreté du domaine considéré. Ainsi, le domaine est un carré de 5500 km de côté. Afin d'obtenir une représentation plus qualitative, une carte provenant de [Google Maps](#) a été ajoutée en fond de domaine (Figure 2). Il est tout de fois important de préciser qu'elle n'est présente qu'à titre indicatif et que l'échelle n'est pas parfaitement égale à 1/1, puisqu'il s'agit d'un ajout purement visuel.

Pour déterminer les valeurs des coefficients décrits dans la section précédente, le comportement des cigognes est le principal facteur. Une fois la période de nidification passée, les cigognes migrent vers l'Afrique dans le but d'éviter les conditions hivernales trop rudes sous nos latitudes. Ce trajet s'effectue vers la fin de l'été, entre les mois d'Août et Septembre ([Sàrl, 2003](#)). La période de migration est considérée comme 6 semaines, exprimée en jours, posée comme **T = 42**. Le modèle d'advection-diffusion ne permettant pas d'employer un coefficient de diffusion négatif, caractérisant un regroupement de la population, un aller-simple de la population est ainsi considéré.

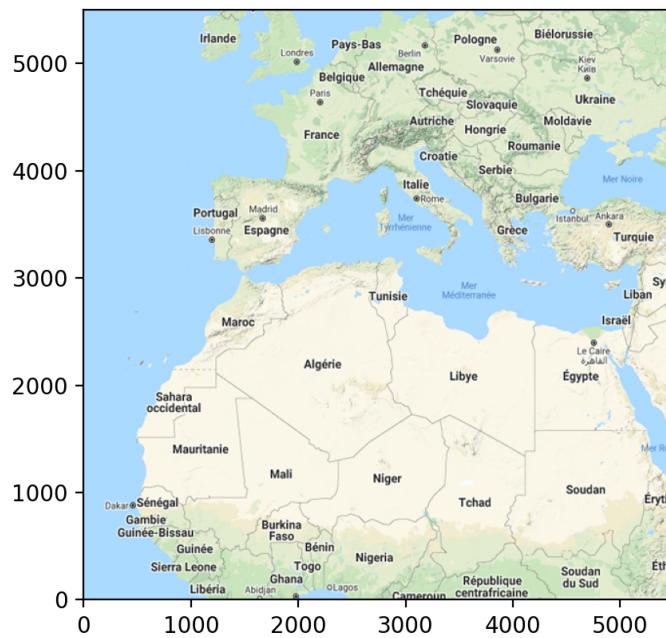


FIGURE 2 – Domaine du modèle

La densité maximale de population trouvée dans la littérature se rapproche de 500 individus/Km² ([Nussbaumer et al., 2019](#)). Étant donné qu'une cigogne adulte pèse en moyenne 3.4 Kg, cela correspond à une densité de 1700 Kg/km². Cependant, une valeur de Smax à 1700 ne permet pas d'obtenir une solution stable numériquement. Nous avons donc choisi de poser **Smax = 3.4**. Exprimé en Mg/Km², cela correspond à une valeur limite de 1000 individus/km², atteignable en cas d'extrême rassemblement.

Concernant les coefficients des phénomènes d'advection, (**cx, cy**), la vitesse de la migration a été calculée afin de traduire celle-ci en terme de vitesse d'advection. Puisque le trajet de 3700 km est parcouru en 6 semaines, la vitesse d'une cigogne est d'en moyenne **88 Km/jour**. Cela peut paraître peu, mais les cigognes restent parfois plusieurs jours stationnées à un même endroit au cours du trajet. Pour estimer nos coefficients (**cx, cy**), il est important de considérer séparément les deux segments du domaine. En effet, on remarque que les cigognes se dirigent vers le Sud-Est après le détroit de Gibraltar, alors que le trajet sur le continent Européen est bien plus proche d'une droite verticale (Figure 1). Les coefficients d'advection sont donc différents.

Pour le premier segment (Europe), les coefficients d'advection (**cx, cy**) sont respectivement posés à **(-30, -84)**. Pour le second segment (Afrique), les coefficients d'advection (**cx, cy**) sont respectivement égales à **(34, -82)**. Ainsi, les normes respectives de ces

deux vitesses sont égales à **89** et **88 Km/jour**, ce qui correspond à la vitesse réelle de déplacement des cigognes.

Concernant le coefficient de diffusion **K**, il n'a pas été possible d'importer une valeur depuis la littérature. Pour le premier segment, la diffusion a été posée à **K = 0 km²/jour**. Pour le second segment, une valeur de **K = 2000 km²/jour** a été choisie. Ce choix arbitraire est le résultat d'ajustements du modèle afin d'obtenir un résultat au plus proche de la réalité.

Enfin, le terme de réaction λ n'a pas été considéré dans ce modèle. Il est donc égal à 0. Ainsi, la population reste constante tout au long de la simulation.

Voici un résumé des valeurs des différents paramètres :

- **T = 42 [jour]**
- **Smax = 3.4 [Mg/Km²]**
- **(cx, cy) Europe = (-30, -84) [Km/jour]**
- **(cx, cy) Afrique = (34, -82) [Km/jour]**
- **K = 0 Europe [Km²/jour]**
- **K = 2000 Afrique [Km²/jour]**
- **$\lambda = 0$ [jour⁻¹]**

3 Résultats

La section suivante présente les différents résultats obtenus avec le modèle. Après la présentation des paramètres permettant de faire correspondre le modèle au mieux avec la réalité, nous tenterons de valider notre modèle en changeant l'échantillon test. Ainsi, la validation se fera sur base des cigognes de Loire-Atlantique.

3.1 Paramétrisation initiale

Pour rappel, la paramétrisation initiale a pour objectif de modéliser le trajet des cigognes de Saintonge jusqu'en Afrique sub-saharienne. La simulation prend place à fin de l'été, étalée sur une période de 42 jours.

Ci-dessous se trouve la situation juste après le départ des oiseaux :

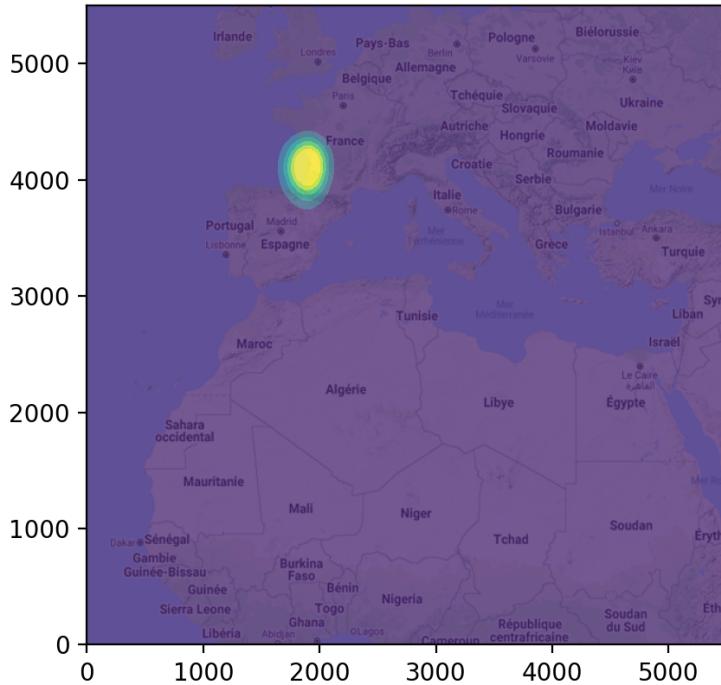


FIGURE 3 – Résultat de la simulation après 4 jours

La figure 4 représente la population de cigognes après 17 jours de vol traversant le détroit de Gibraltar, passage obligatoire lors de la migration des cigognes vers l’Afrique. Au fur et à mesure que la solution évolue, celle-ci diminue en amplitude et sa distribution s’élargit. On remarque que la solution se diffuse sur une étendue nettement plus grande que les 60 km qui séparent les extrémités gauche et droite du détroit de Gibraltar.

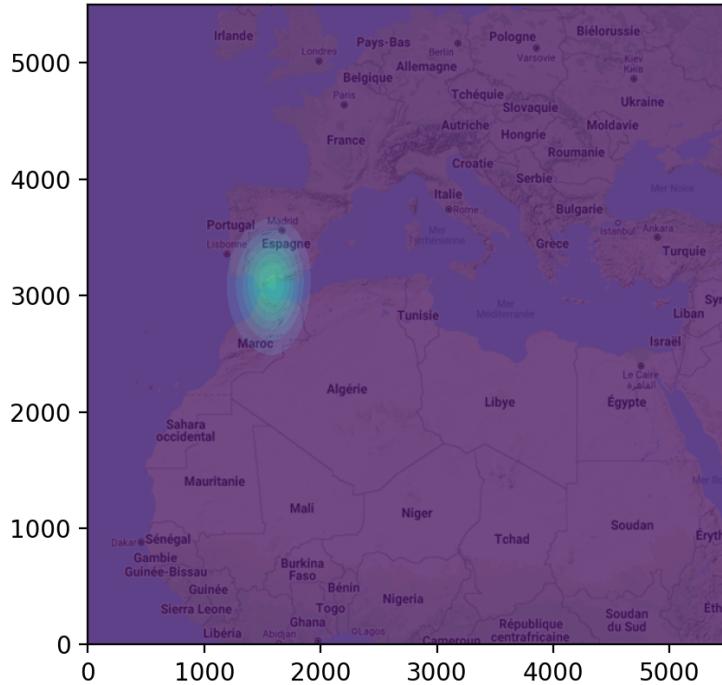


FIGURE 4 – Résultat de la simulation après 17 jours

À la figure 5 se trouve le résultat de notre solution finale. La valeur numérique du centre de notre distribution est bien inférieure à la valeur initiale, la solution est passé d’un jaune intense vers un bleu très léger. La population est centrée à l’Est du Mali et est encore plus diffuse que celle représentée à la figure précédente. En effet, cette fois ci elle s’étend sur près de 2000 km, soit environ 1000 km de moins que ce que suggère les données sur Movebank (voir Figure 1).

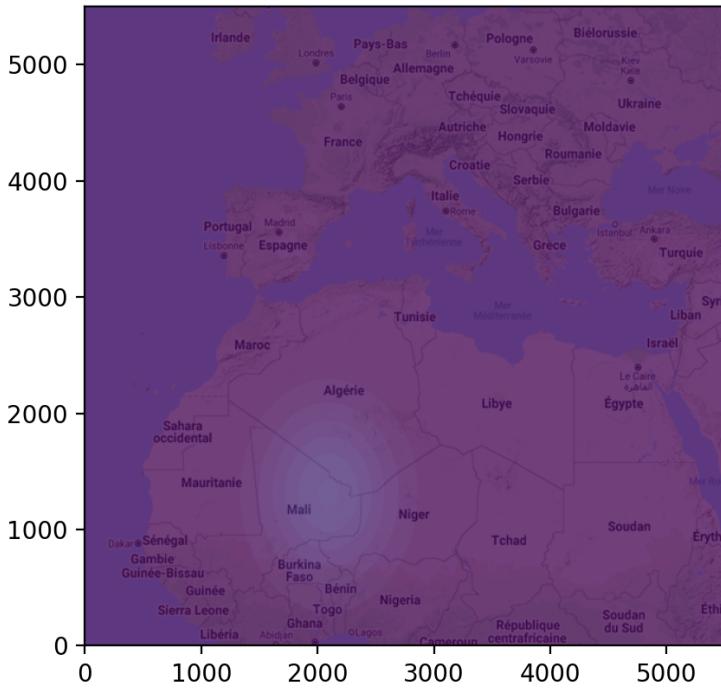


FIGURE 5 – Résultat de la simulation après 42 jours (fin de simulation)

3.2 Validation

Afin de valider les résultats obtenu lors de la paramétrisation, nous avons décidé de soumettre notre modèle à un second jeu de données. Les données sont toujours tirées du site [Movebank](#) mais cette fois la population de cigognes prend la Loire-Atlantique comme zone de départ. En revanche, la destination finale reste l’Afrique subsaharienne tout comme les cigognes de Saintonge. Certains paramètres initiaux ont du être modifiés afin de représenter un nouveau trajet. Il s’agit premièrement de la position initiale de la population de cigognes en question. Les coordonnées (x_0, y_0) ont été translatées de quelques centaines de kilomètres de manière à les faire correspondre à la figure 6. En deuxième mesure, puisque les cigognes ont un trajet plus long à effectuer, il paraît rigoureux d’augmenter la durée de simulation à un total de 50 jours.

Une fois ces deux paramètres modifiés, le modèle renvoie des solutions qui sont pertinentes par rapport à nos attentes. La population de cigogne se déplace bien en restant sur le continent et passe à travers le détroit de Gibraltar comme pour l’échantillon étalon de Saintonge (Figure 9 et 10, Annexe). La solution finale de cette étape de validation (Figure 7) montre que largeur de la distribution de la population en zone d’hivernage correspond

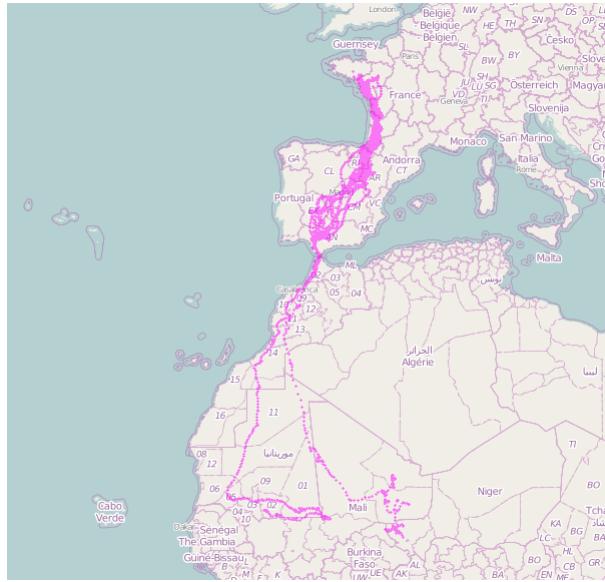


FIGURE 6 – Cigognes de Loire-Atlantique, Movebank

à celle de la figure 6. La zone d'arrivée simulée ne correspond pas tout à fait avec celle théorique, un léger décalage horizontal est observable. En revanche, la latitude semble coïncider ce qui confirme la validité de notre modèle.

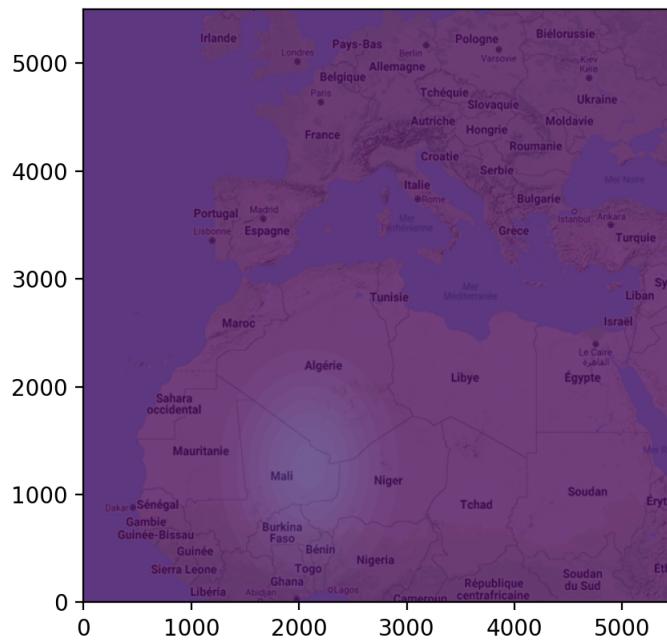


FIGURE 7 – Résultat de la simulation pour la validation - jour 50 (fin de simulation)

4 Discussion

4.1 Fonctionnement du modèle

Comme mentionné plus haut, nous avons considéré que $\mathbf{K} = 0 \text{ Km}^2/\text{jour}$ pour le premier segment. Autrement dit, la population de cigogne ne se diffuse pas entre la zone de départ et Gibraltar. Cependant, les figures présentées dans la section précédente semblent clairement montrer une diffusion non négligeable malgré un coefficient de diffusion nul. Ceci s'explique par le fait que nous avons utilisé un schéma exponentiel pour résoudre l'équation d'advection-diffusion. L'utilisation d'un tel schéma induit obligatoirement une diffusion artificielle indésirable dans l'algorithme. Cela affecte fortement la précision du modèle dans le cadre de ce premier segment, où une forte diffusion est déjà observée à hauteur de Gibraltar (Figure 4). Cette diffusion non contrôlée s'additionne ensuite à la diffusion générée par \mathbf{K} non nul dans la deuxième partie du trajet.

La validation nous montre que le modèle fonctionne décemment. Néanmoins, on peut soulever une première limite à notre modèle. Puisque le trajet des cigognes est linéaire, il n'est pas possible de choisir n'importe quel point de départ pour les cigognes. Par exemple, en cas de départ depuis la Pologne, on remarque qu'elle emprunterait un trajet passant au-dessus de la chaîne de montagne des Alpes (Figure 11, Annexe).

Il est ainsi possible d'identifier une zone de départ de laquelle le modèle peut fonctionner raisonnablement (Figure 8).

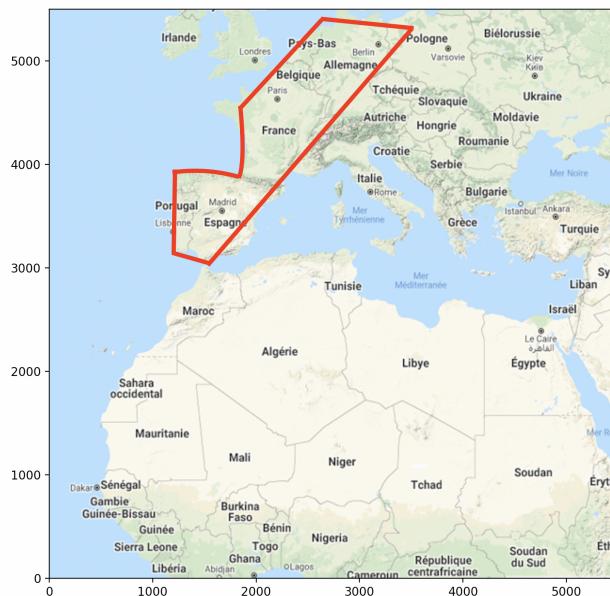


FIGURE 8 – Zone acceptable pour le départ en migration des cigognes

Cependant, il existe une seconde route de migration pour les cigognes d'Europe. On

remarque en effet que les cigognes nichant à l'Est de l'Allemagne empruntent préférentiellement une route migratoire via le Moyen-Orient (Figure 12, Annexe). Ainsi, il semble que le modèle ne doive donc pas s'ajuster aux individus nichant or de la zone préférentielle. Bien entendu, cette particularité n'est pas vérifiée pour toutes les espèces. Dès lors, cela réduit considérablement les espèces auxquelles le modèle pourrait être adapté.

Les limites du modèle sont multiples. Tout d'abord, bien qu'ayant identifié le principal point d'attrait des oiseaux, le modèle ne tient pas compte de multiples forces d'attrait présentes le long du trajet. Par exemple, les oiseaux ont fortement tendance à éviter les passages dans les zones montagneuses, et dans une moindre mesure, les grandes villes. Notre modèle ne permet pas d'identifier et créer de telles zones que les individus devraient éviter. À titre illustratif, les oiseaux survolent les Pyrénées par le centre, alors qu'en réalité ils font un détour en longeant la méditerranée pour éviter les hautes altitudes. De plus, les cigognes ne faisant pas de réserves de graisses au préalable, elles sont forcées de s'arrêter quotidiennement pour se nourrir. Elles choisissent en général des points d'eau reculés à l'abri des zones à fortes concentrations humaines. À une échelle plus petite, il serait intéressant d'identifier ces endroits préconisés pour y entreprendre des mesures de protections. On remarque également à la Figure 1 que les trajets longent la côte. Tout ces phénomènes ne peuvent être modélisés facilement avec un tel modèle. De plus, le maillage de 55 Km^2 ne permet pas d'obtenir une précision suffisante pour réaliser des prédictions spécifiques. Le bilan de masse est assez grossier, et les zones à fortes concentrations très larges.

Ensuite, dû au choix d'un modèle d'advection-diffusion, modéliser le trajet complet des cigognes n'est malheureusement pas possible. De fait, la diffusion ne peut pas être caractérisée par un coefficient **K** négatif, qui représenterait le regroupement progressif des individus.

4.2 Améliorations

Même si notre modèle semble produire de bons résultats pour une certaine gamme de données initiales, il reste un modèle simplifié. De nombreuses voies d'améliorations sont possibles afin d'obtenir un modèle plus complexe et donc plus proche de la réalité. Quelques éléments d'améliorations sont présentés ci-dessous.

Un premier point d'amélioration serait de régler le problème de diffusion dissipatif. Puisque cette fausse diffusion numérique est proportionnelle à la taille de la grille de simulation, il est possible de diminuer la taille des mailles de cette dernière en vue d'at-

ténuer cette erreur ([H, 2021](#)). Ensuite, il va de soi que la population de cigogne n'est pas constante lors de la migration. L'hypothèse d'un coefficient de réaction nul est simpliste bien que pratique lors de la conception d'une première version d'un modèle. Il semblerait donc intéressant de rajouter la partie réaction dans l'équation utilisé. Le taux de réaction λ serait non nul et traduirait plusieurs phénomènes, tel la mort naturelle ou la mort par prédatation des cigognes ainsi que les naissances sur les sites de nidification avant la période de migration. De plus, comme mentionné précédemment il existe deux routes de migration pour les cigognes, la première à l'Ouest en passant par Gibraltar et la seconde à l'Est via le Moyen-Orient. Une amélioration considérable serait de joindre ces deux voies migratoires en un seul modèle qui par conséquent permettrait de déterminer la trajet préférentiel des cigognes en fonction de leur localisation.

Enfin, il est également possible d'améliorer le modèle sur le plan esthétique. En effet, on peut remarquer que sur toutes les figures représentant les simulation, l'entiereté de la carte est asombrie en raison des valeurs de diffusion à l'extrême de la distribution de la population. Une légende des valeurs serait également la bienvenue.

4.3 Applications

Bien que le modèle présente d'incontestables limites qui réduisent fortement les possibilités d'applications, certaines possibilités peuvent néanmoins être émises quant à l'utilité du présent modèle.

Tout d'abord, les résultats obtenus permettent de d'identifier les points de passage importants des oiseaux. Les zones où la densité est importante peuvent être sujettes à des précautions particulières de conservation. Cependant, comme discuté précédemment, la grande taille de maille ne permet pas d'être assez précis pour effectuer des analyses pointilleuses. Ce modèle peut dès lors servir à tester des implémentations spécifiques à large échelle. Une analyse sur base de bilan de masse peut aussi être effectuée. Dans une moindre mesure, il peut également participer à la sensibilisation du grand public, par sa facilité de compréhension et ses hypothèses simples.

Enfin, un couplage avec un modèle épidémiologique pourrait être intéressant. Des études montrent l'impact qu'ont les oiseaux dans la propagation de maladies comme l'Influenza ou le virus West Nile ([Kurt D. Reed, 2003](#)). Puisque le modèle représente un déplacement de population, on pourrait en déduire la part de participation des oiseaux aux mouvements de ces virus problématiques.

5 Conclusion

Malgré le modèle très simplifié que nous avons produit, ce dernier nous a permis d'appliquer et de mieux comprendre certains concepts mathématique essentiels en modélisation. L'équation d'advection-diffusion utilisée est un compromis entre complexité et obtention d'un résultat facilement interprétable. Le modèle permet aussi de se familiariser d'avantage avec des outils de modélisation tels que l'interface *Python* et la bibliothèque *FiPy*.

Les résultats du modèle sont plutôt bons, les individus parviennent sans encombre à destination. La zone de départs identifiée permet d'assurer que le modèle soit utilisé dans des conditions réalistes. Cependant, de nombreuses améliorations peuvent être apportées dans le but d'obtenir un modèle plus complet et plus proche de la réalité. La diminution de la maille permettrait un net gain de précision au modèle. Un niveau de résolution plus grand offre des possibilités de planification de mesures à prendre pour conserver les lieux les plus visités. De plus, il serait intéressant de comparer les résultats produits par un autre schéma de résolution que celui utilisé dans ce modèle, afin de mettre en évidence la part relative de diffusion aléatoire lié au schéma exponentiel. En effet, le phénomène de diffusion joue un rôle important dans la simulation, il conviendrait donc de choisir le schéma qui coïncide au mieux avec les observations.

Bien qu'ayant des limites non-négligeables, le modèle offre des applications multiples tant sur le plan environnemental qu'épidémiologique mais aussi écologique. Ainsi, la migration d'oiseaux est importante pour comprendre les phénomènes de prédation qui régissent les écosystèmes en lien avec les oiseaux.

6 Bibliographie

Références

- Guyer, J. E., Wheeler, D., & Warren, J. A. (2009). FiPy : Partial differential equations with Python. *Computing in Science Engineering*, 11(3), 6–15.
URL <http://www.ctcms.nist.gov/fipy>
- H, E. (2021). Lecture 7 - numerical solution : Finite difference method.
- Kurt D. Reed, J. S. H. S. K. S., Jennifer K. Meece (2003). Birds, migration and emerging zoonoses : West nile virus, lyme disease, influenza a and enteropathogens.
- Nussbaumer, R., Benoit, L., Mariethoz, G., Liechti, F., Bauer, S., & Schmid, B. (2019). A geostatistical approach to estimate high resolution nocturnal bird migration densities from a weather radar network.
URL <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/19/2233>
- Sàrl, B. (2003). Cigogne blanche (ciconia ciconia).
- Virag, Z., & Trincas, G. (1994). An improvement of the exponential differencing scheme for solving the convection-diffusion equation. *Advances in Engineering Software*, 19(1), 1–20.
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0965997894900426>

Sources

Somveille, M., Wikelski, M., Beyer, R.M. et al. Simulation-based reconstruction of global bird migration over the past 50,000 years. Nat Commun 11, 801 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14589-2>

Évolution des populations d'oiseaux communs (2020). <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/FFH208.html>

Polish Tourism Organisation. La cigogne tout un symbole. <https://www.pologne.travel/fr-be/inne-miasta-i-miejscowosci/nature/la-cigogne-tout-un-symbole>

Nussbaumer R, Bauer S, Benoit L, Mariethoz G, Liechti F, Schmid B. Quantifying year-round nocturnal bird migration with a fluid dynamics model (2021). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8220276/pdf/rsif.2021.0194.pdf>

Sherry, Thomas W.. Identifying migratory birds' population bottlenecks in time and space. doi = 10.1073/pnas.1802174115 (2018). <https://www.pnas.org/content/115/14/3515>

Emmanuel H. Lecture 7 - Numerical solution : Finite difference method. Process-based modeling in bioscience engineering course at *UCLouvain*.

7 Annexes

7.1 Graphes auxilliaires

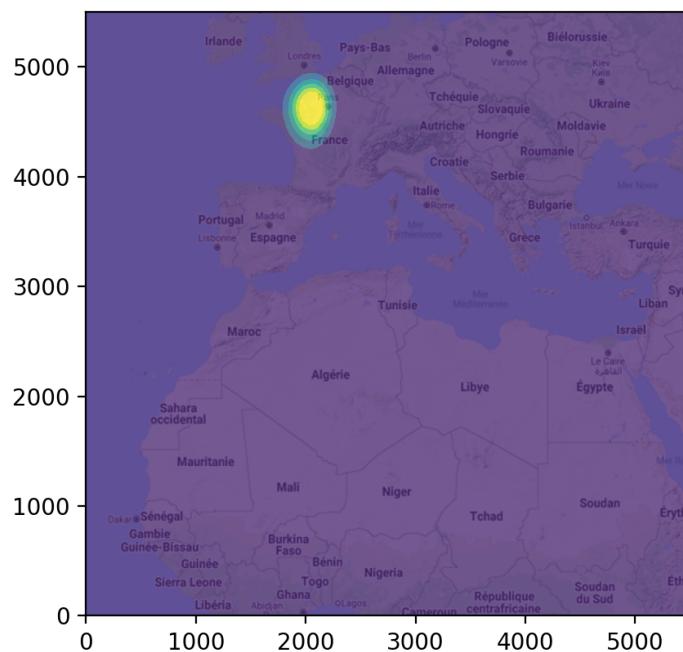


FIGURE 9 – Simulation avec l'échantillon de validation après 1 jour.

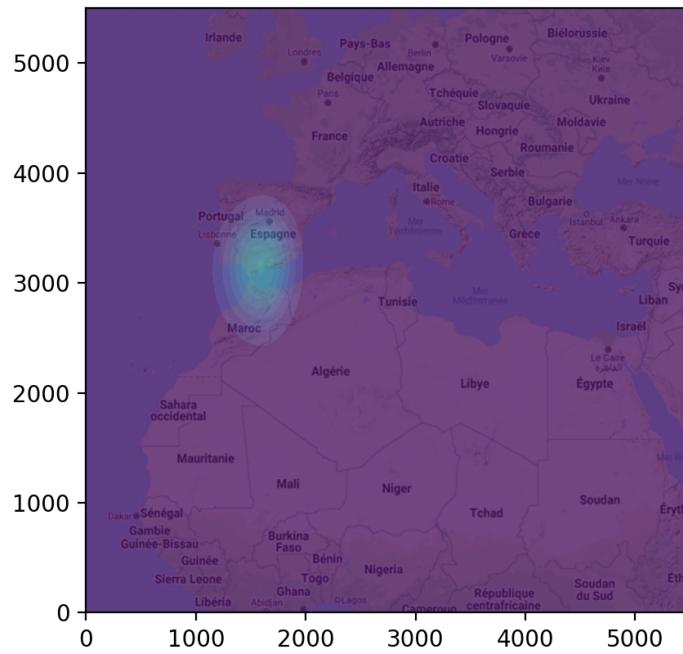


FIGURE 10 – Simulation avec l'échantillon de validation après 25 jour.

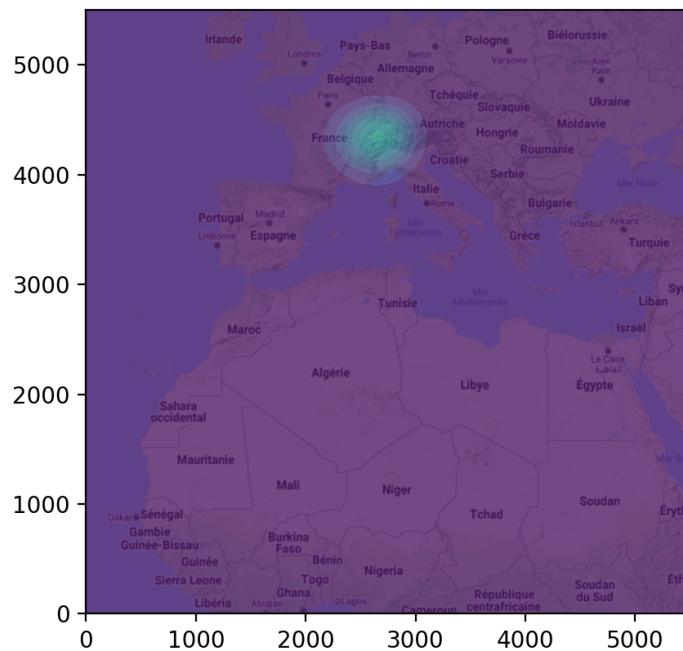


FIGURE 11 – Cigognes parties de Pologne après 10 jours de voyage

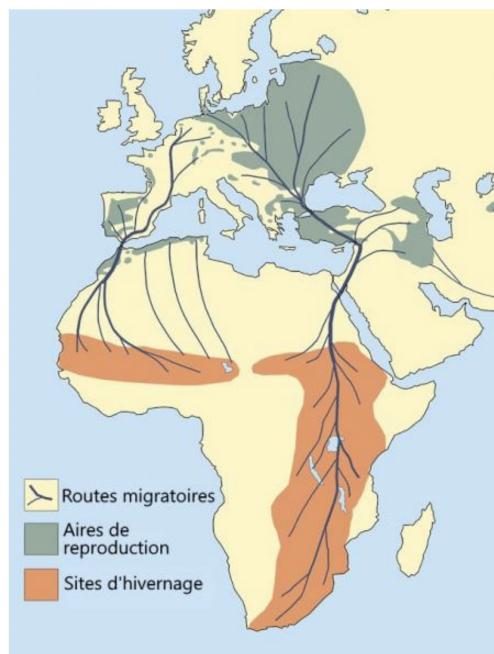


FIGURE 12 – Route migratoire des cigognes selon la littérature