

Risk4DRaptors

Prédire les zones à risque de collision des grands oiseaux avec les infrastructures aériennes

Arzhela HEMERY

04-12-2024

Beatriz ARROYO (Prof. IREC-CSIC) - Rapportrice

Blandine DOLIGEZ (DR CNRS LBBE) - Rapportrice

Arnaud BECHET (DR Tour du Valat) - Examineur

Alexandre MILLON (MC AMU IMBE) - Examineur

Directeur de thèse : **Aurélien BESNARD** (DE EPHE CEFE)

Co-directeurs de thèse : **Olivier DURIEZ** (MC UM CEFE)
& **Pierre-Yves HENRY** (Prof. MNHN MECADEV)

Partenaire : **Christian ITTY** (association BECOT)



École Pratique
des Hautes Études



- Contexte de changement climatique
 - Fort développement des énergies renouvelables
 - Dont les éoliennes



- Contexte de changement climatique
 - Fort développement des énergies renouvelables
 - Dont les éoliennes
 - Augmentation des réseaux de distribution d'électricité



→ Multiplication des infrastructures anthropiques dans le ciel

- Espace aérien = habitat pour les espèces qui s'y déplacent



Infrastructures aériennes → Obstacles
artificiels vs. sélection naturelle



- Impacts directs
 - Mortalités par électrocution, collision ou percussion
- Impacts indirects



- Impacts directs
 - Mortalités par électrocution, collision ou percussion
- Impacts indirects
 - Pertes d'habitats

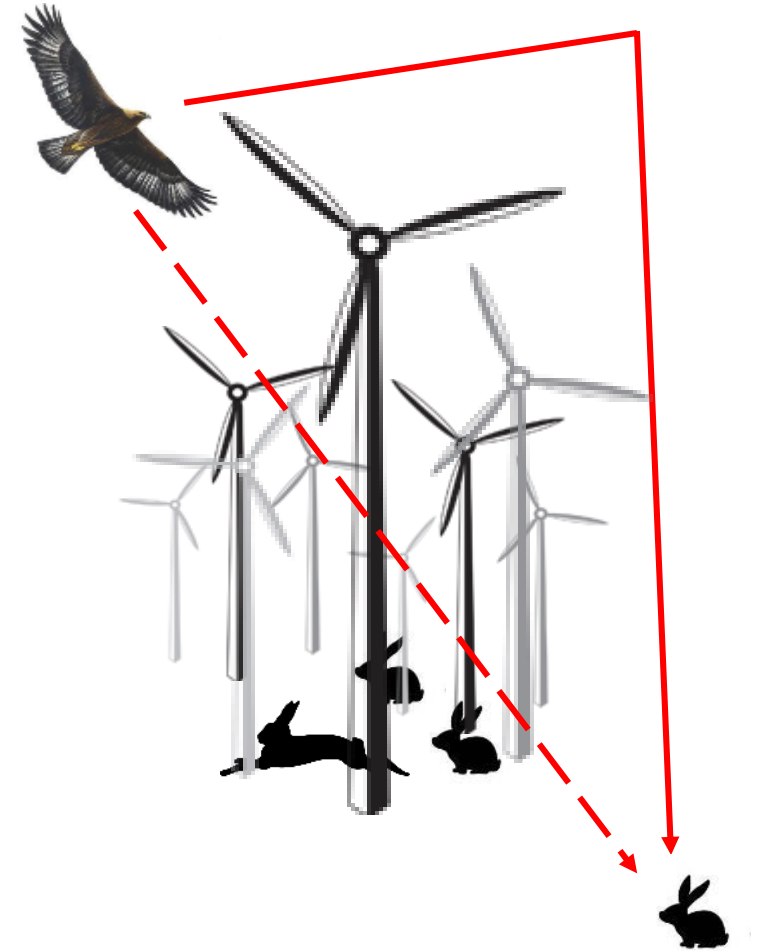


- Impacts directs

- Mortalités par électrocution, collision ou percussion

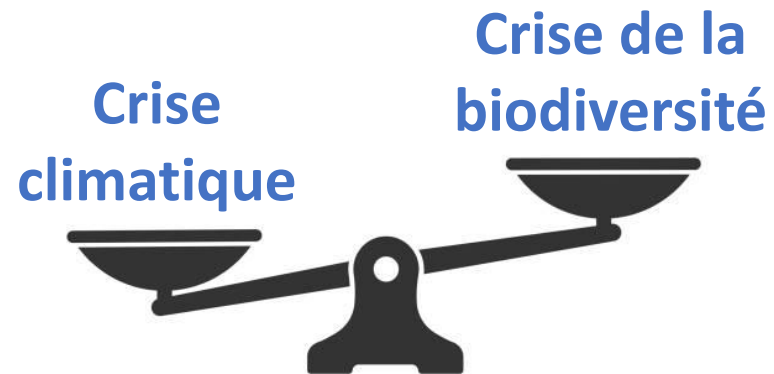
- Impacts indirects

- Pertes d'habitats
- Modifications des couloirs de circulation



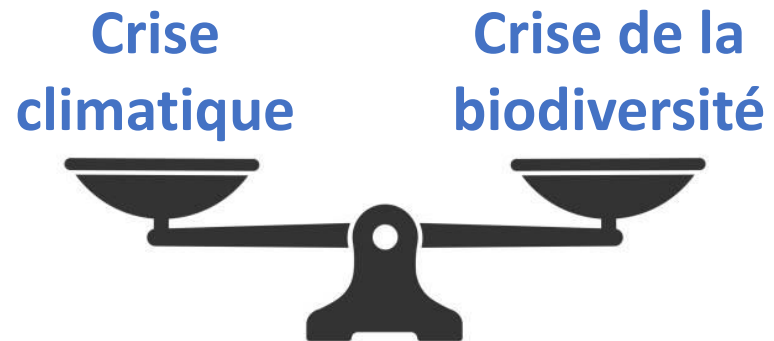
○ Impacts & pertes de biodiversité

→ Viabilité des populations ?



○ Impacts & pertes de biodiversité

→ Viabilité des populations ?



Introduction – Les rapaces

- Rapaces particulièrement impactés
 - Petites populations
 - Espèces longévives



Démographie sensible aux mortalités additionnelles

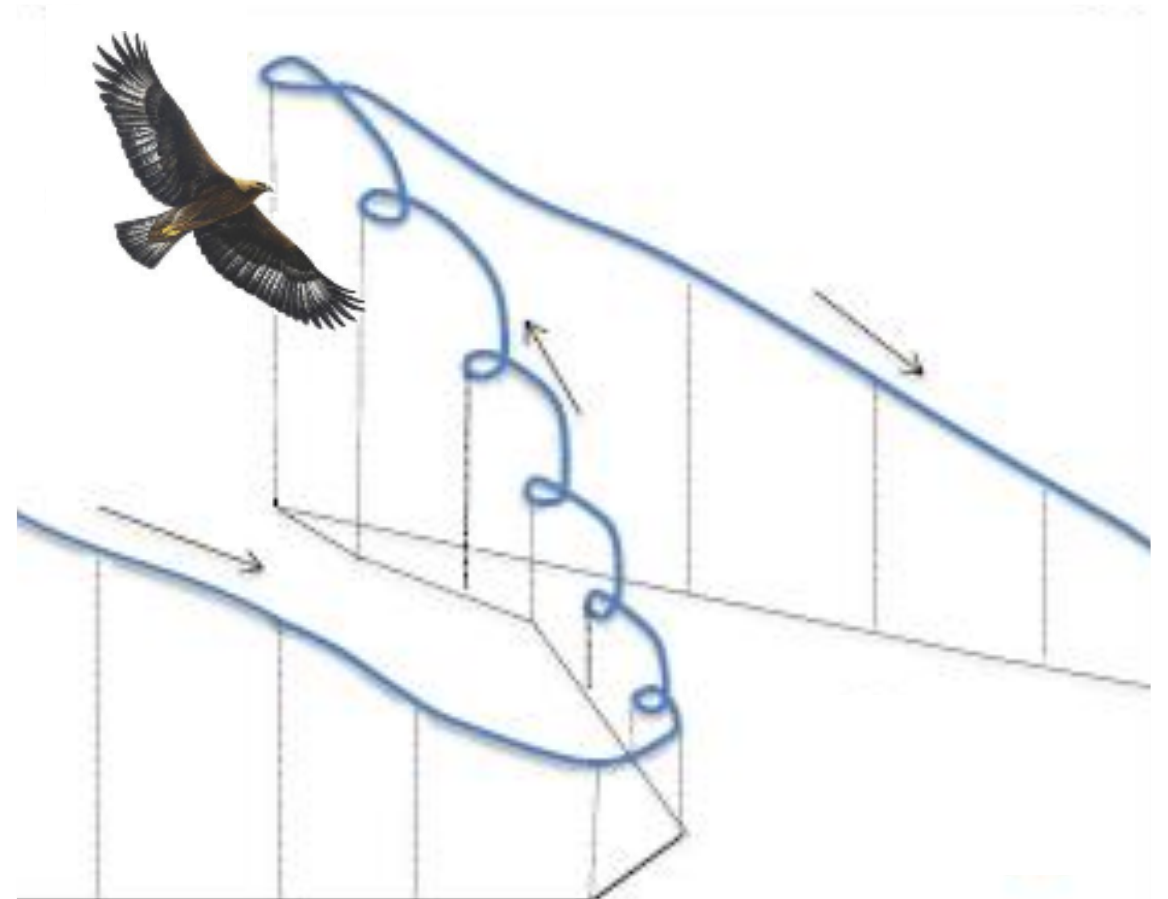


Déplacements des grands planeurs

- Vol plané = économie d'énergie
 - Comparé au vol battu
 - Longue distance ou altitude à moindre coût



Importance des courants aériens
pour les vols planés ascendants



Courants aériens

- Courants thermiques : ensoleillement + occupation du sol

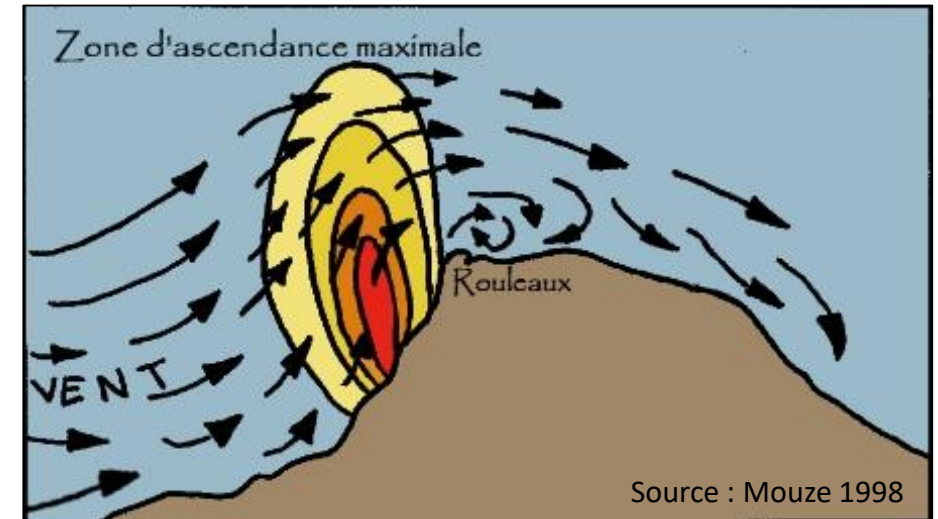


Source : www.nps.gov

Courants aériens

- Courants thermiques : ensoleillement + occupation du sol
- Courants orographiques : vent + relief
 - Ascendants : vent face à la pente
 - Descendants : vent contraire

Orographiques



Courants aériens

- Courants thermiques : ensoleillement + occupation du sol
- Courants orographiques : vent + relief
 - Ascendants : vent face à la pente
 - Descendants : vent contraire



Emplacements recherchés pour les énergies renouvelables

→ Conflit d'utilisation de l'espace aérien ?

Introduction – Les secteurs à risque

- Besoin de planification
 - Eviter de construire dans des secteurs à risque
 - « prédire le risque de collision » = mettre en évidence les secteurs à risque



Introduction – Les secteurs à risque

- Besoin de planification

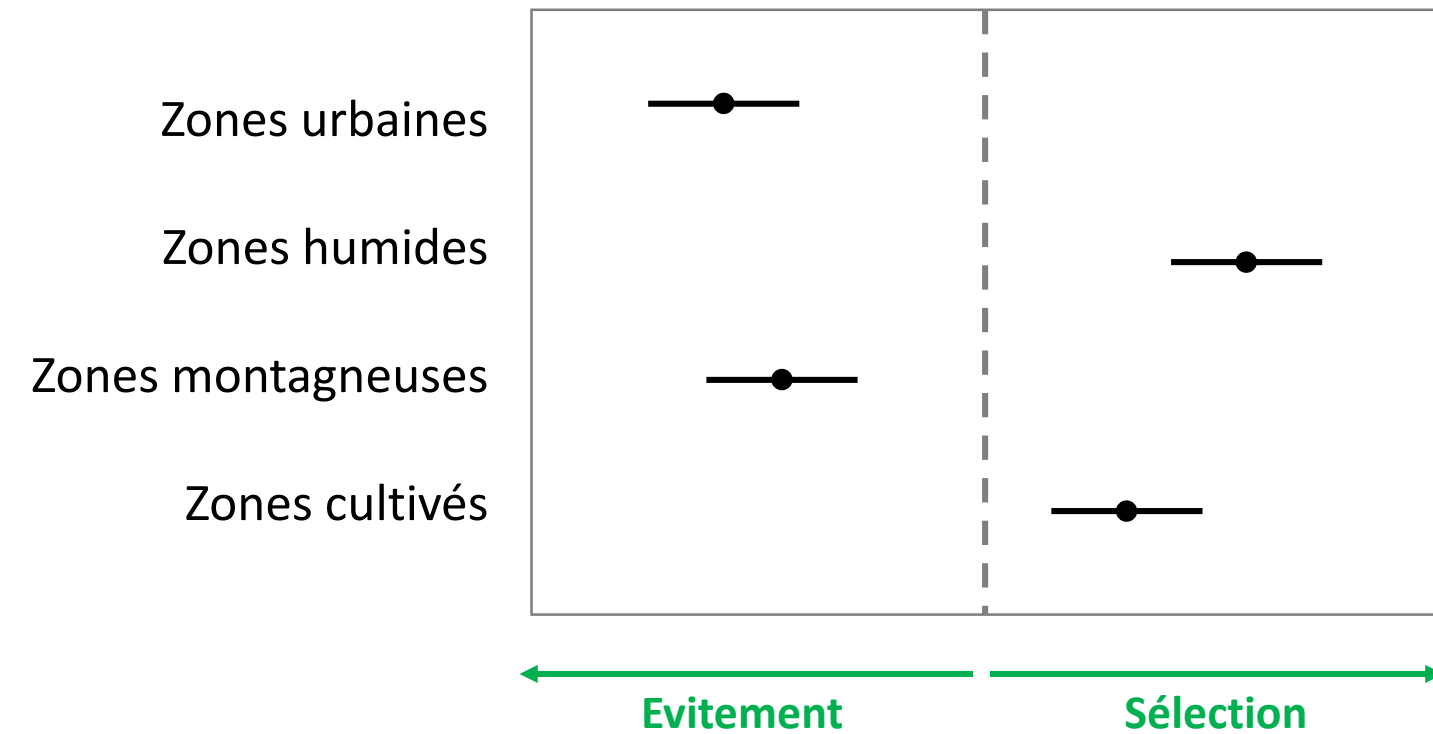
- Eviter de construire dans des secteurs à risque
- « prédire le risque de collision » = mettre en évidence les secteurs à risque



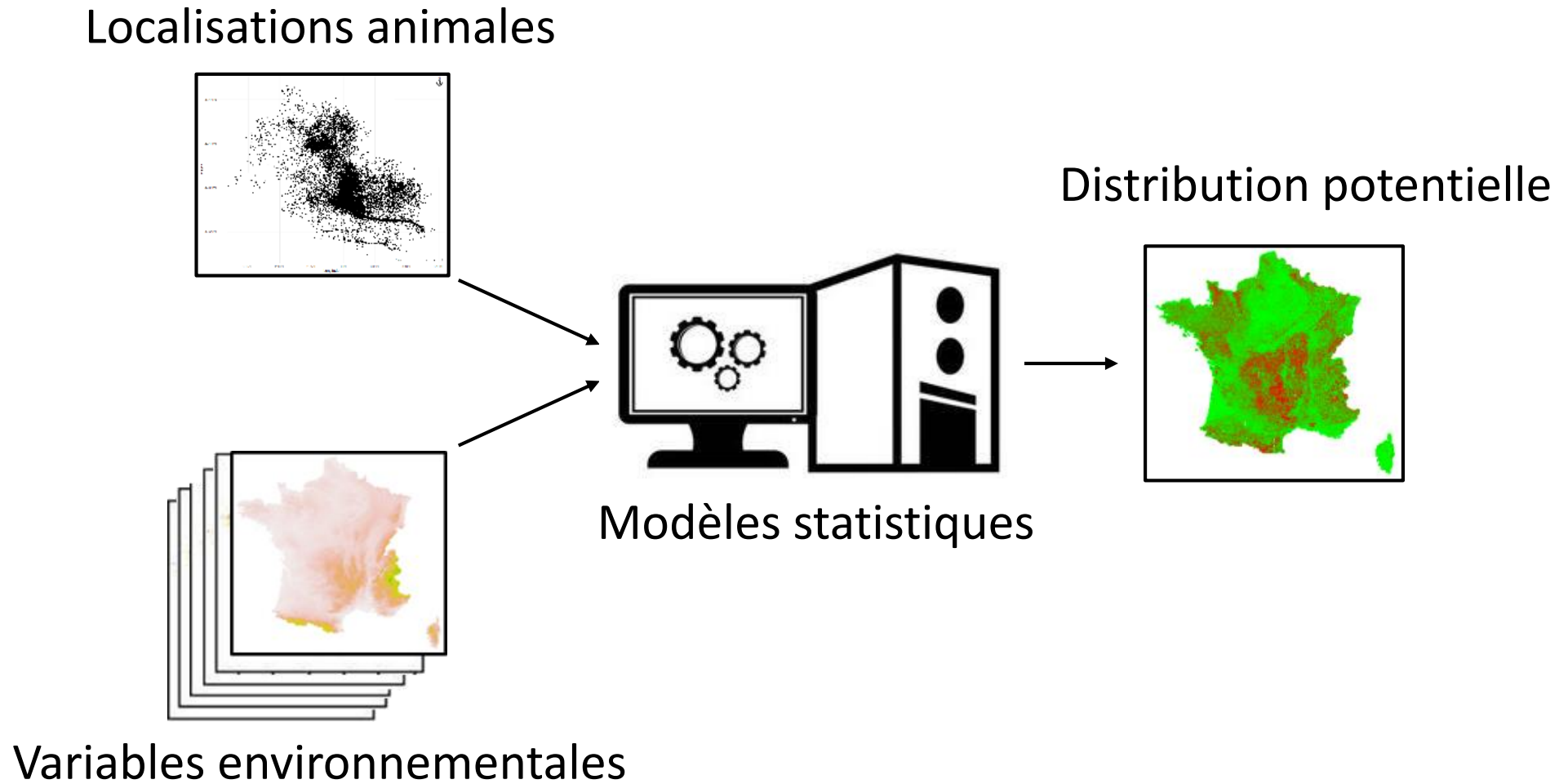
Comprendre comment les oiseaux utilisent
l'espace et les habitats

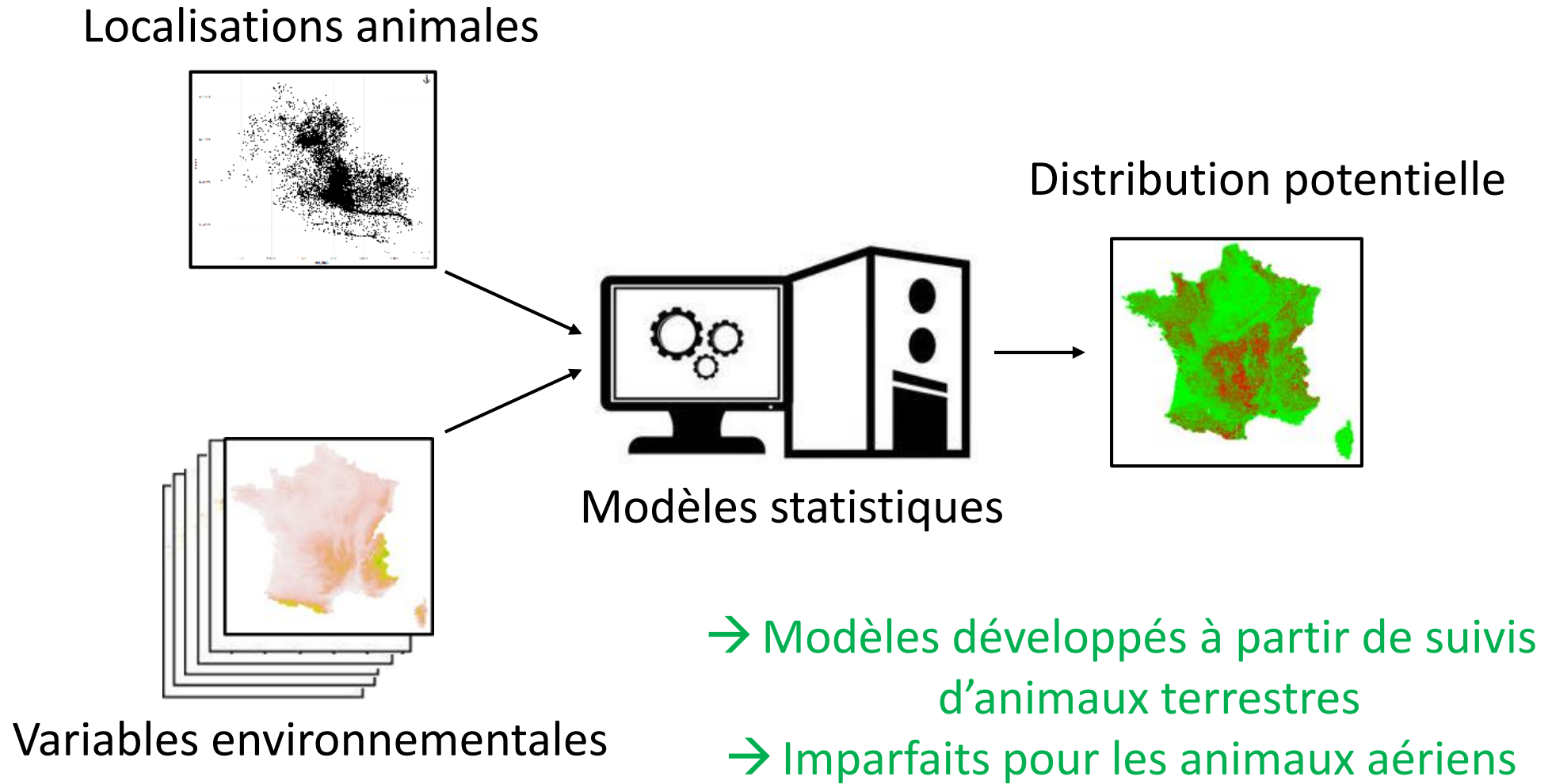


Introduction – La sélection d'habitats

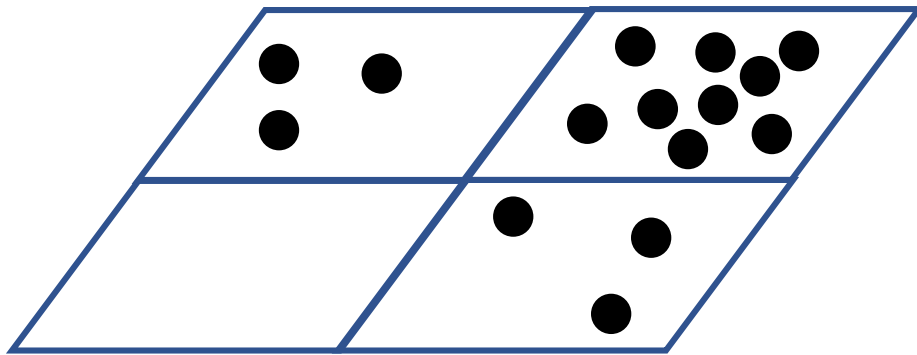


Grue cendrée



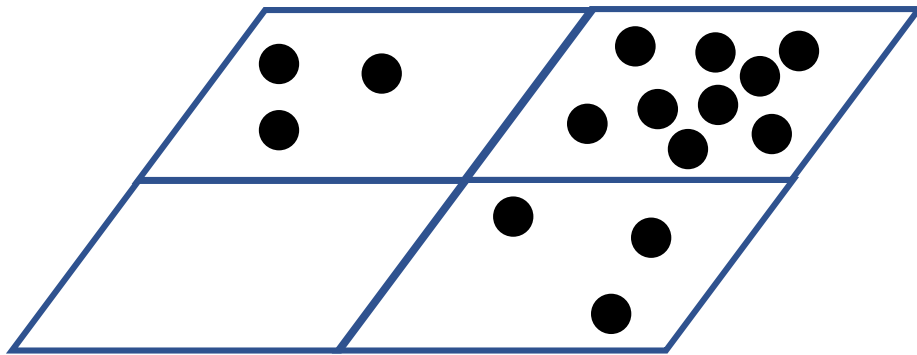


- Sélection d'habitats en 2D

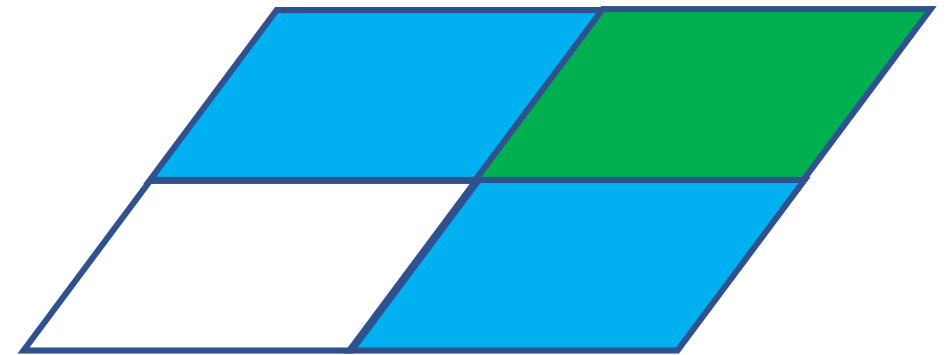


- Sélection d'habitats en 2D

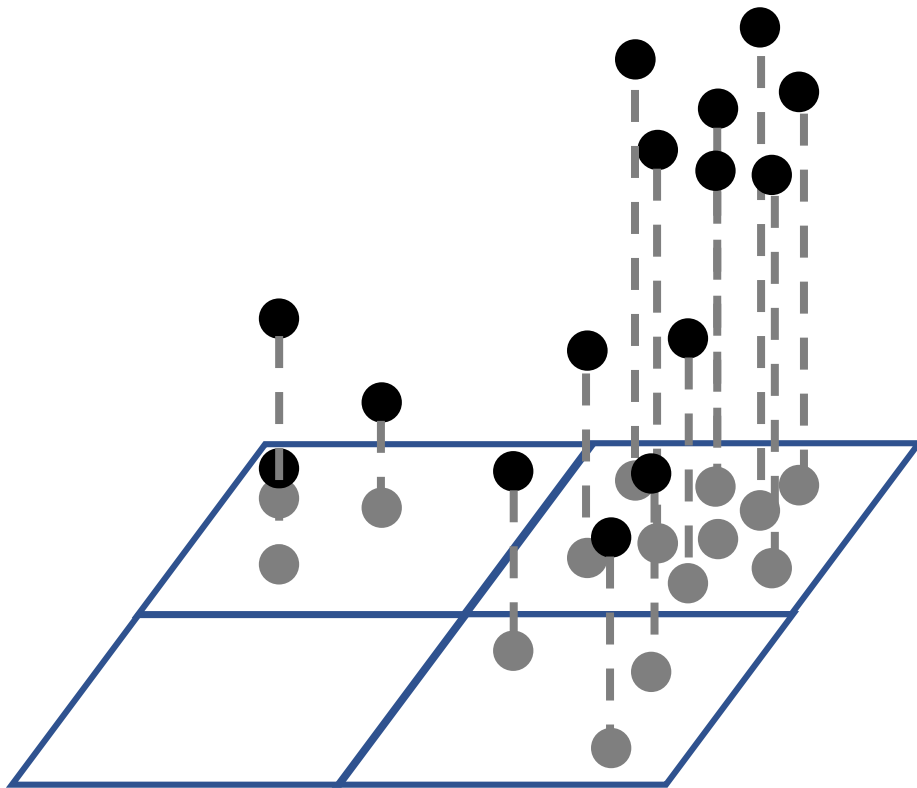
Sélection →



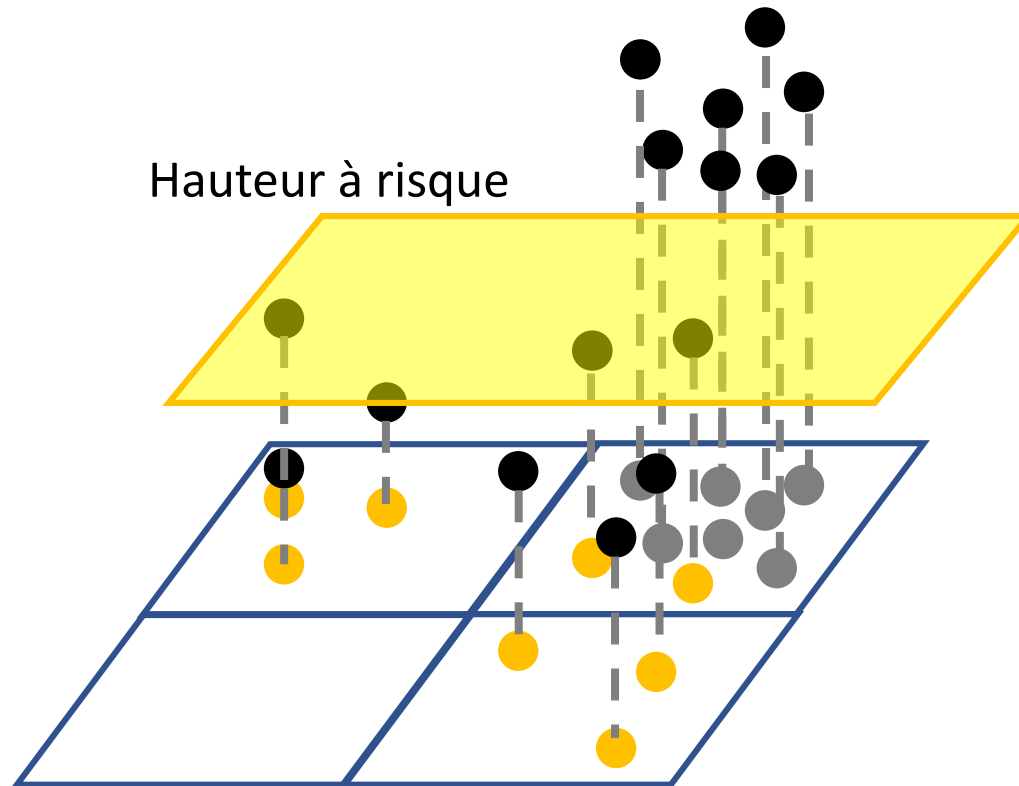
2D →



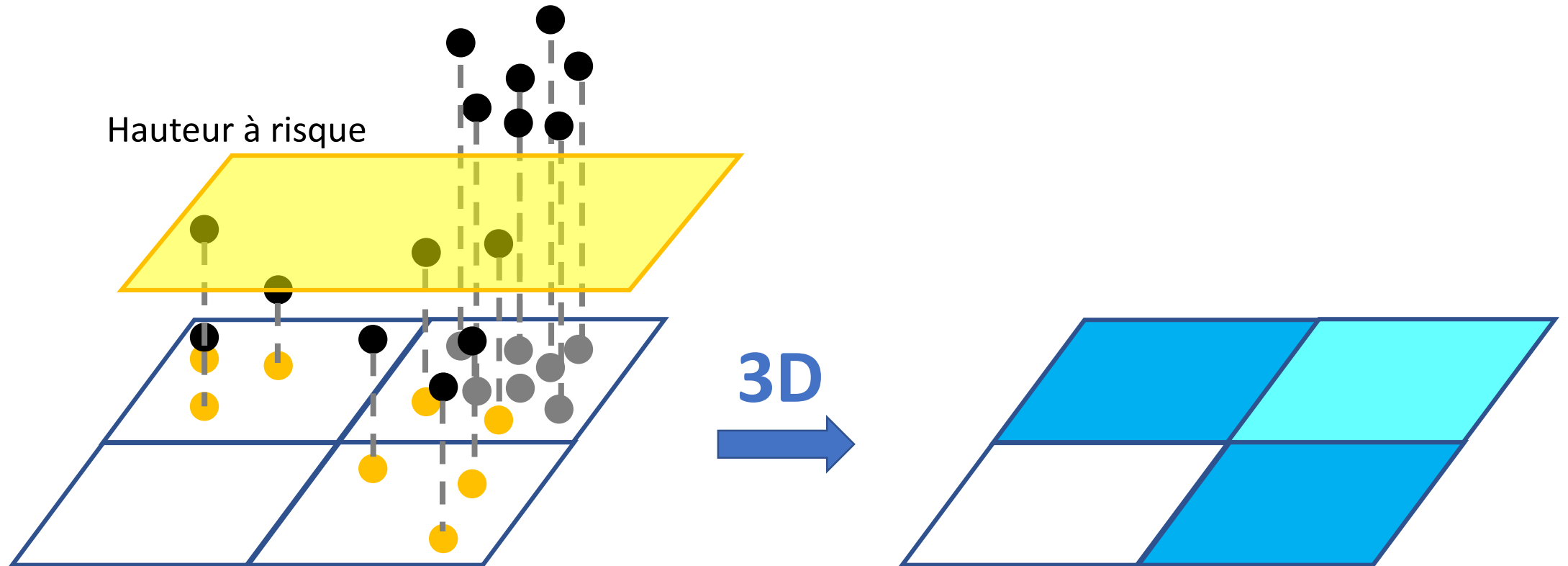
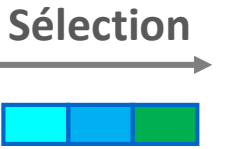
- Sélection d'habitats en 3D : en tenant compte de la hauteur de vol



- Sélection d'habitats en 3D : en tenant compte de la hauteur de vol

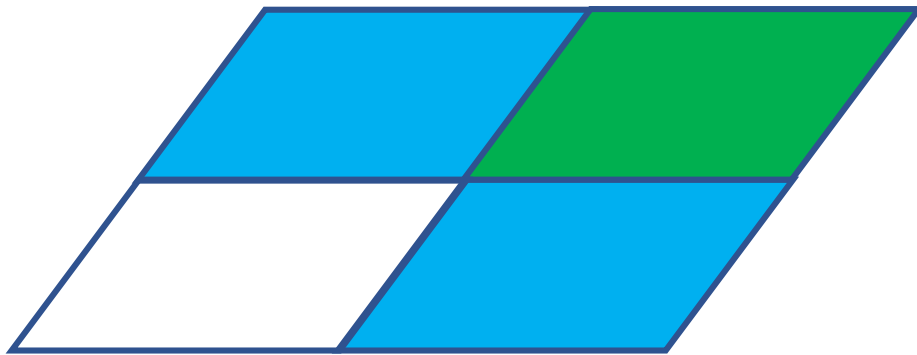


- Sélection d'habitats en 3D : en tenant compte de la hauteur de vol



- Sélection d'habitats en 2D vs. en 3D

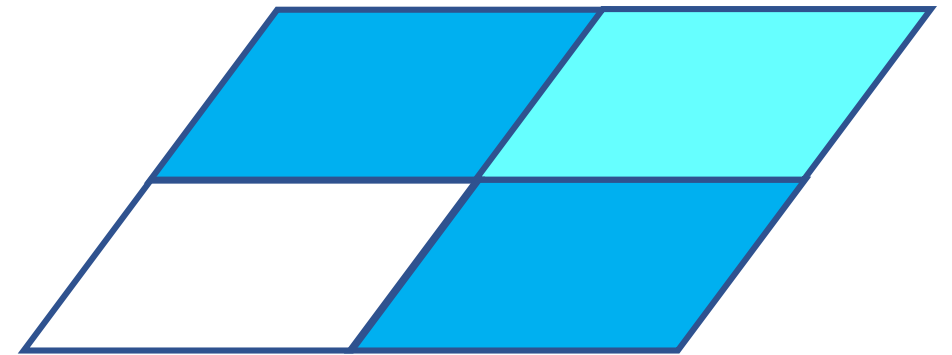
Sélection →



2D



Biais de sélection : sur ou sous-estimation



3D

Introduction – Exemple : les vautours du Cap et les éoliennes

- Méthode de sélection d'habitats
- Distribution < 300m de hauteur de vol
- Localisation des projets éoliens



Topographie

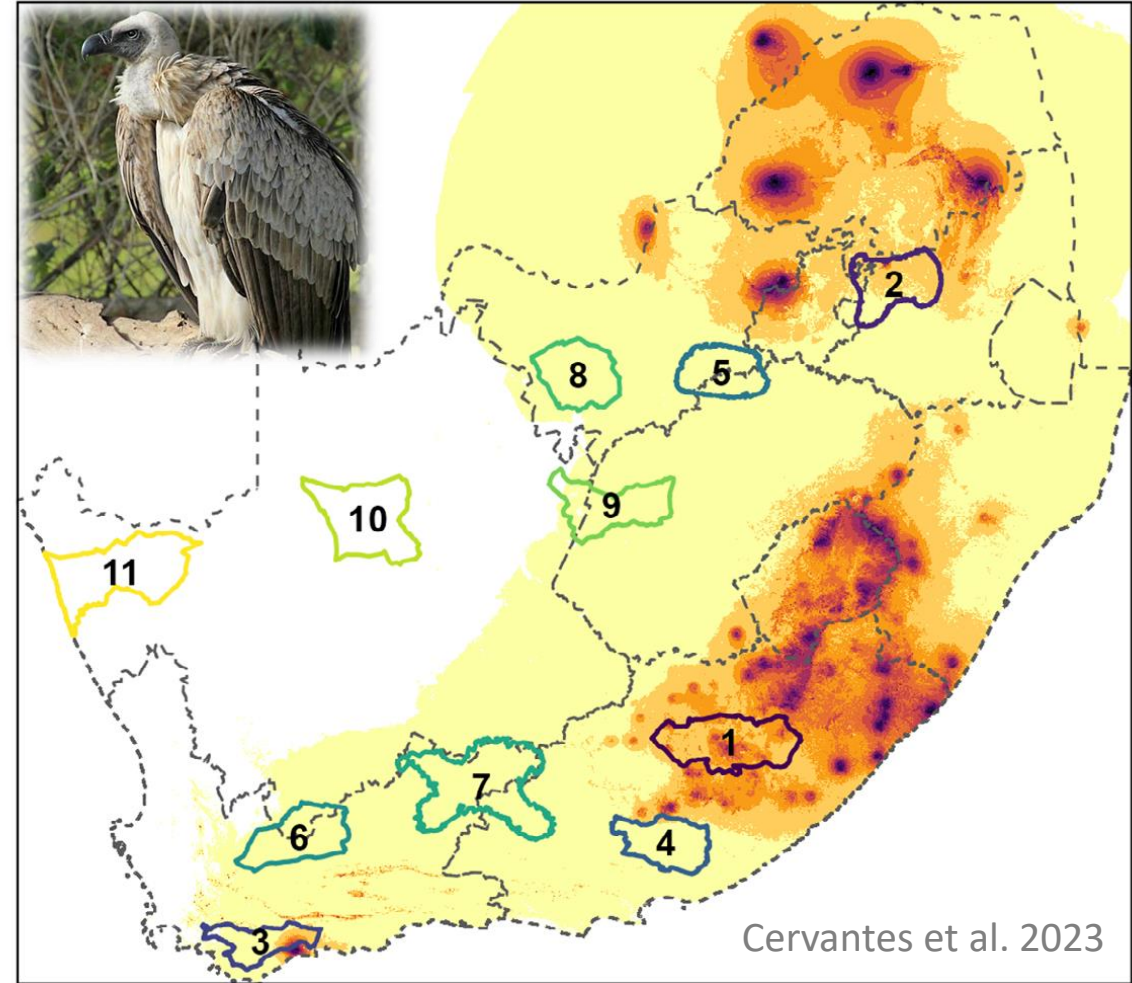


Occupation du sol



Courants aériens

→ « hauteur à risque » peut différer selon les infrastructures présentes



Cervantes et al. 2023

Prédire le risque de collision

- Données de suivis GPS : 9
- Méthodes de sélection d'habitats : 9
- Habitats terrestres + habitats aériens : 3
- Hauteur de vol avec seuil : 5
- **Hauteur de vol en continu (Ø seuil) : 0**

Prédire le risque de collision

- Données de suivis GPS : 9
- Méthodes de sélection d'habitats : 9
- Habitats terrestres + habitats aériens : 3
- Hauteur de vol avec seuil : 5
- **Hauteur de vol en continu (Ø seuil) : 0**



Absence de méthode de sélection d'habitats en 3D

Mettre en évidence les zones à risque de collision avec les infrastructures aériennes, en considérant :

Les déplacements en 3D

L'utilisation de l'espace aérien



Crédit : Felix Michaud

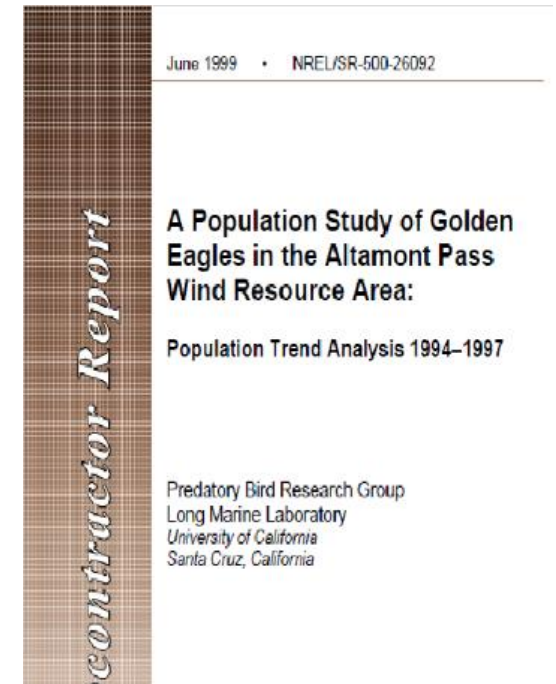


Crédit : Patrick Damiano

Introduction – L'aigle royal comme modèle d'étude

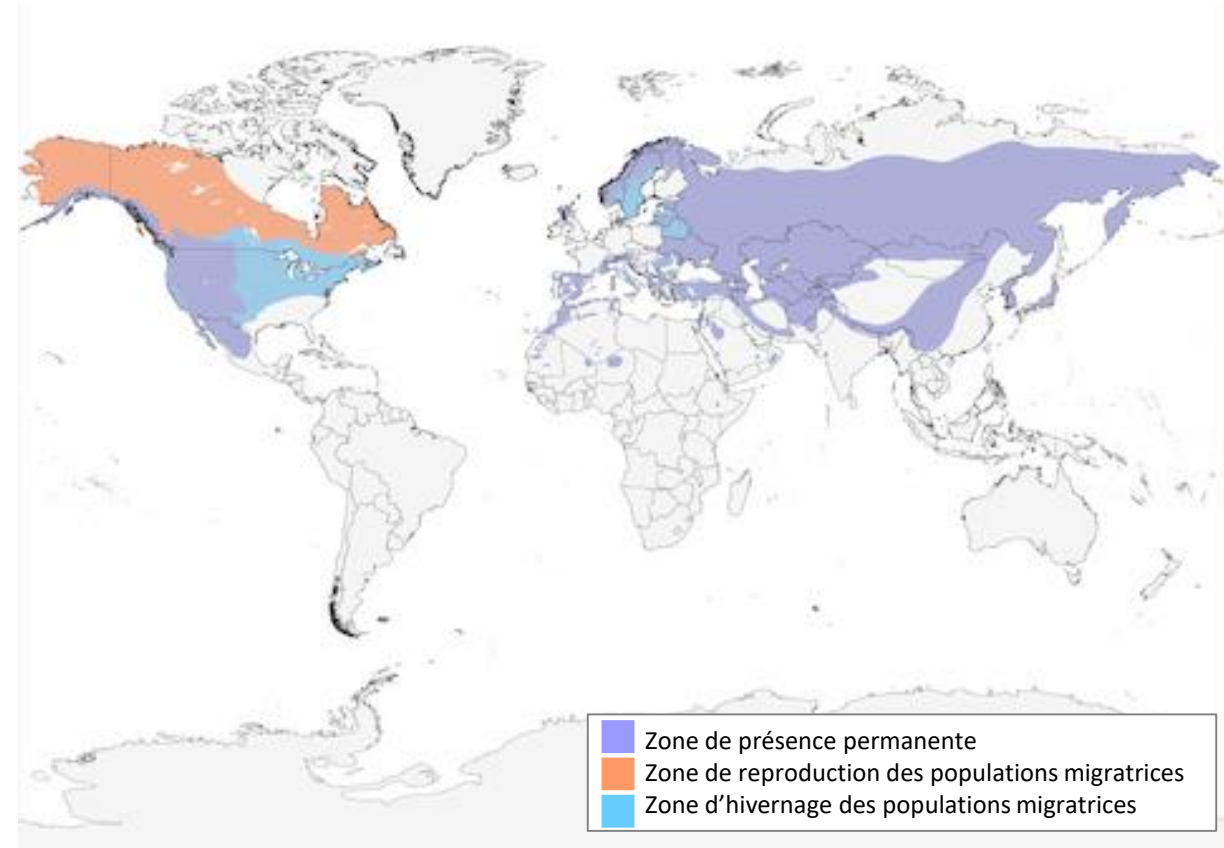
Exemple historique : Altamont Pass (USA)

- ~ 180 aigles royaux équipés dans les années 1990
- Fortes mortalités : 1/6 des aigles



Espèce sensible au risque de collision

- Plusieurs études sur les mortalités :
 - Ecosse
 - Scandinavie
 - Amérique du Nord
 - Espagne
- En France : « vulnérable » sur liste rouge IUCN



Cycle de vie

1A

- **Juvéniles en apprentissages** : de l'envol au départ du territoire de naissance

2A

·

·

·

5A

- **Jeunes en erratisme** : du départ du territoire de naissance jusqu'au cantonnement sur un territoire de reproduction

6A

·

·

·

25A

- **Adultes cantonnés et sédentaire** : sur le territoire de reproduction

→ Comportements spatiaux différents ?



Crédit : Silvia Alberti

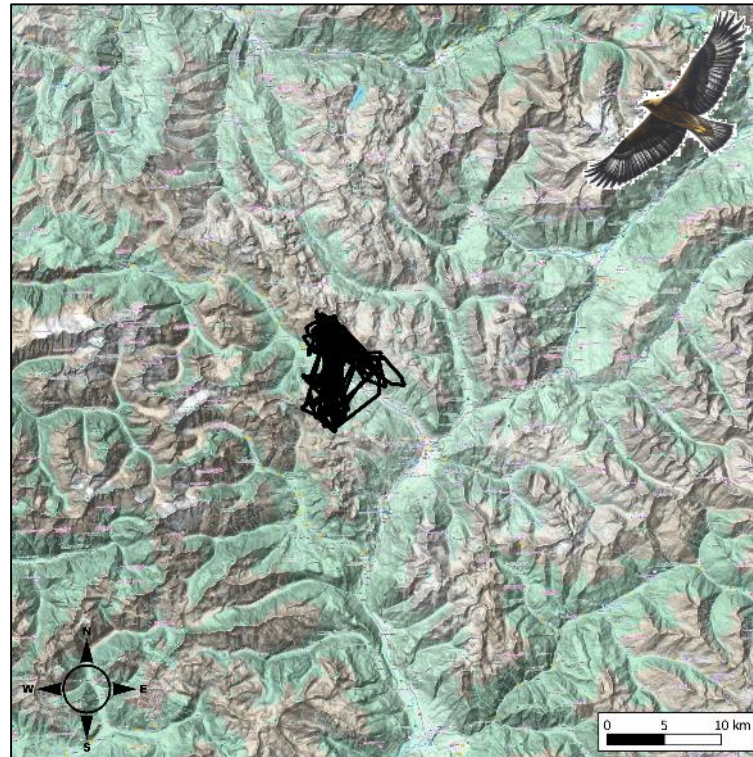


Crédit : Franck Della Vedova

Comportements spatiaux & stade du cycle de vie

Adulte cantonné

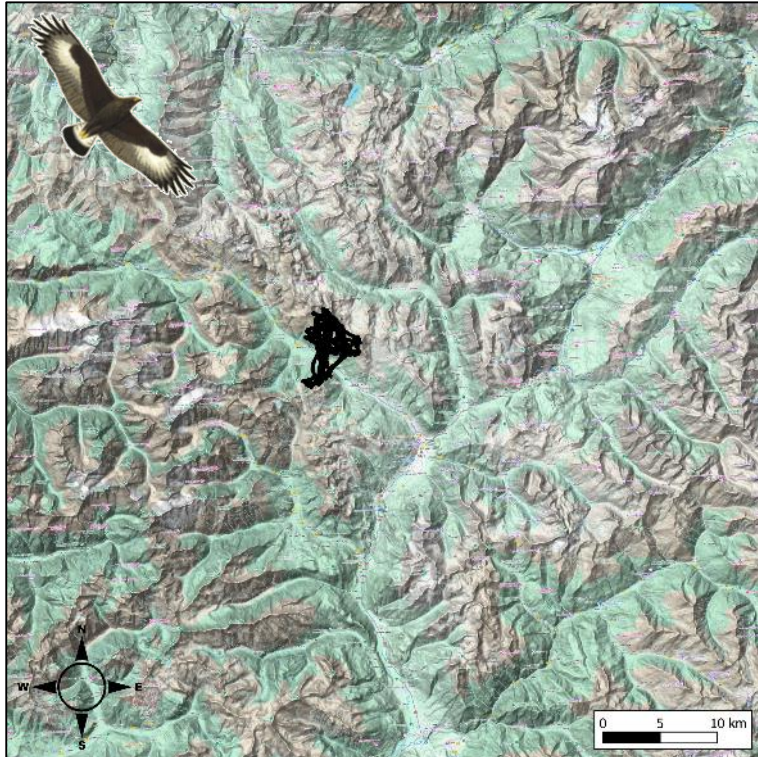
(durée 9 jours, même territoire)



Comportements spatiaux & stade du cycle de vie

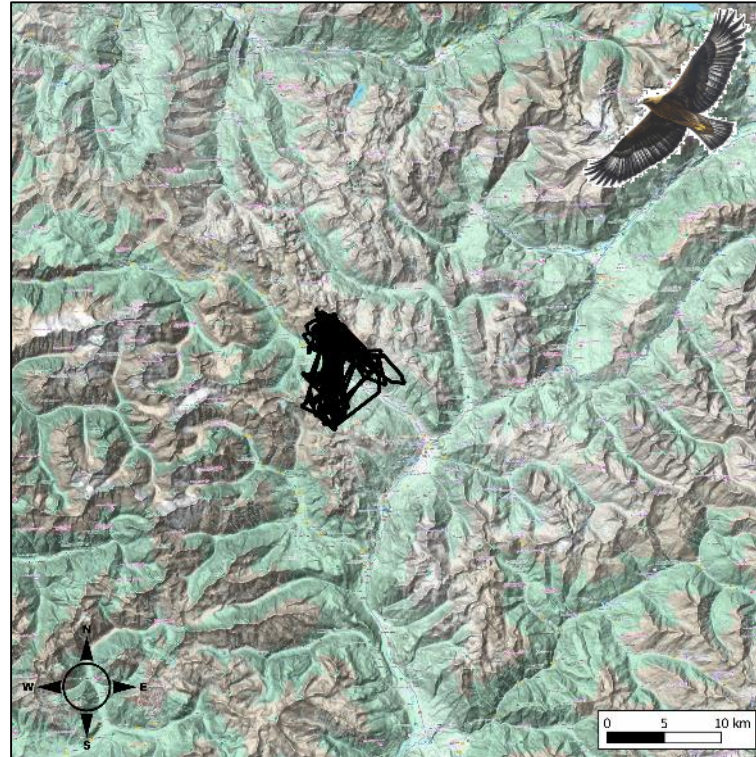
Juvénile en apprentissages

(durée 9 jours, 35 jours post envol)



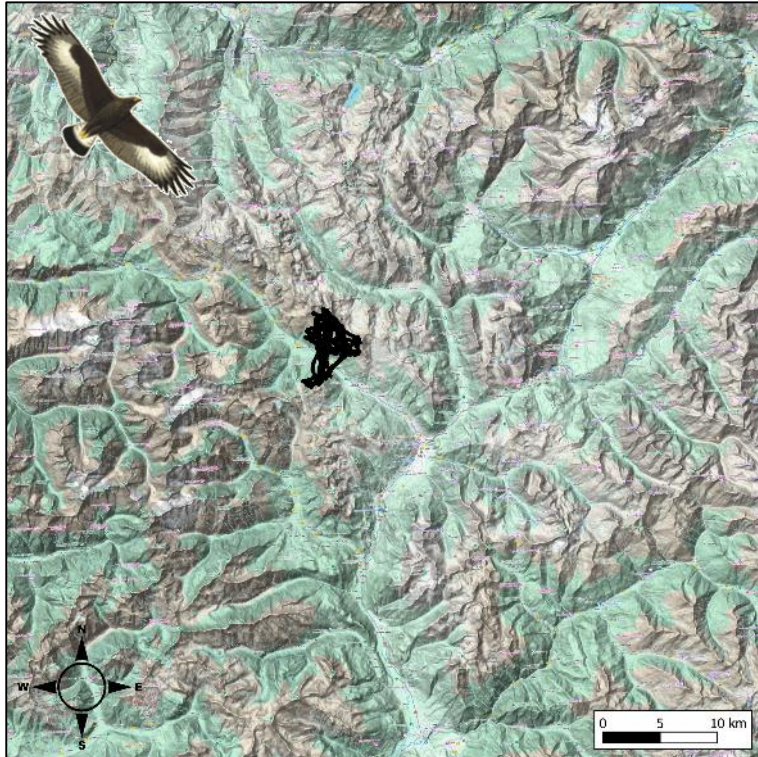
Adulte cantonné

(durée 9 jours, même territoire)

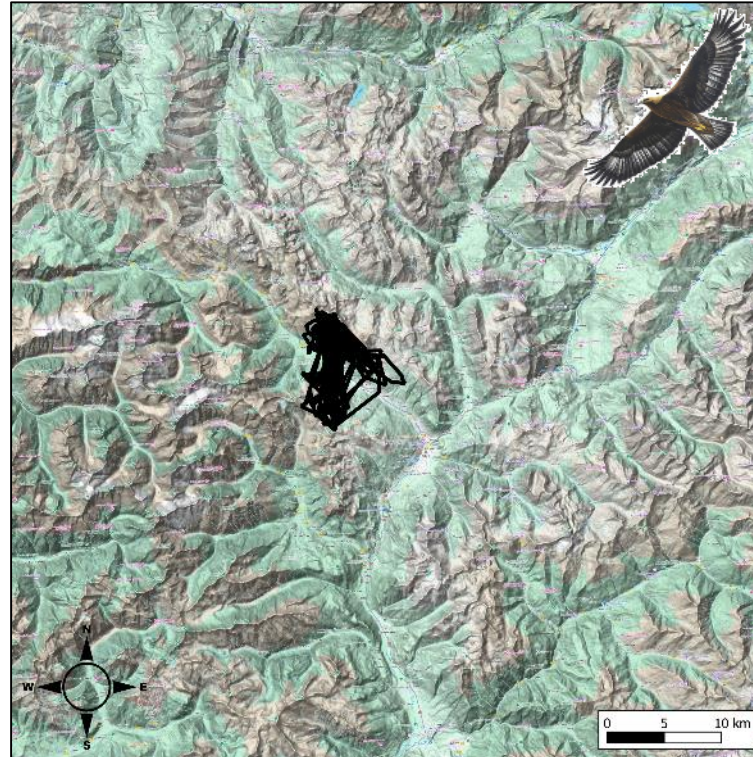


Comportements spatiaux & stade du cycle de vie

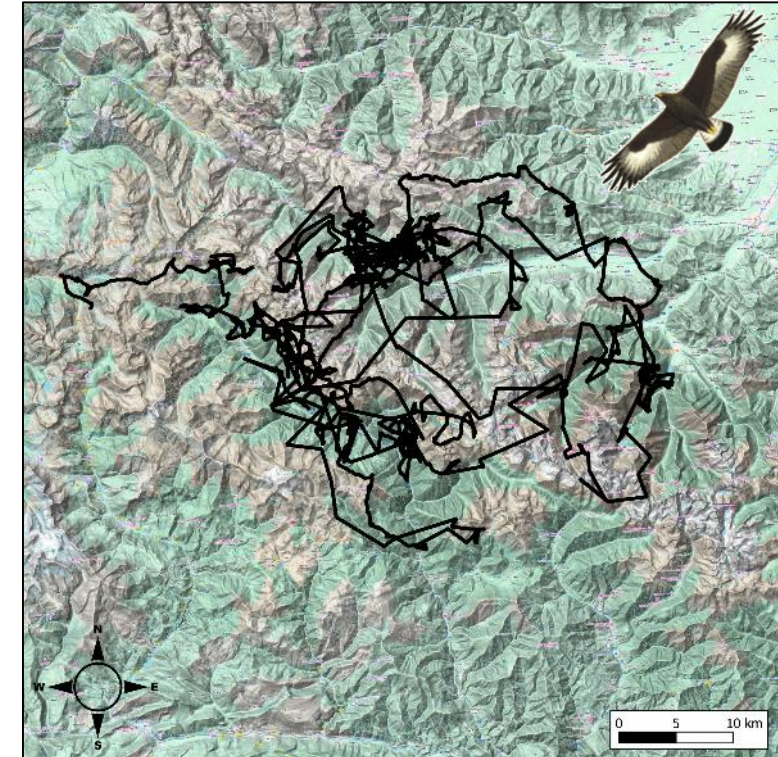
Juvénile en apprentissages
(durée 9 jours, 35 jours post envol)



Adulte cantonné
(durée 9 jours, même territoire)



Jeune parti en erratisme
(durée 30 jours)



Juvénile en apprentissages

Adulte cantonné

~~Jeune parti en erratisme~~

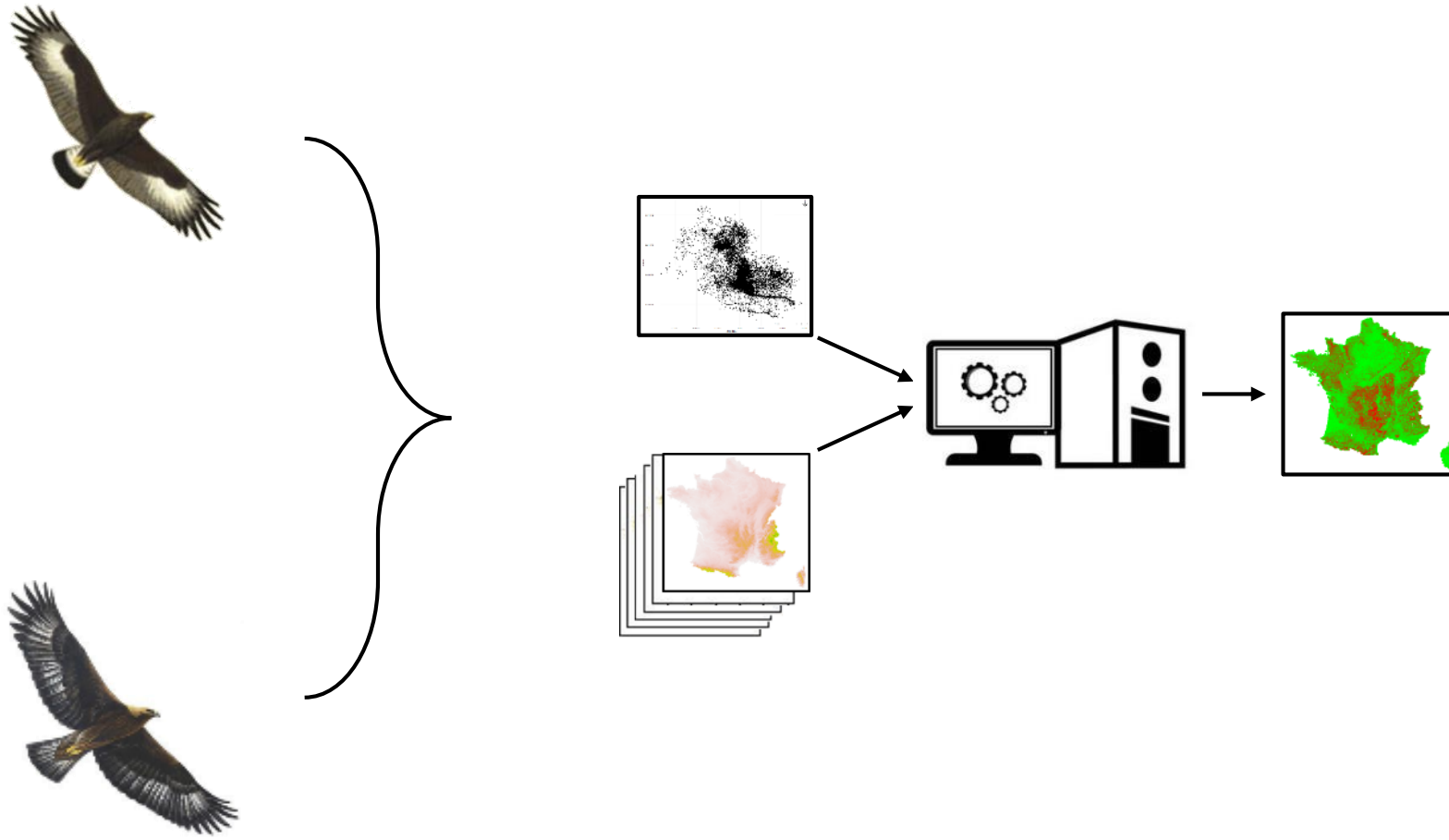


Individus territoriaux

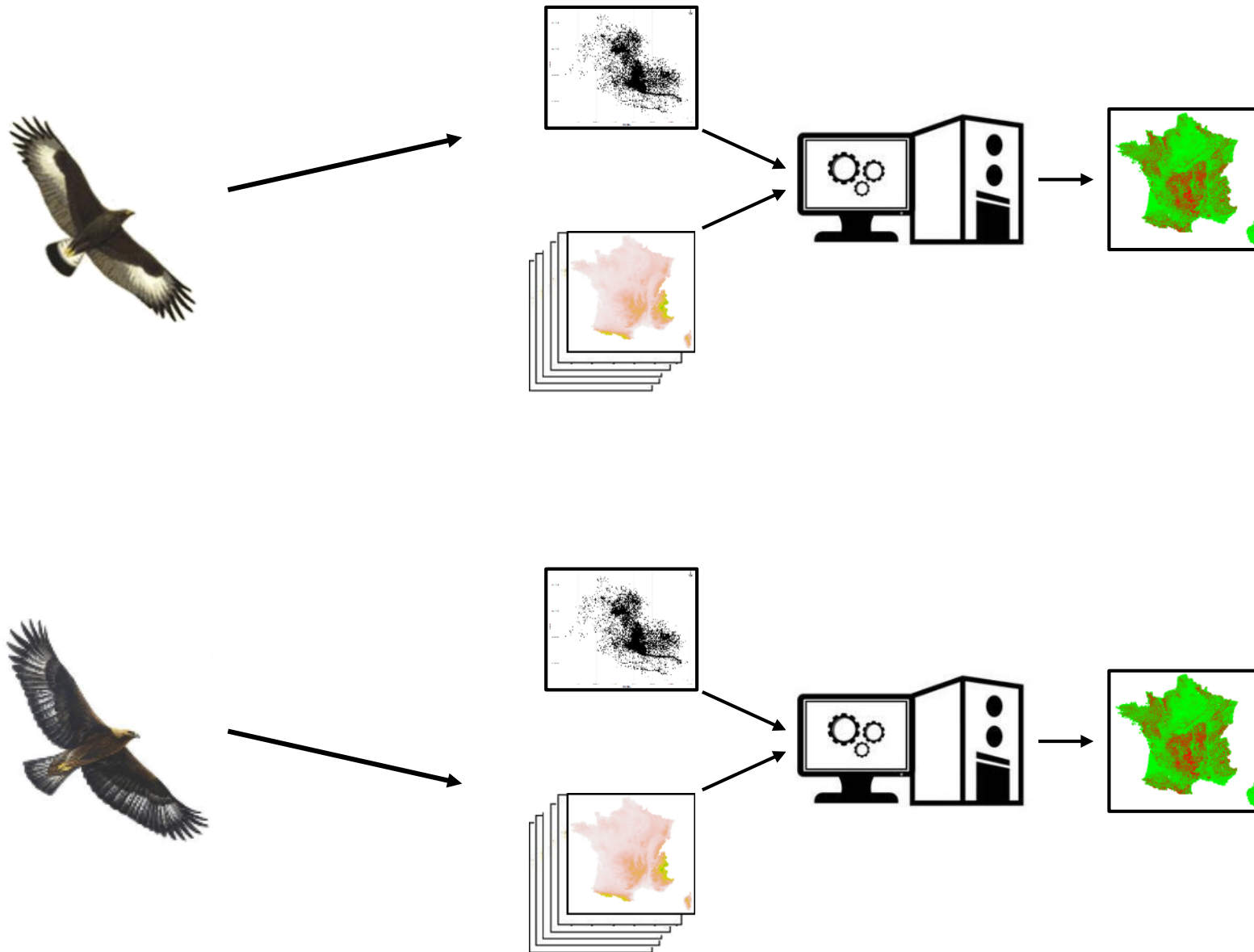


→ Exposition au risque peut-être
différente selon la classe d'âge ?

Introduction – Démarche



Introduction – Démarche



Première partie

Comment les juvéniles utilisent-il l'espace pendant leur période d'apprentissages ?

- Chapitre 1 : l'ontogénie des performances de vol des jeunes aigles royaux
- Chapitre 2 : l'utilisation du domaine vital des parents par les jeunes aigles royaux

Première partie

Comment les juvéniles utilisent-il l'espace pendant leur période d'apprentissages ?

- Chapitre 1 : l'ontogénie des performances de vol des jeunes aigles royaux
- Chapitre 2 : l'utilisation du domaine vital des parents par les jeunes aigles royaux

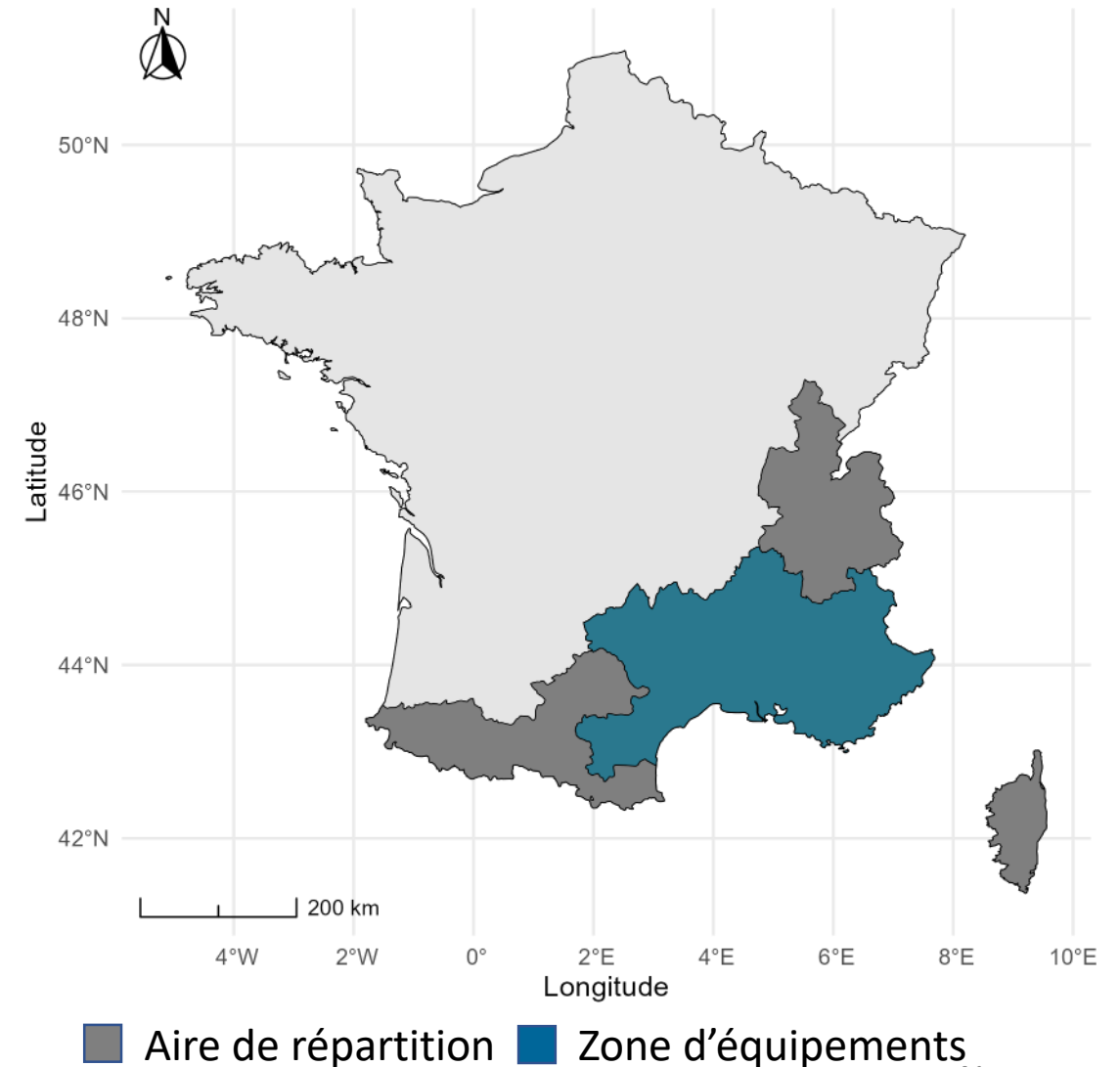
Deuxième partie

Quels sont les habitats sélectionnés par les aigles royaux, en fonction de leur hauteur de vol ?

- Chapitre 3 : la sélection d'habitats en 3D chez l'aigle royal

Modèle d'étude – Equipements GPS

- Programme de marquage depuis 2012 porté par Christian Itty
- Implication personnelle depuis 2017
- ~ 200 individus différents équipés
- Dont ~ 60 personnellement



Modèle d'étude – Equipements GPS

- 2 méthodes de captures pour 2 classes d'âges différentes :
 - Au nid pour les juvéniles



Crédit : Cyril Coursier - PNE



Crédit : Cyril Coursier - PNE

- 2 méthodes de captures pour 2 classes d'âges différentes :
 - Au nid pour les juvéniles
 - Au piège pour les individus volants



Méthode plus chronophage
& plus aléatoire

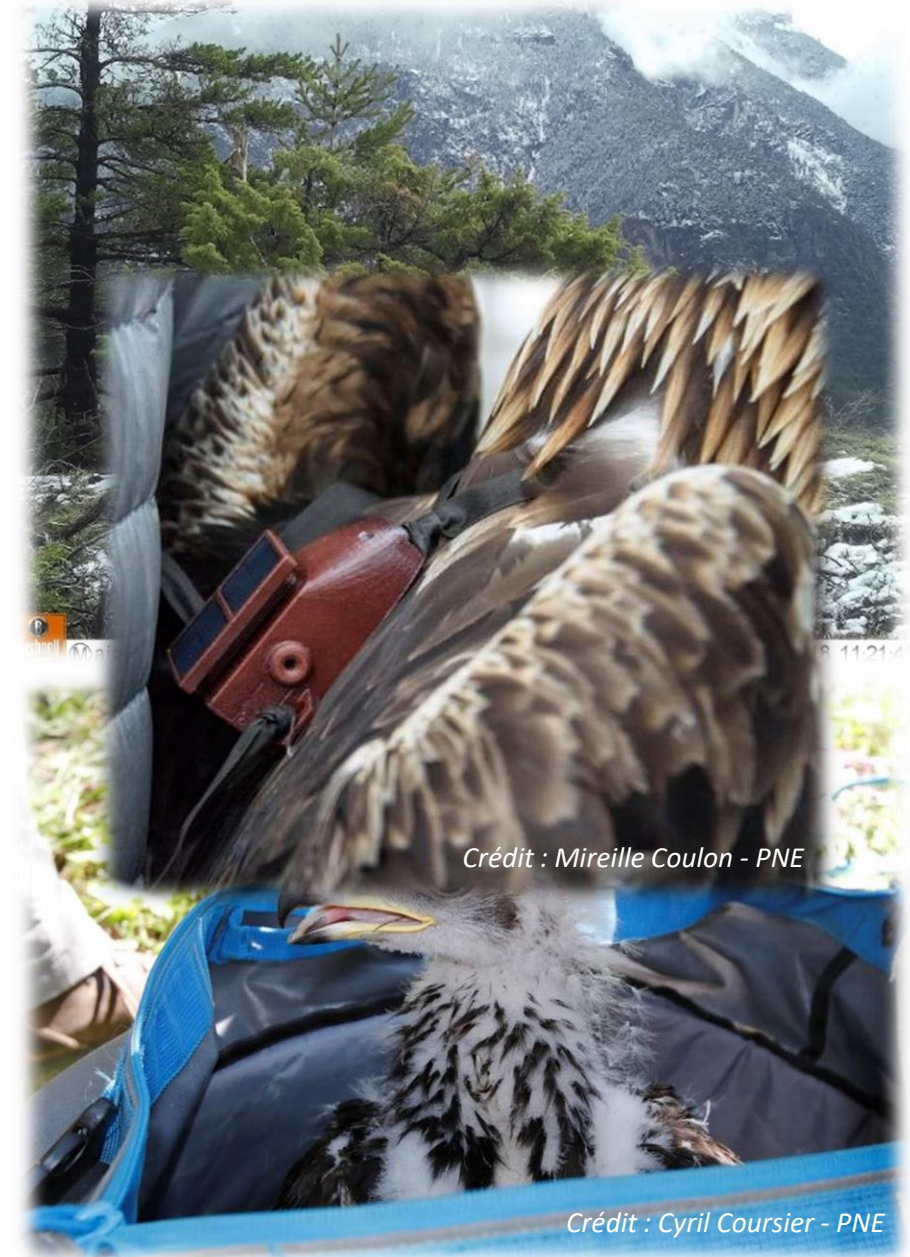


- 2 méthodes de captures pour 2 classes d'âges différentes :
 - Au nid pour les juvéniles : **151**
 - Au piège pour les individus volants : **51**



Déséquilibre entre classes d'âges

→ Certains territoires avec seulement des juvéniles équipés



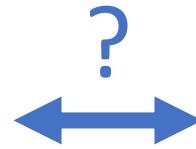
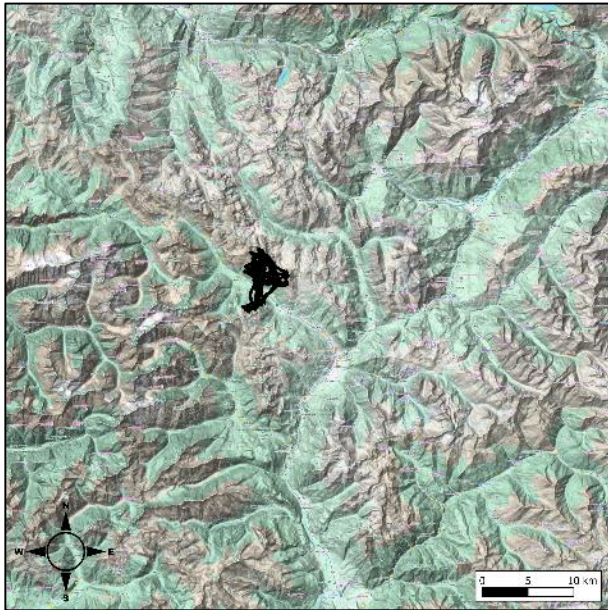
Comment les juvéniles utilisent-ils l'espace pendant leur période d'apprentissages ?



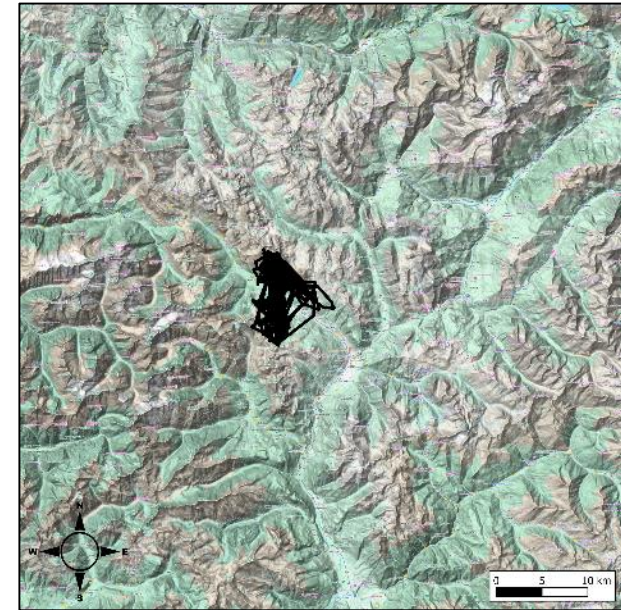
Crédit : Yann Serreau



Juvénile en apprentissages



Adulte cantonné



→ Est-ce que les juvéniles sont des bons « proxies » des adultes ?

- Caractérisation du vol des juvéniles
 - Etude des performances de vol
 - Chronologie entre envol et départ du territoire de naissance



- Caractérisation du vol des juvéniles

- Etude des performances de vol
- Chronologie entre envol et départ du territoire de naissance

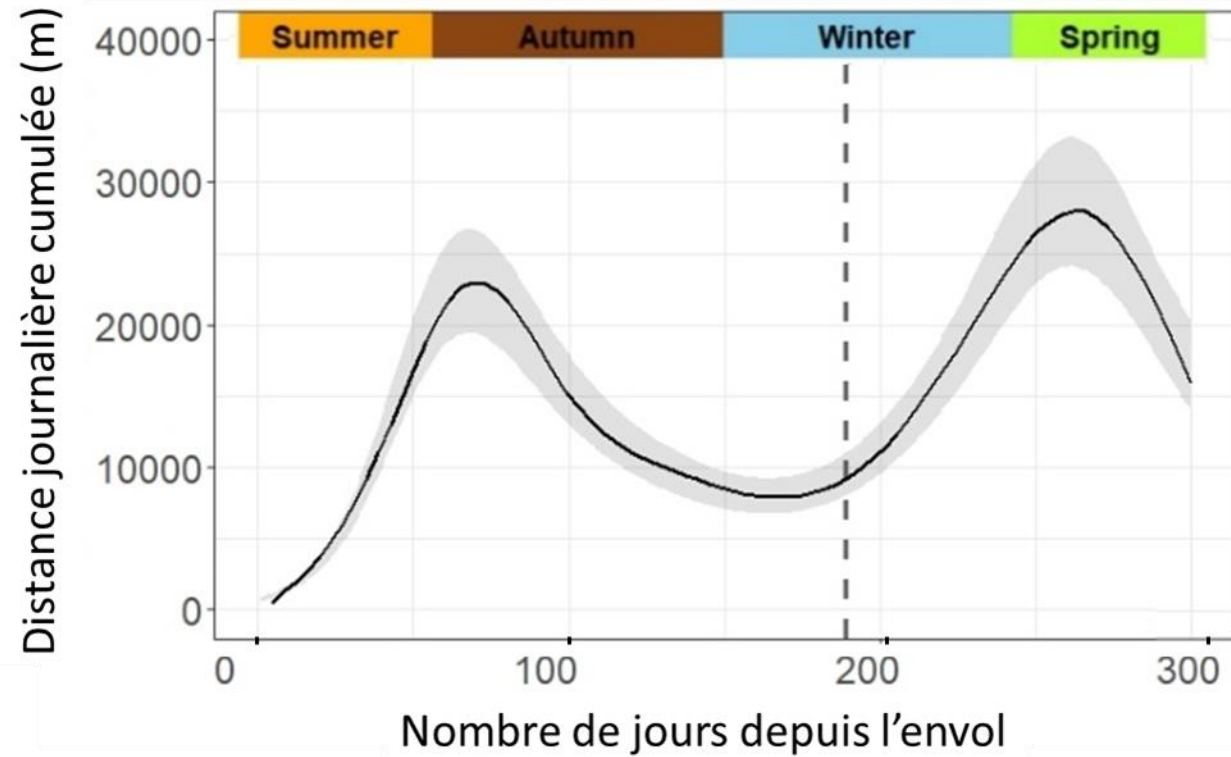


- Utilisation de l'espace

- Comparaison entre binômes « juvénile – adulte »
- Similarité des domaines vitaux et des habitats utilisés ?



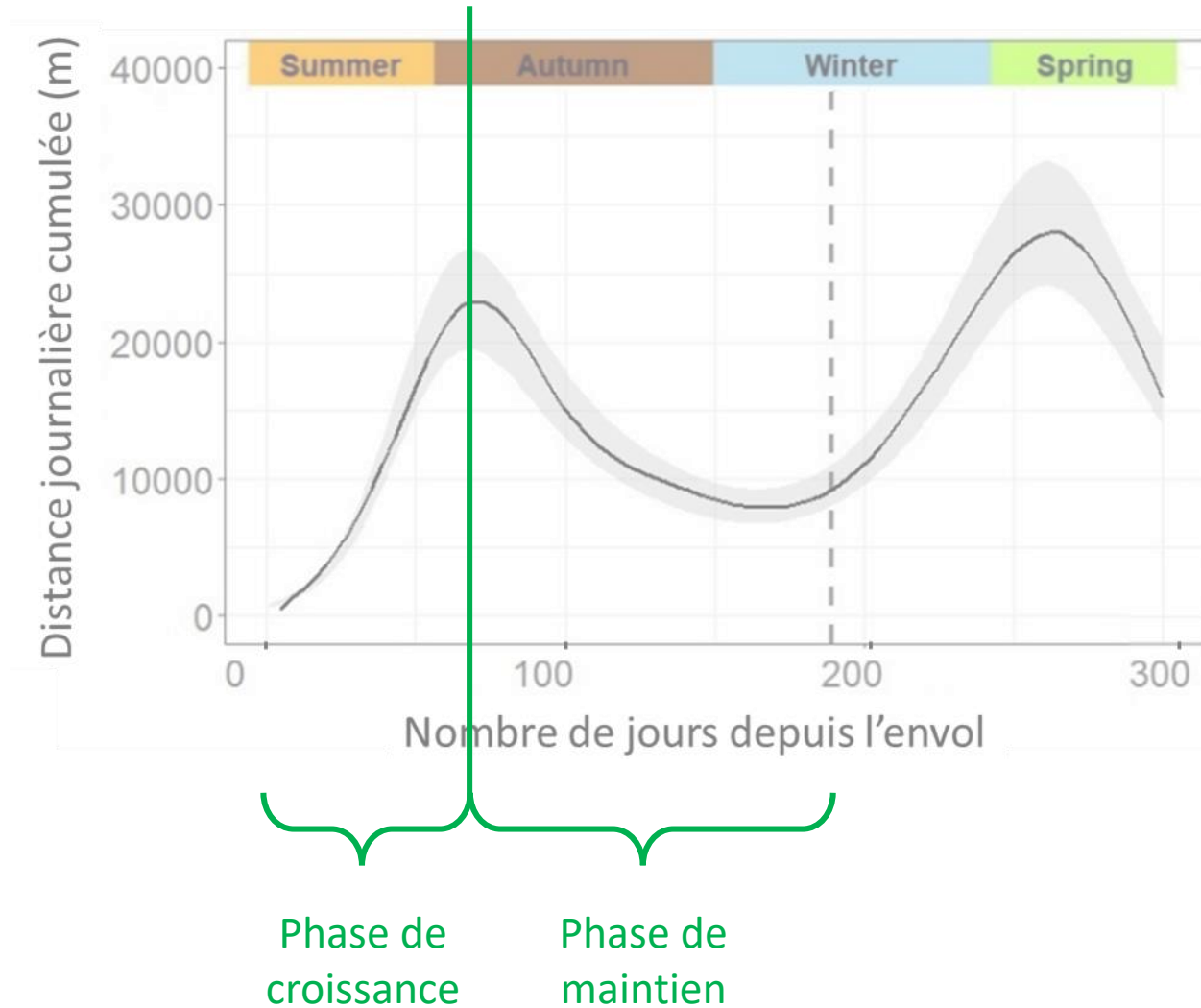
Partie I – Caractérisation du vol



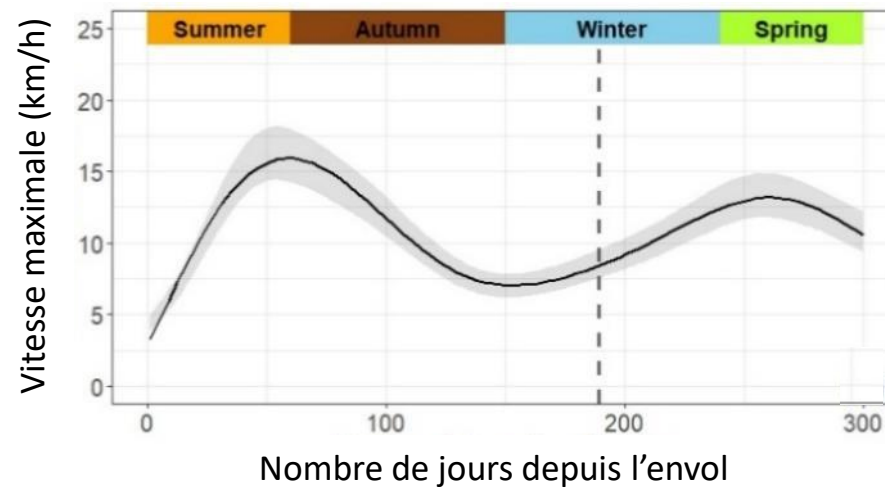
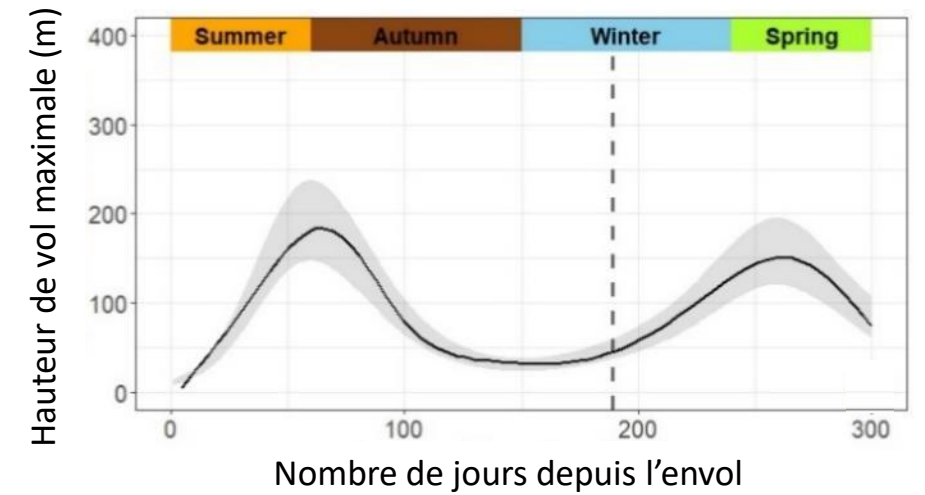
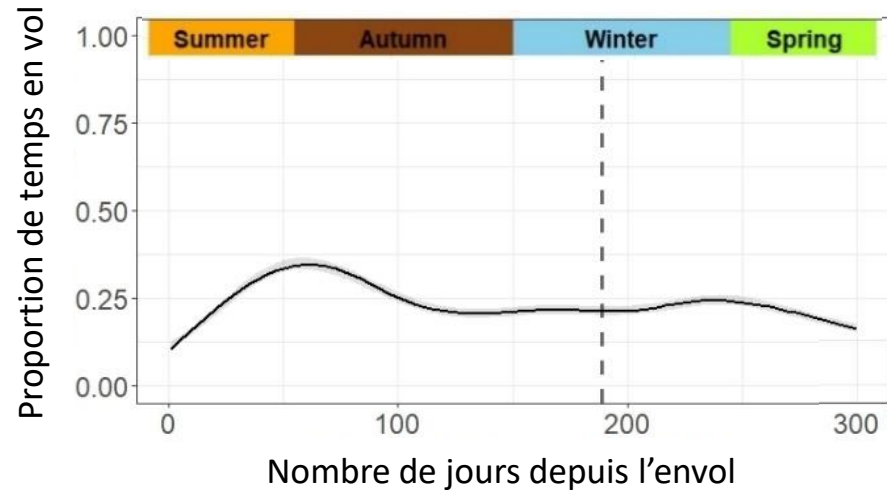
Date médiane de départ du territoire de naissance (189 jours)



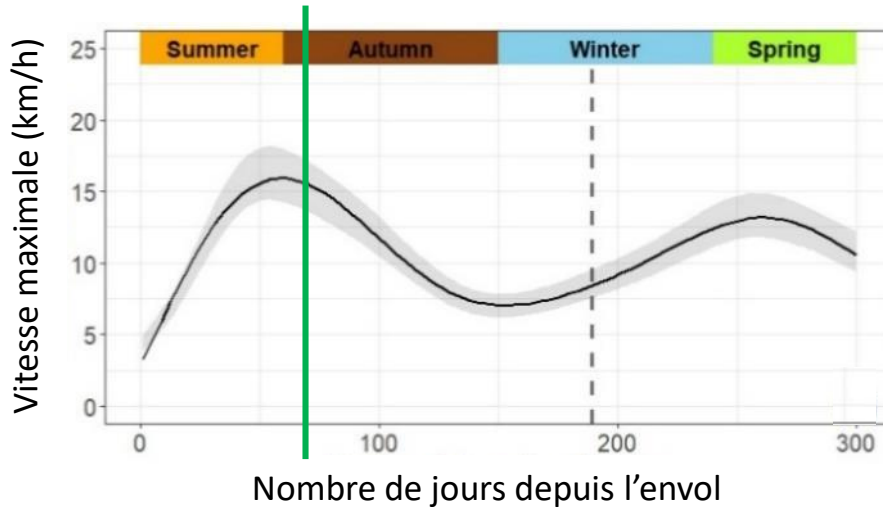
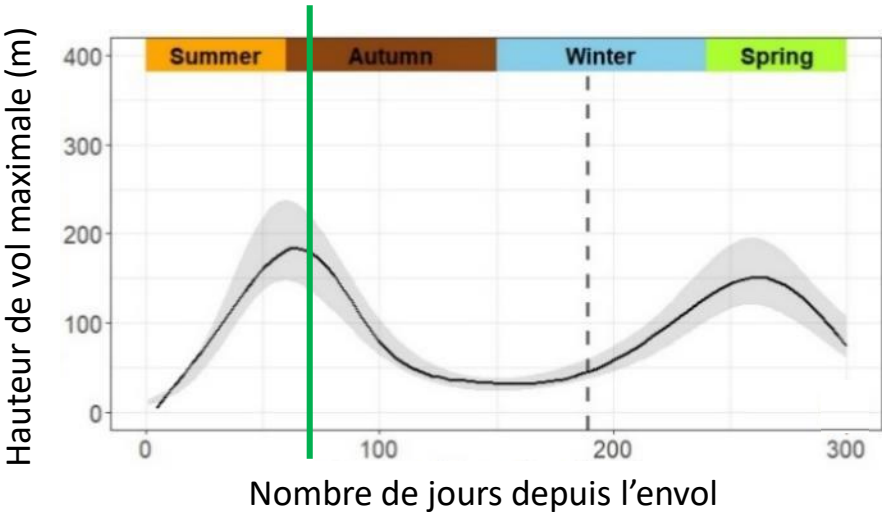
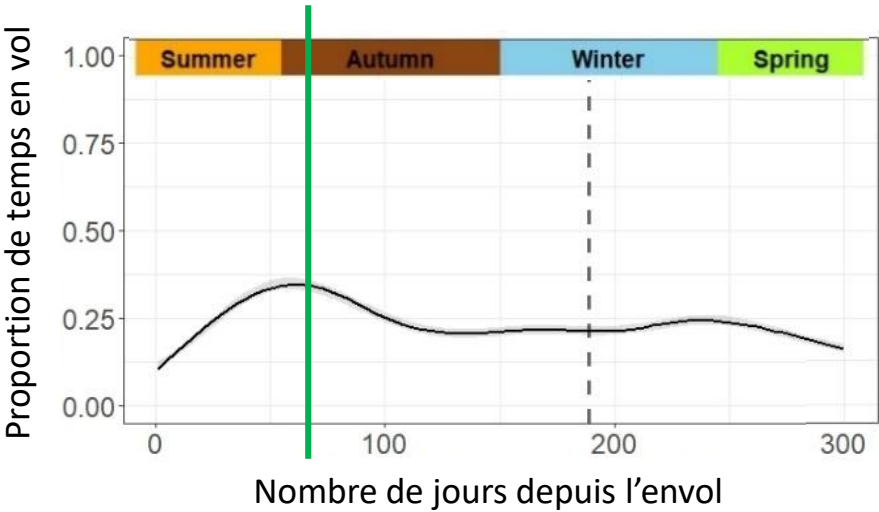
Partie I – Caractérisation du vol



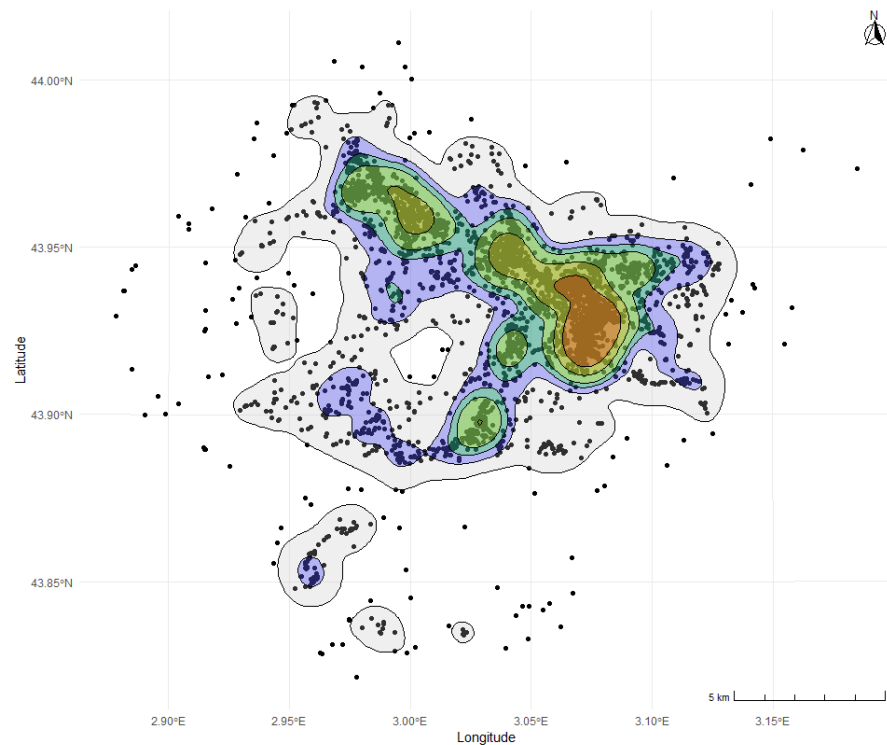
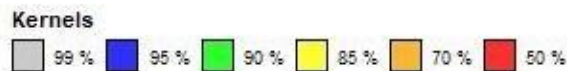
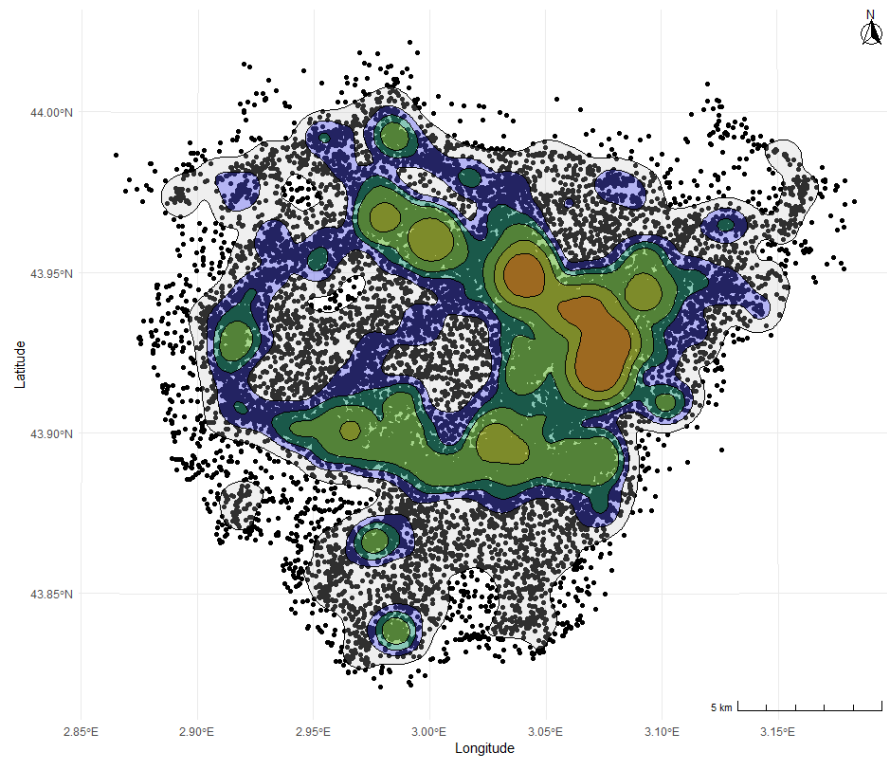
Partie I – Caractérisation du vol



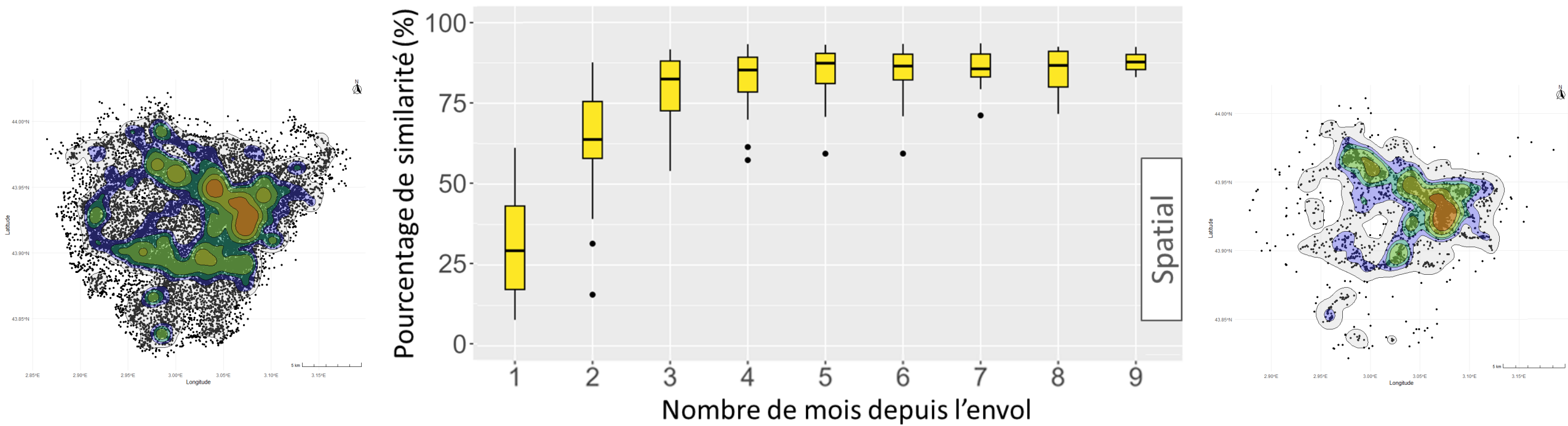
Partie I – Caractérisation du vol



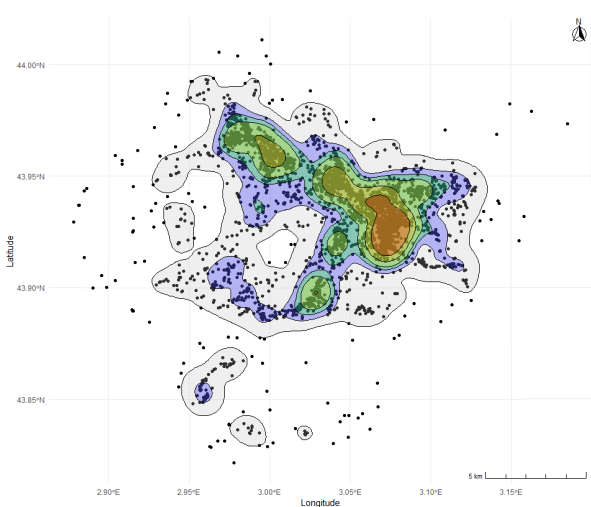
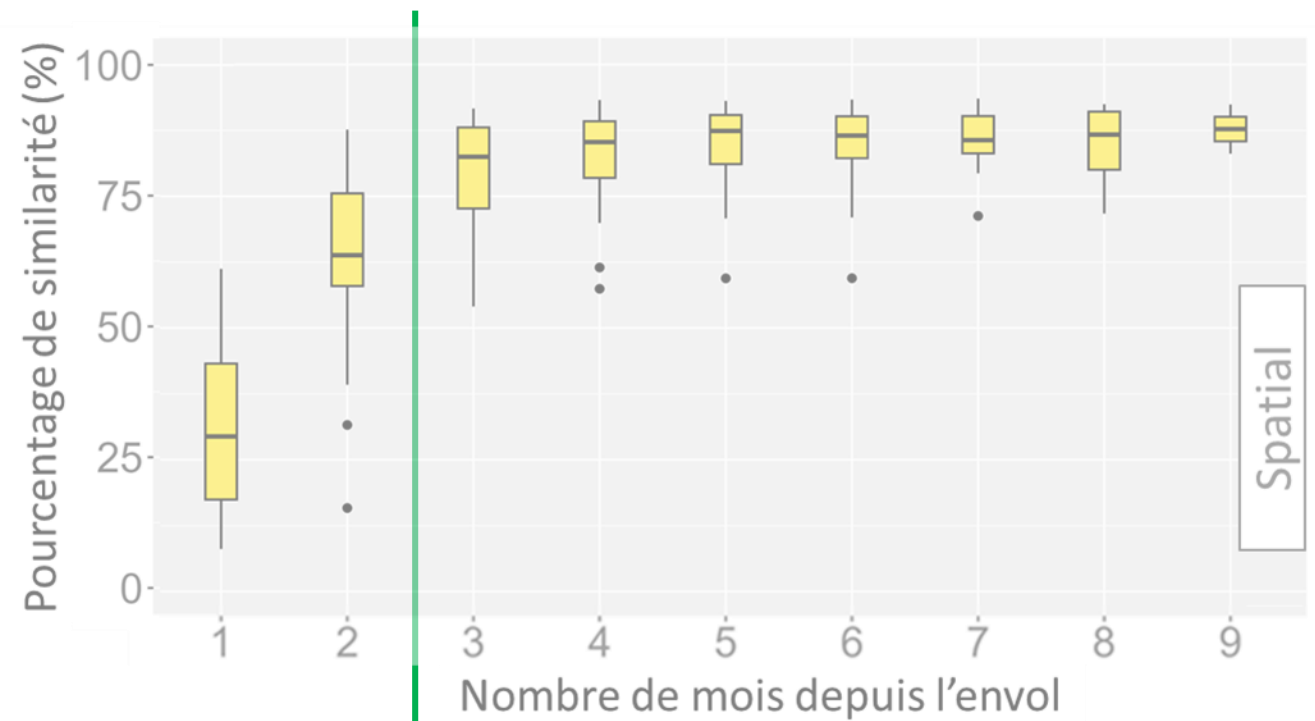
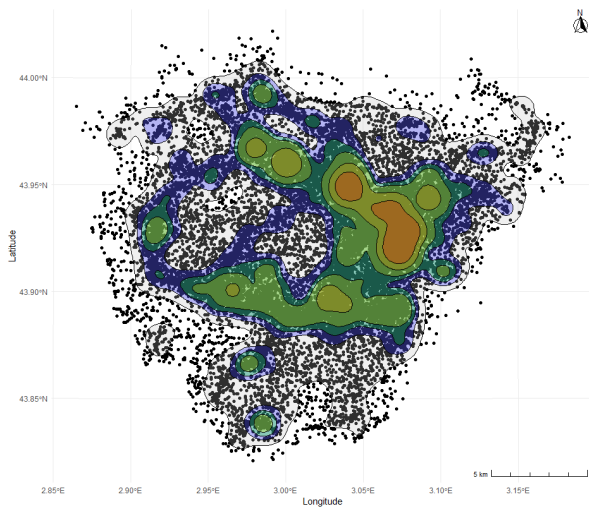
Domaine vital



Mois après mois



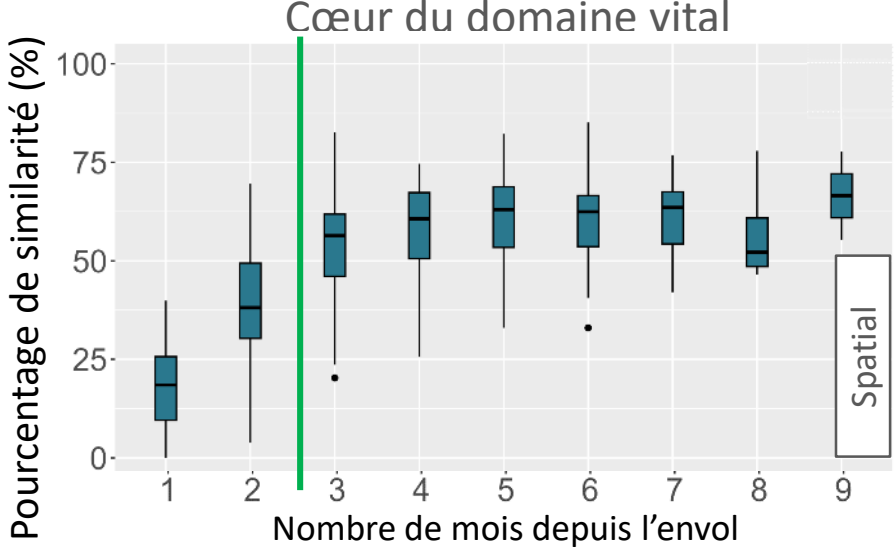
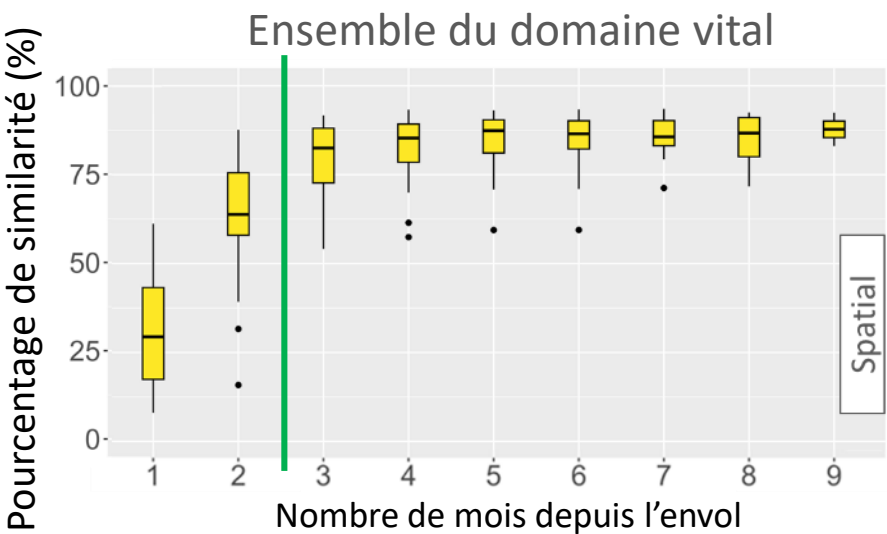
Mois après mois



Phase de
croissance

Phase de
maintien

Mois après mois



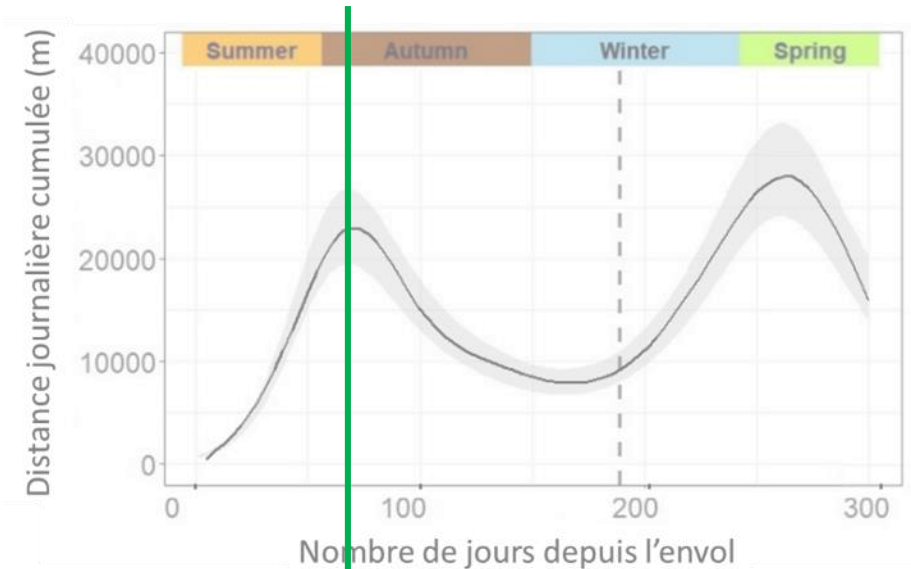
Partie I – Synthèse



Crédit : Cyril Coursier - PNE



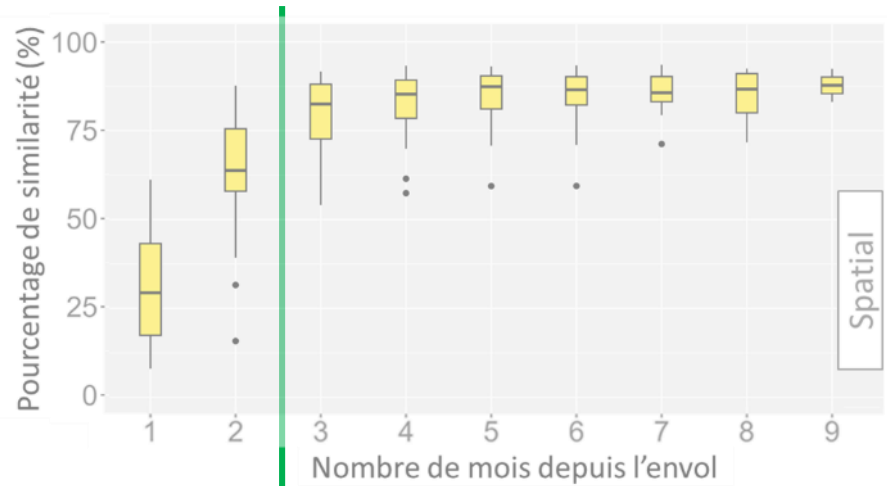
Caractérisation du vol



Phase de
croissance

Phase de
maintien

Utilisation de l'espace



Phase de
croissance

Phase de
maintien



- Distinction en 2 phases :

- Aigles royaux, en Ecosse

Weston et al. 2017

- Aigles ibériques

Muriel et al. 2015

- Vautours fauves

Harel et al. 2016

- Pas de distinction en 2 phases :

- Aigles royaux, en Espagne

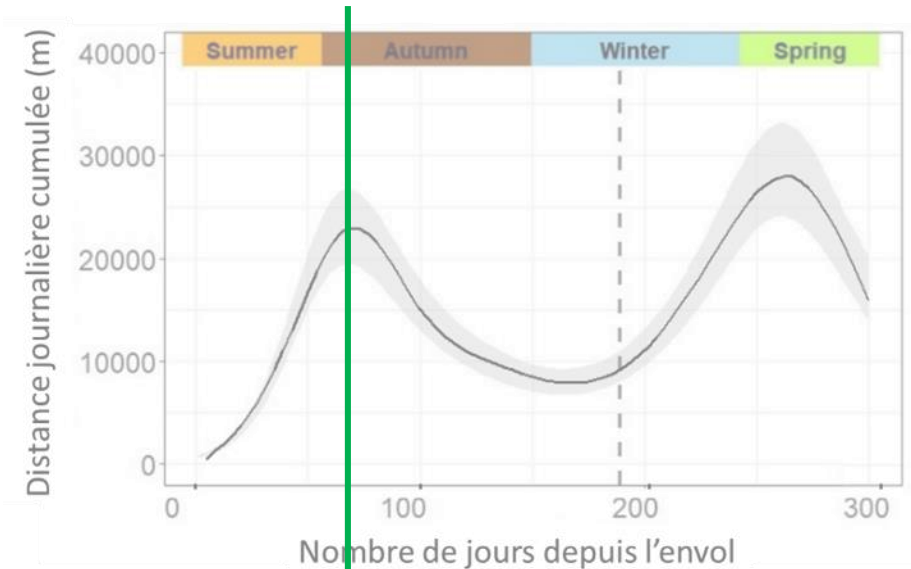
Soutullo et al. 2006

- Aigles de Bonelli

Cadahia et al. 2008



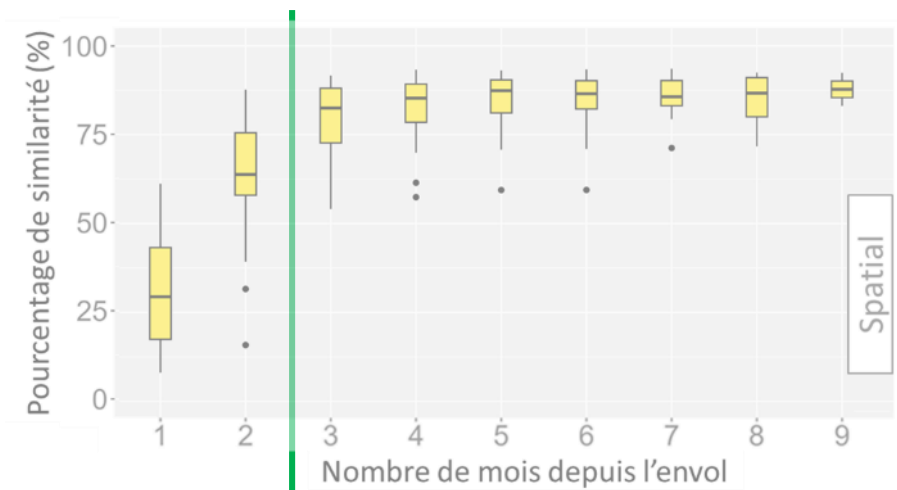
Caractérisation du vol



~~Phase de croissance~~

Phase de maintien

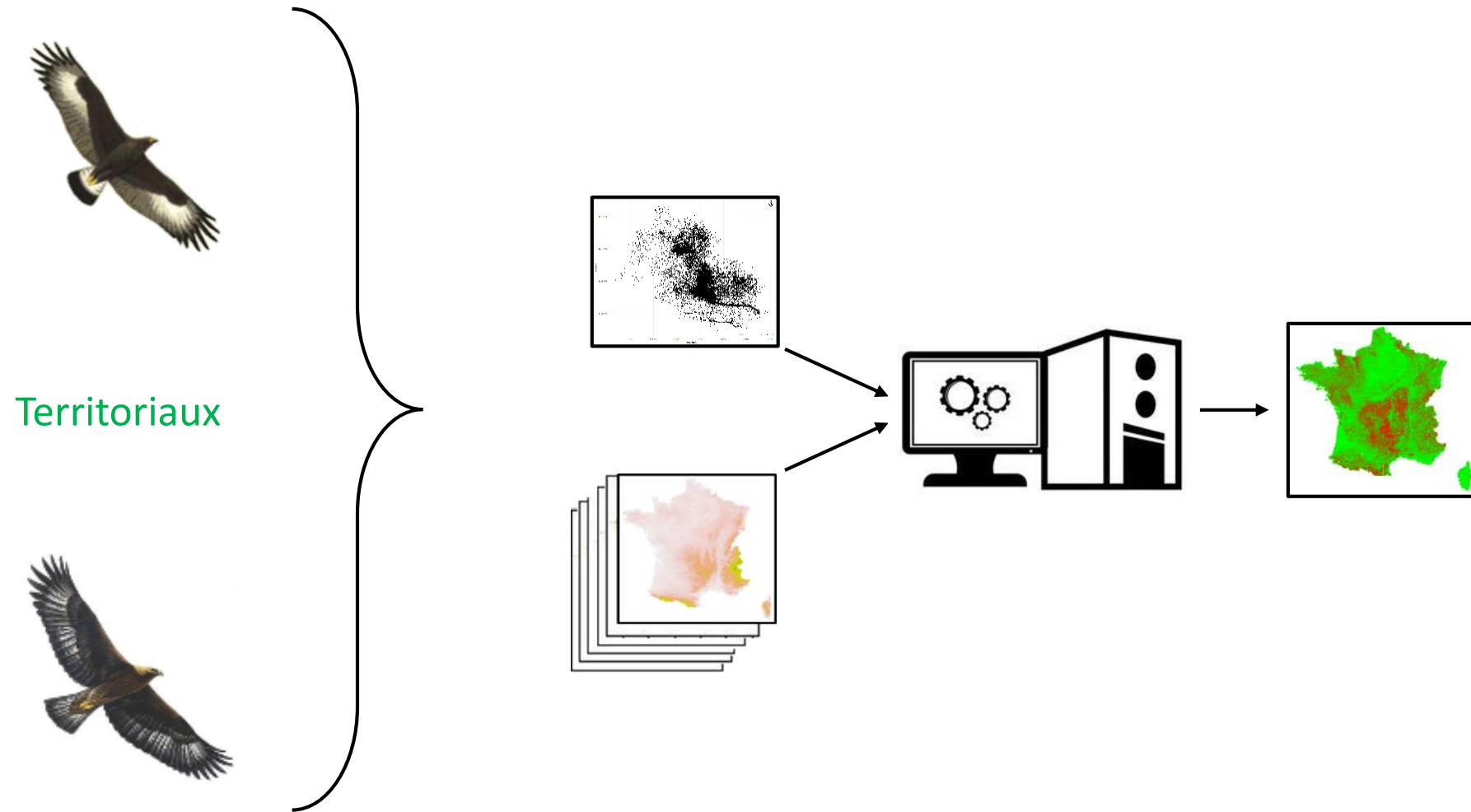
Utilisation de l'espace



~~Phase de croissance~~

Phase de maintien



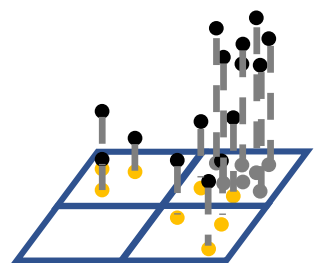


**Quels sont les habitats sélectionnés par les aigles royaux,
en fonction de leur hauteur de vol ?**



Crédit : Mireille Coulon - PNE

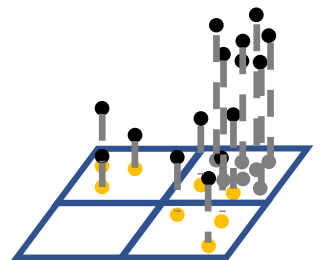
- Possibilité d'étudier la sélection d'habitats en 3D
 - A partir de variables pouvant influencer le vol
 - En adaptant à la 3D une méthode 2D



- Possibilité d'étudier la sélection d'habitats en 3D
 - A partir de variables pouvant influencer le vol
 - En adaptant à la 3D une méthode 2D



Pour **prédire les zones** où les aigles sont en **conflit d'utilisation** de l'espace aérien



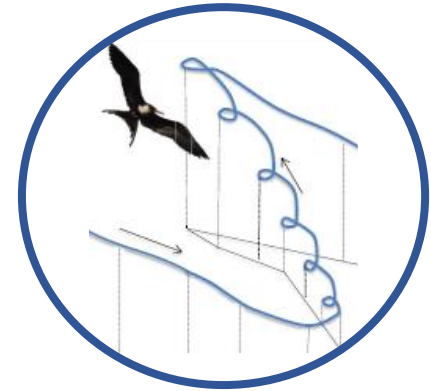
Habitats disponibles



Topographie



Occupation du sol



Courants aériens

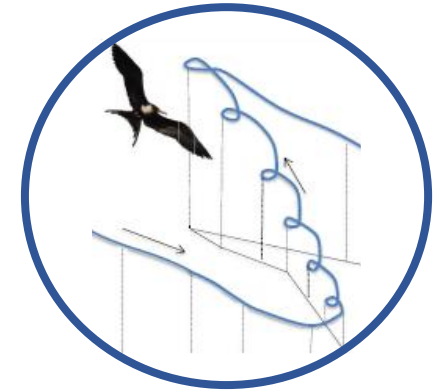
Habitats disponibles



Topographie



Occupation du sol



Courants aériens



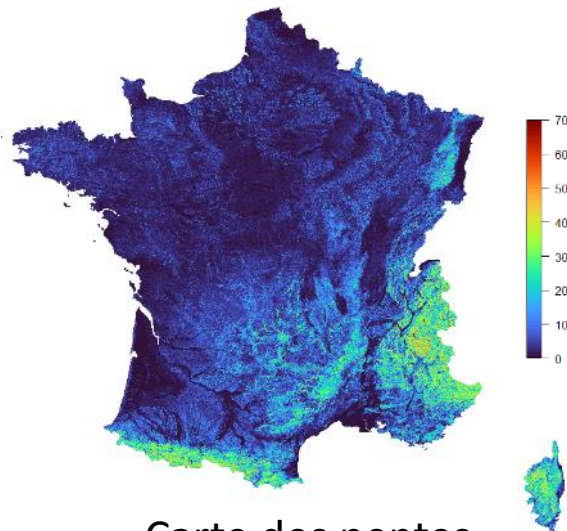
Facilement disponibles
(sur BDD en ligne)



Non directement
disponibles

- Calculs possibles à partir de données :
 - De relief
 - Météorologiques (horaires sur 5 ans)

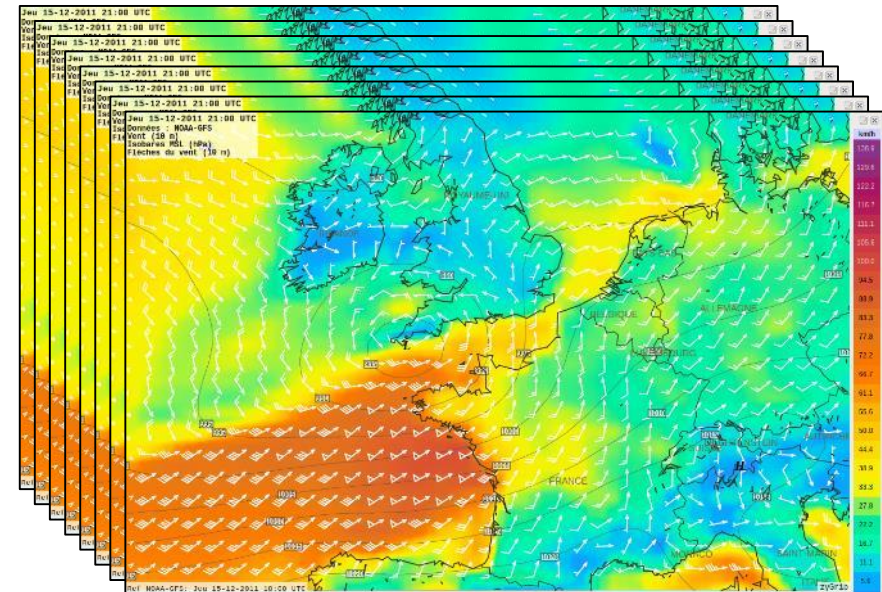
IGN



Carte des pentes



Exemple de GRIB de vents



○ Calculs possibles à partir de données :

- De relief
- Météorologiques (horaires sur 5 ans)

→ Résolution temporelle non adaptée à la question
(prédiction du risque global)

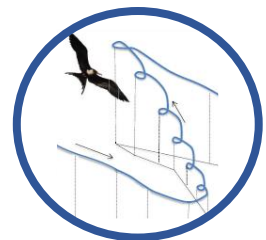
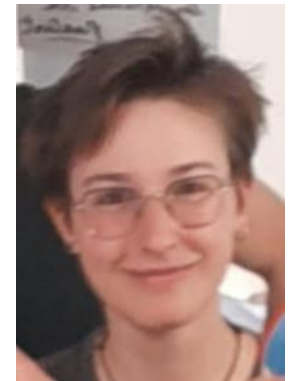


Variable climatique plutôt que météorologique

Jacinthe Paradis

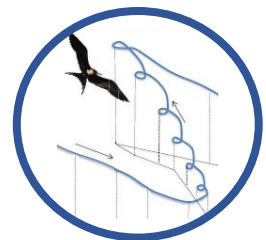
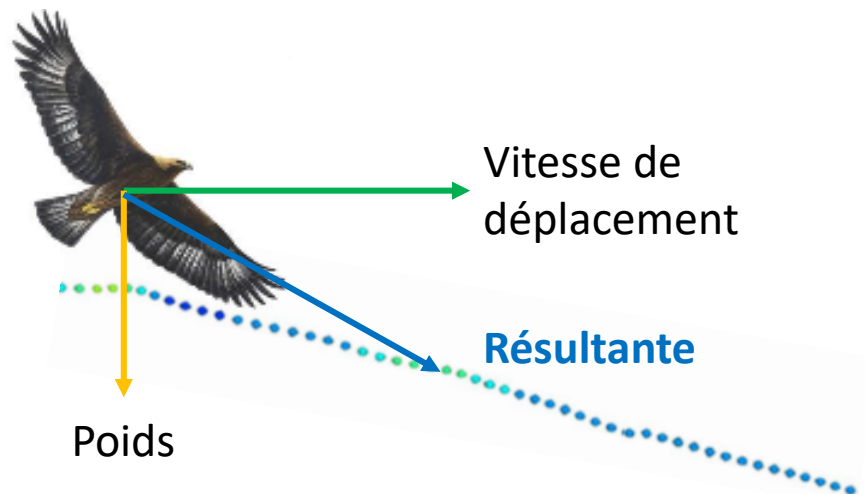


Capucine Grignard



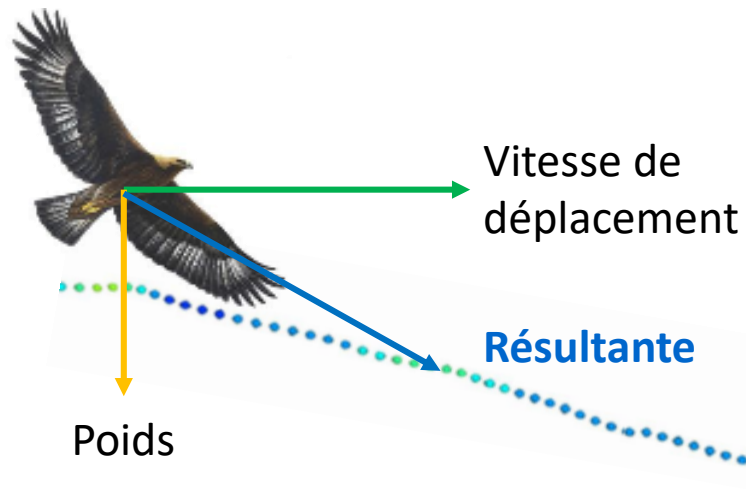
Partie II – Les courants aériens

- Vol plané descendant

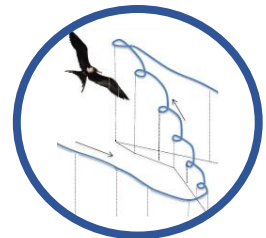
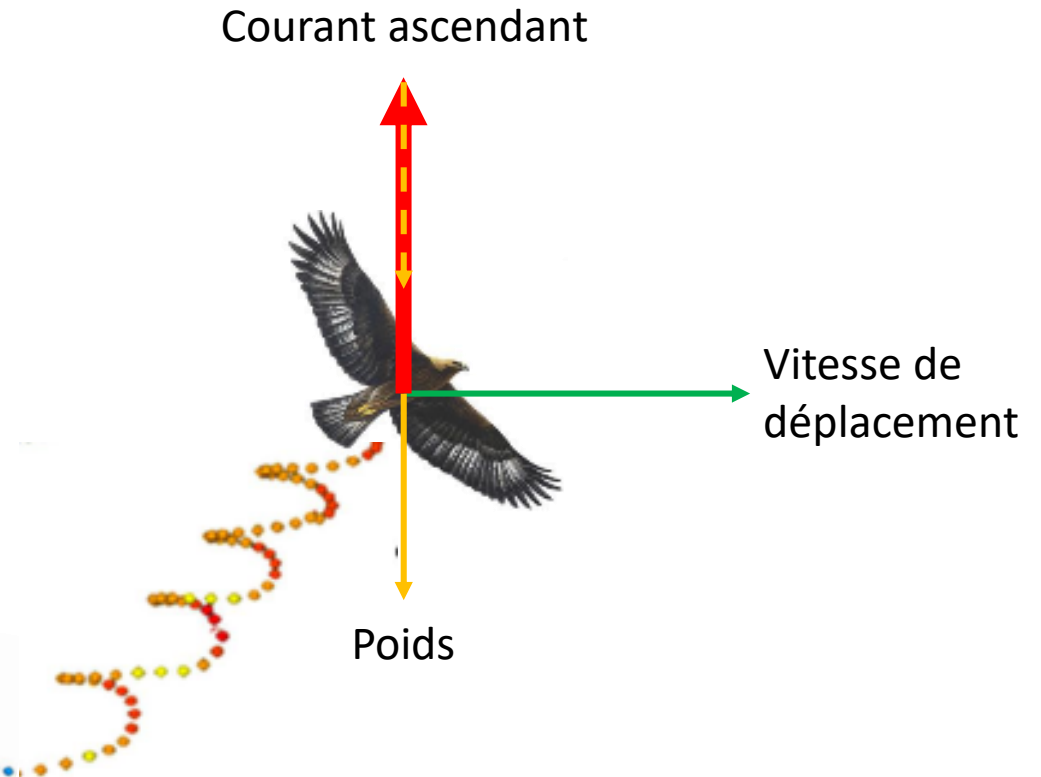


Partie II – Les courants aériens

○ Vol plané descendant

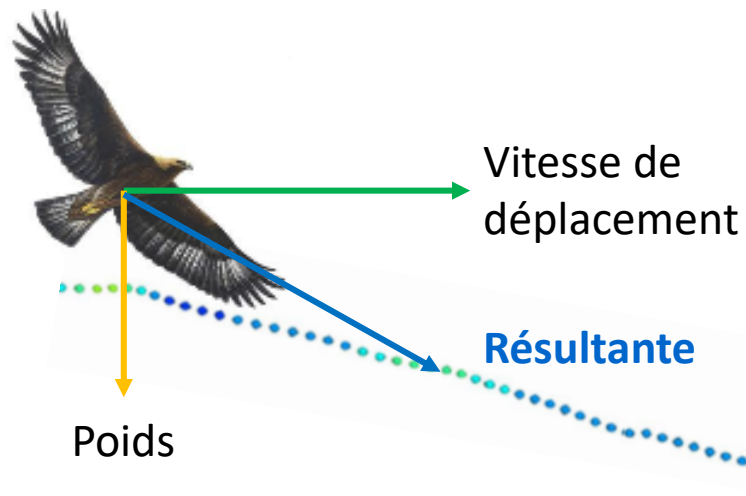


○ Vol plané ascendant

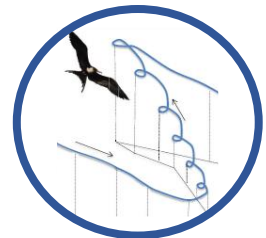
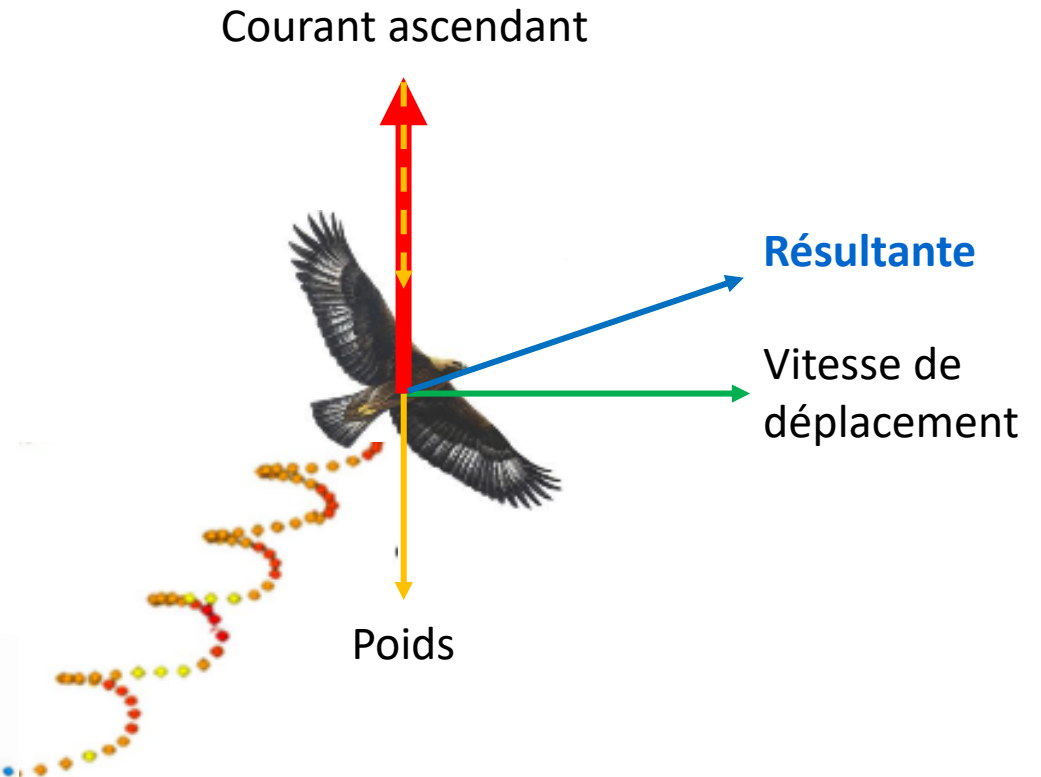


Partie II – Les courants aériens

○ Vol plané descendant

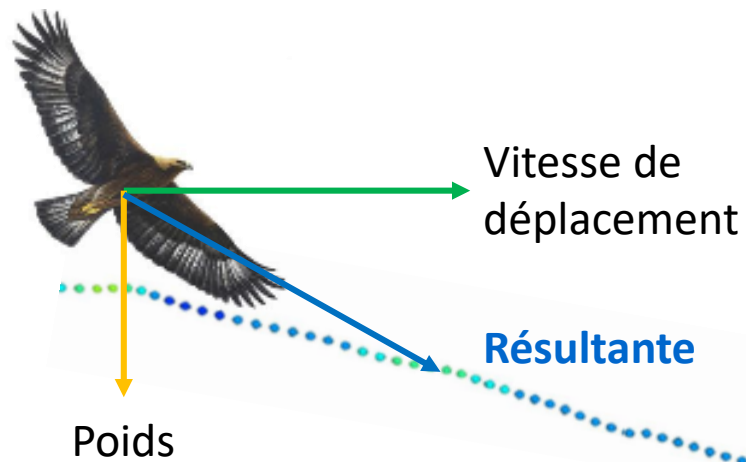


○ Vol plané ascendant

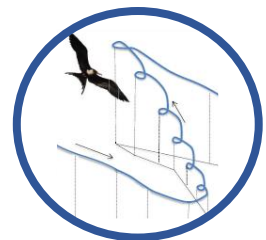
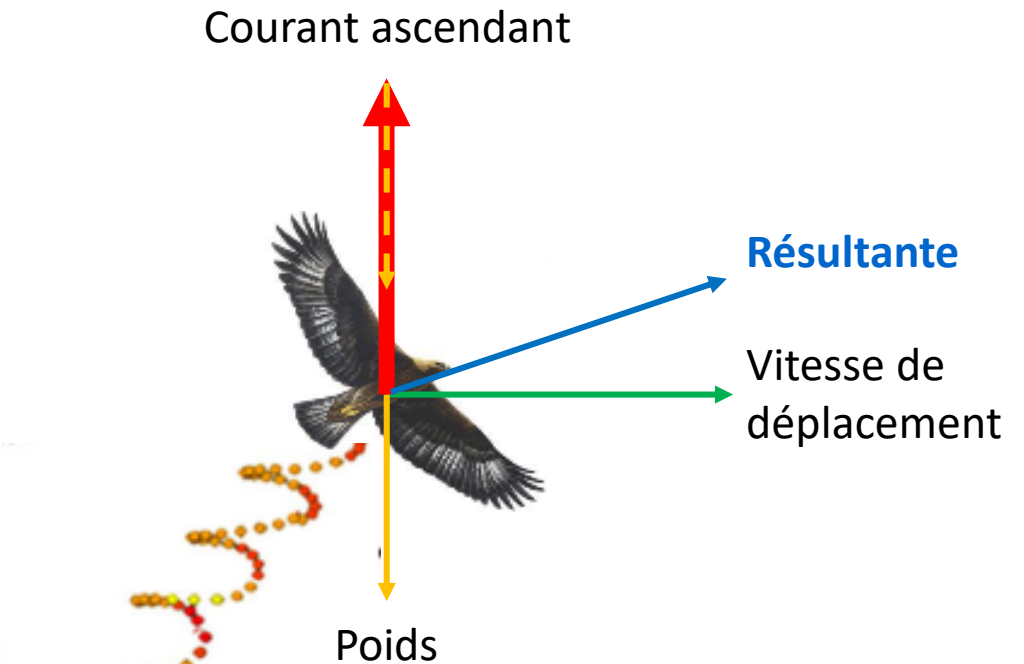


Partie II – Les courants aériens

○ Vol plané descendant



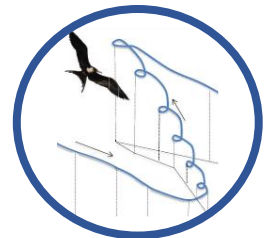
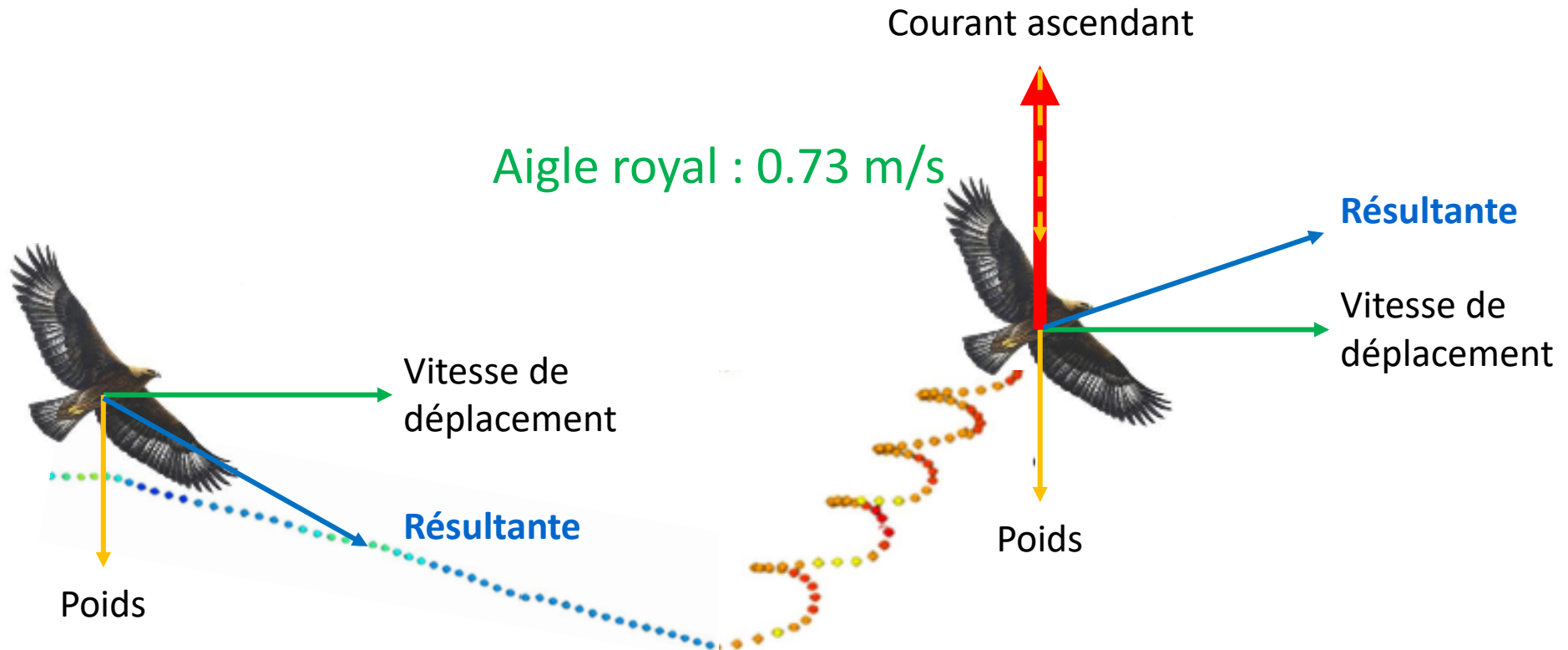
○ Vol plané ascendant



Partie II – Les courants aériens

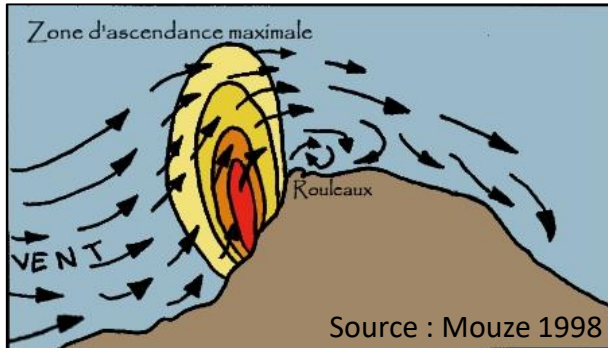
○ Vol plané descendant

○ Vol plané ascendant



Partie II – Les courants aériens

Orographique ascendant
 $\geq 0.8 \text{ m/s}$

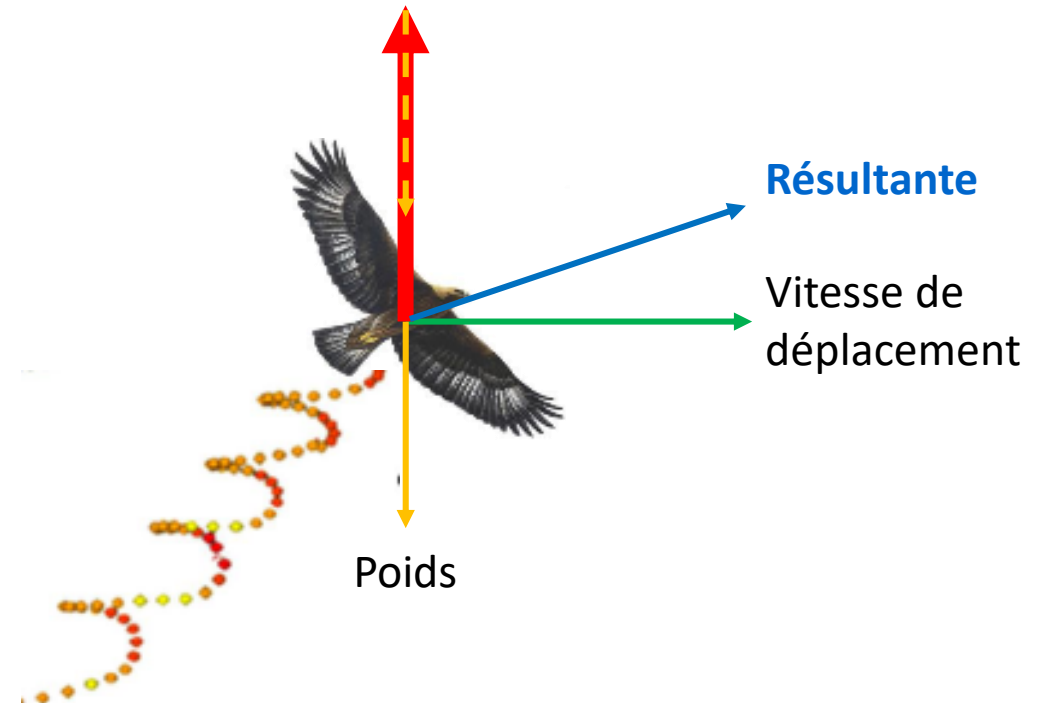


Thermique
 $\geq 0.8 \text{ m/s}$

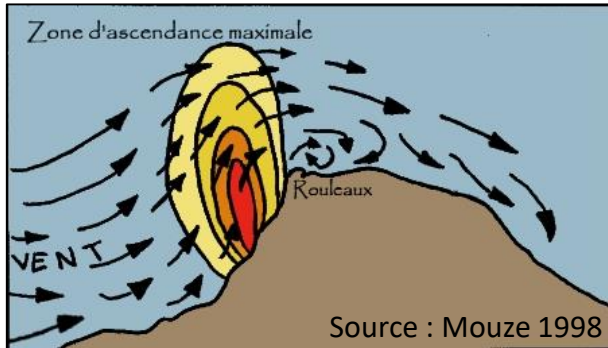


○ Vol plané ascendant

Courant ascendant



Orographique ascendant
 $\geq 0.8 \text{ m/s}$



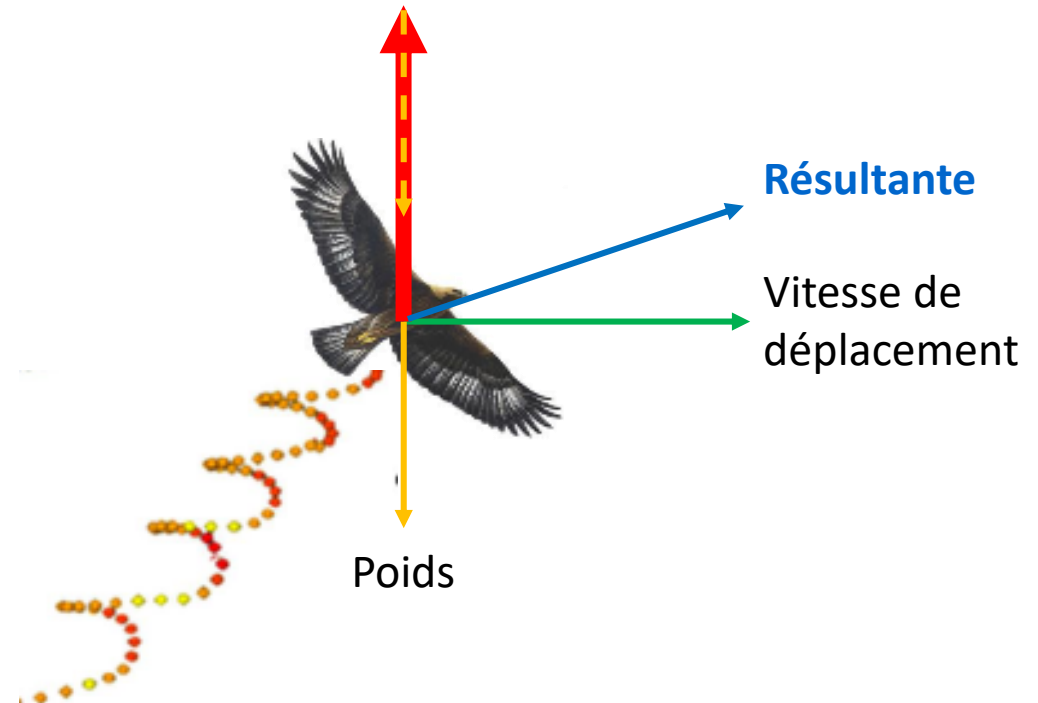
Orographique descendant
 $< 0 \text{ m/s}$



Source : www.nps.gov

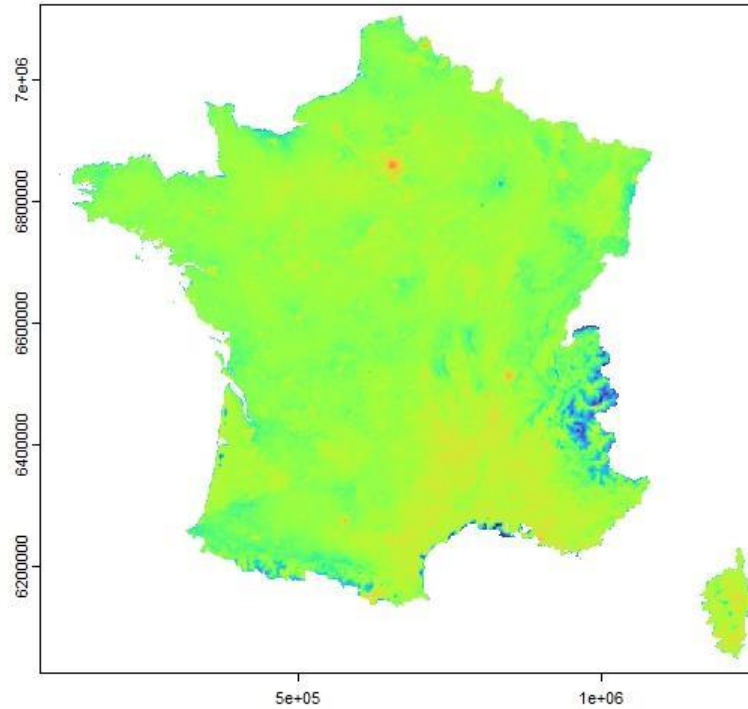
○ Vol plané ascendant

Courant ascendant

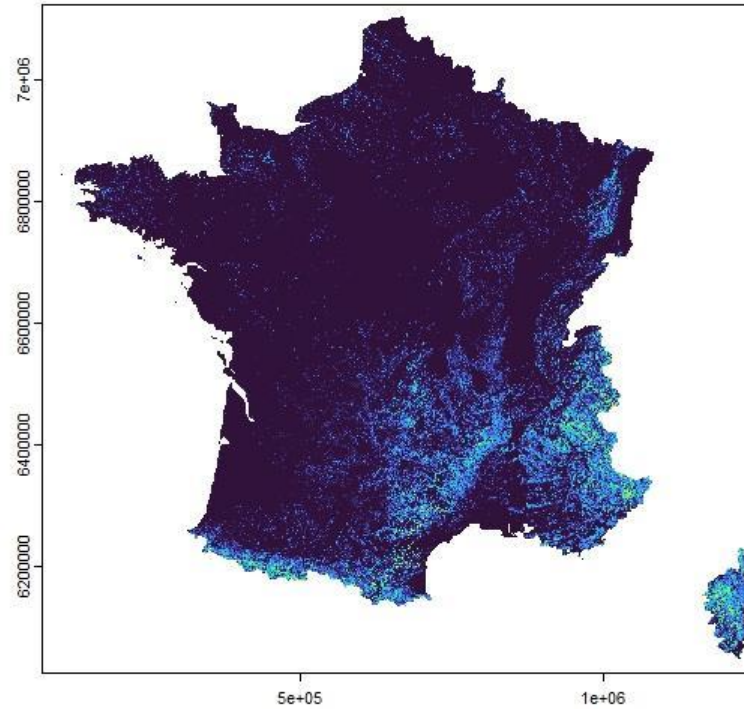


Partie II – Les courants aériens

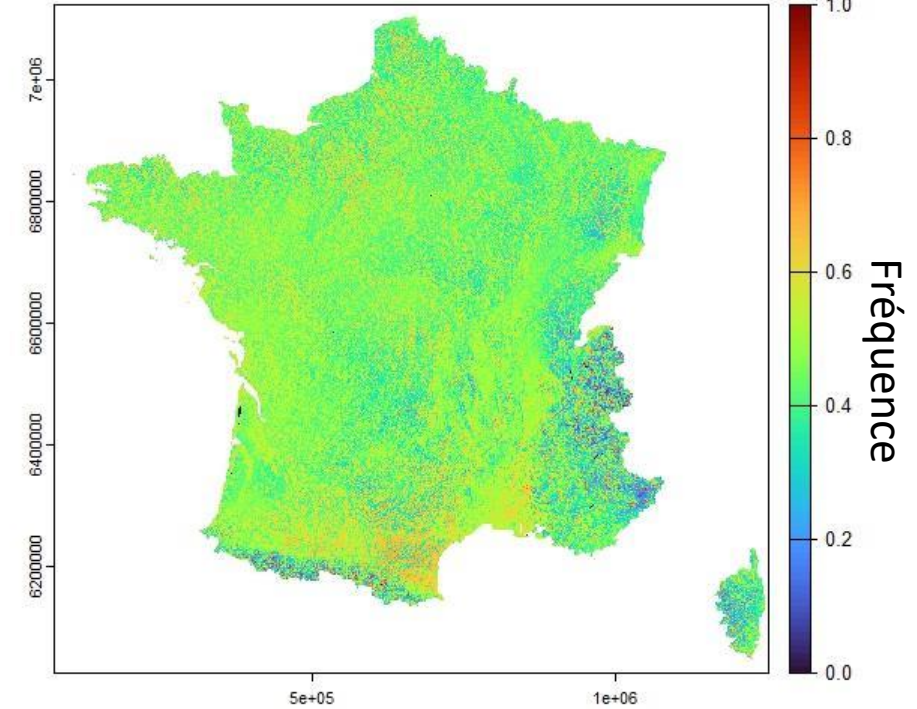
Thermiques ≥ 0.8 m/s



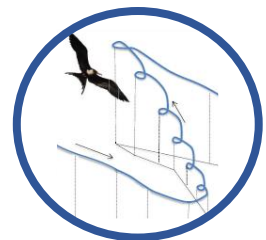
Orographiques ≥ 0.8 m/s



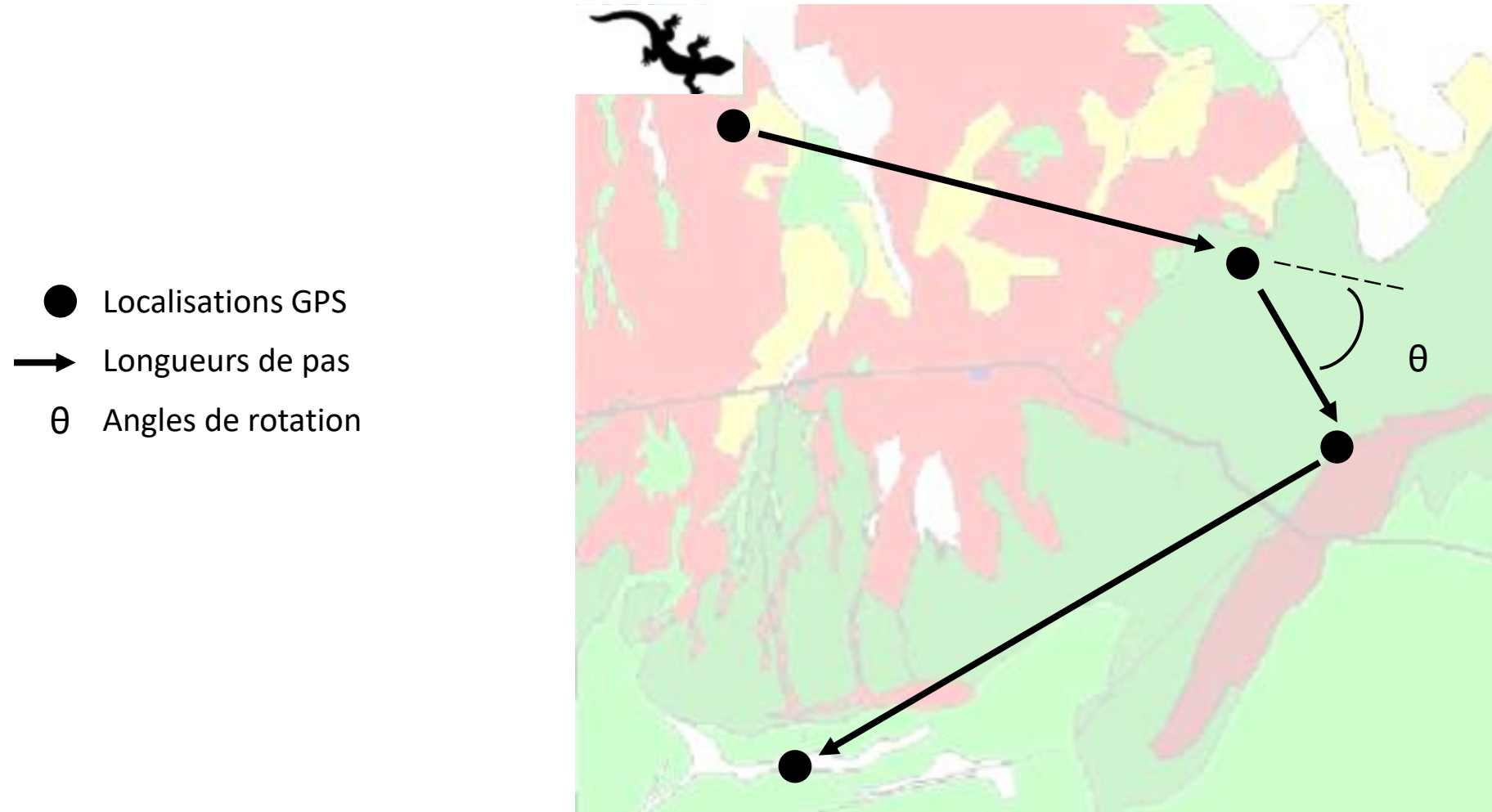
Orographiques descendants



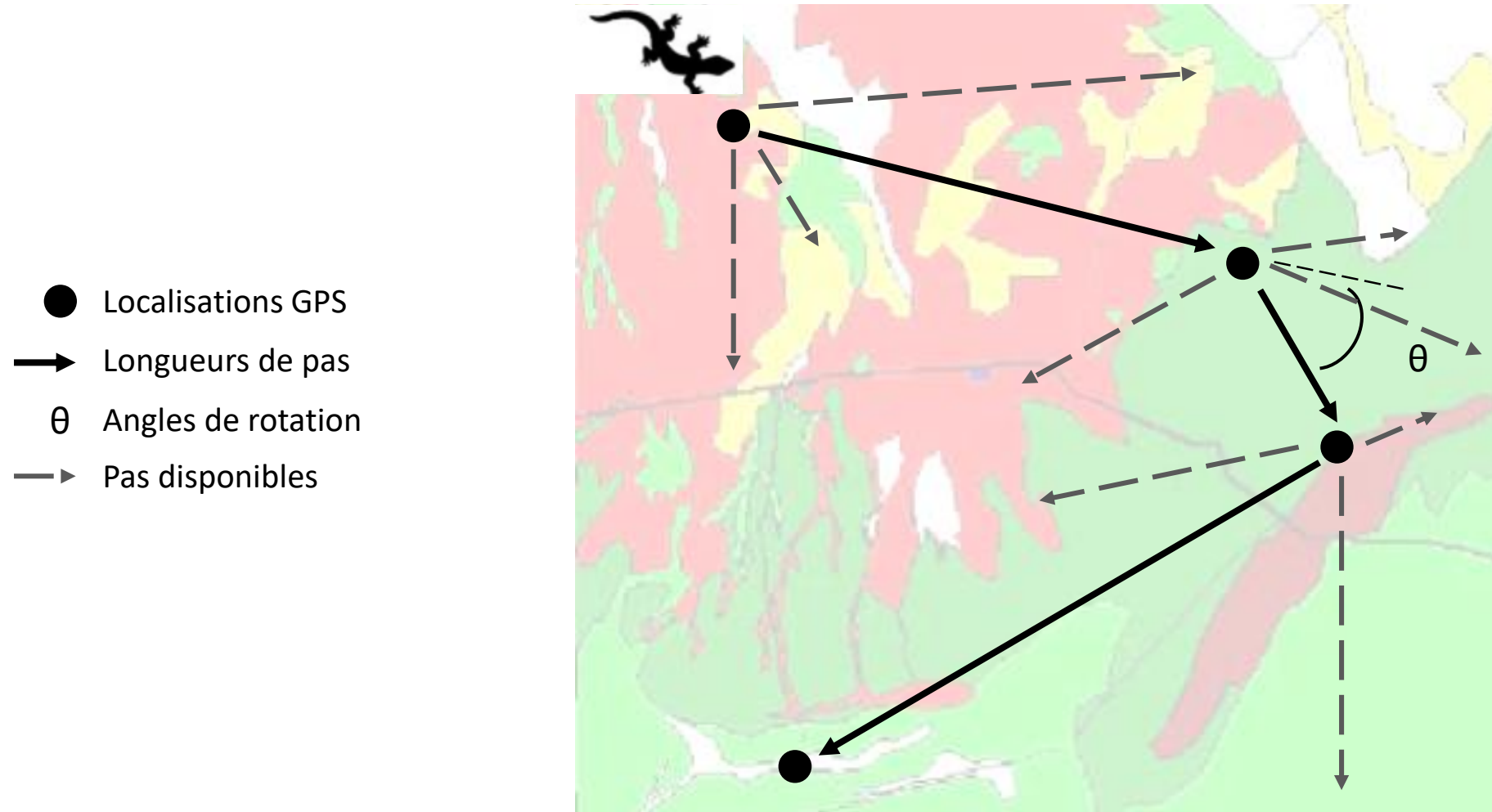
→ Hétérogénéité spatiale



Méthode intégrée de sélection par étapes (*integrated Step Selection Function – iSSF*)

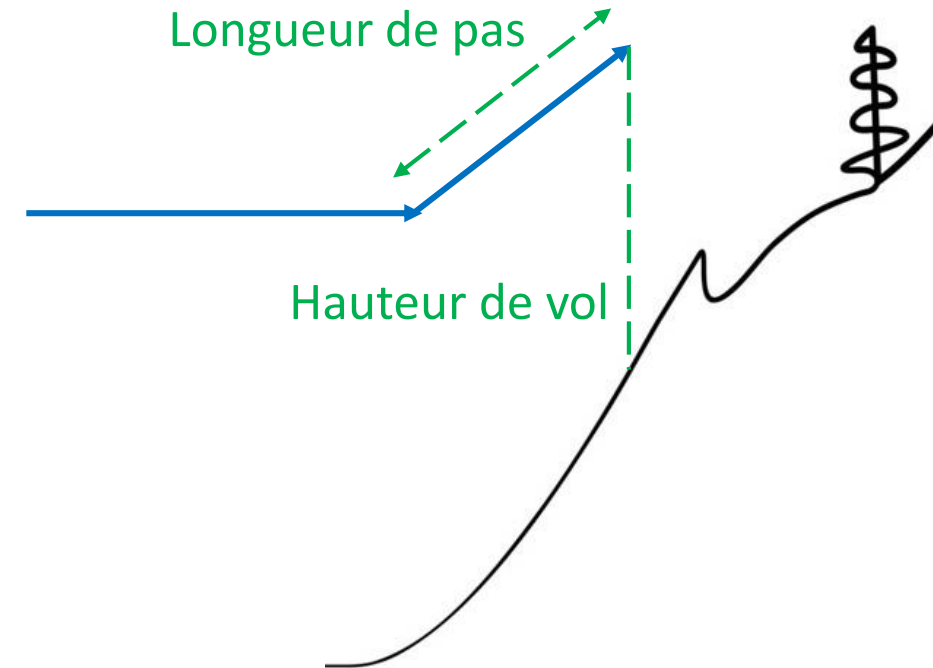
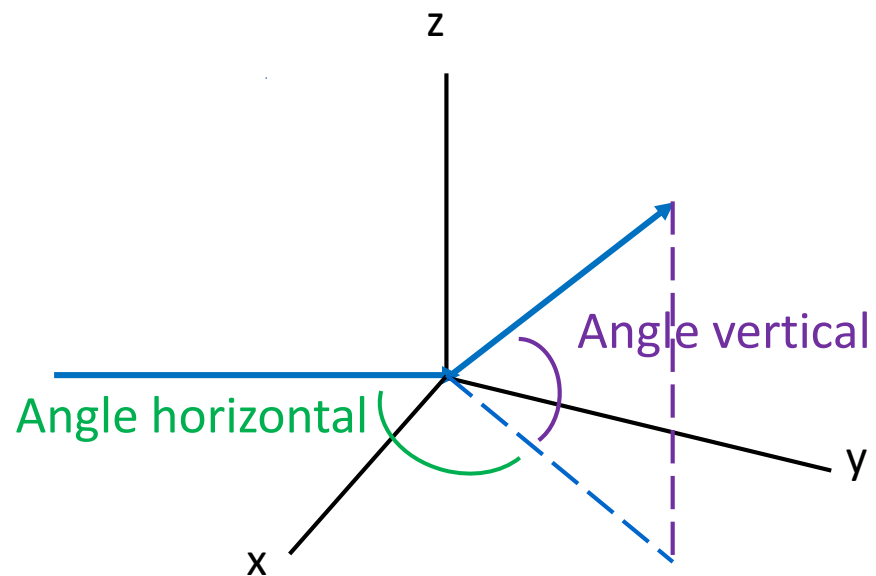


Méthode intégrée de sélection par étapes (*integrated Step Selection Function – iSSF*)



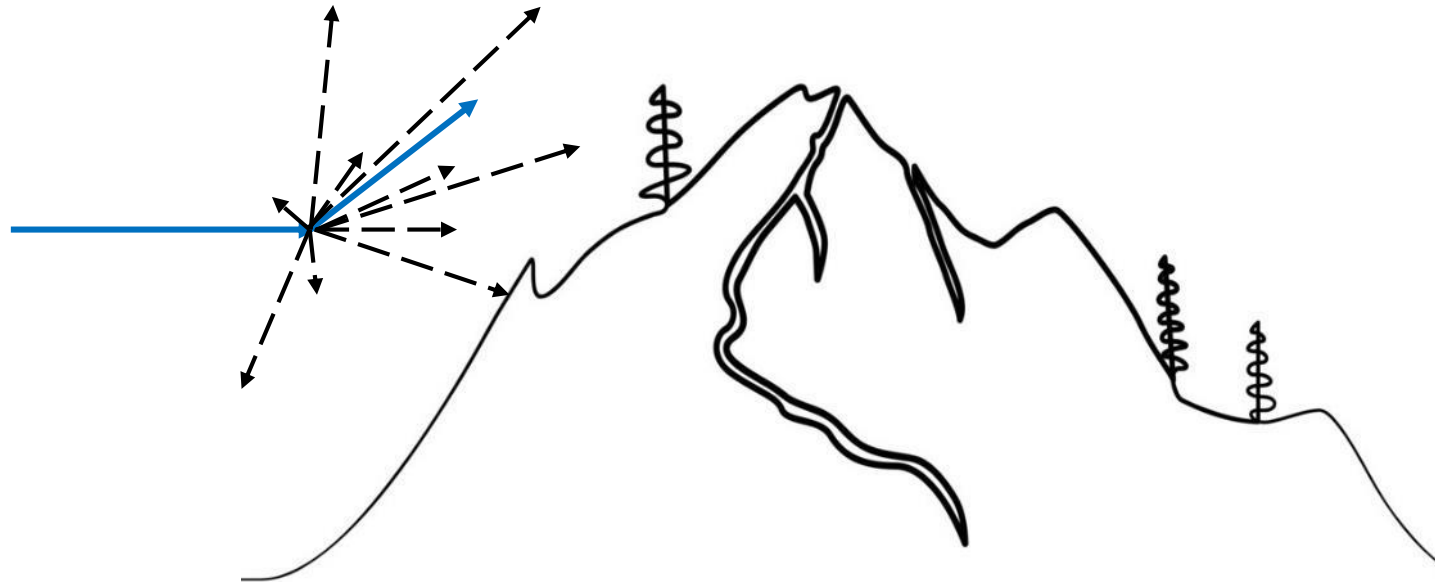
Extension en trois dimensions

- 1^e étape : la décomposition des trajectoires en 3D



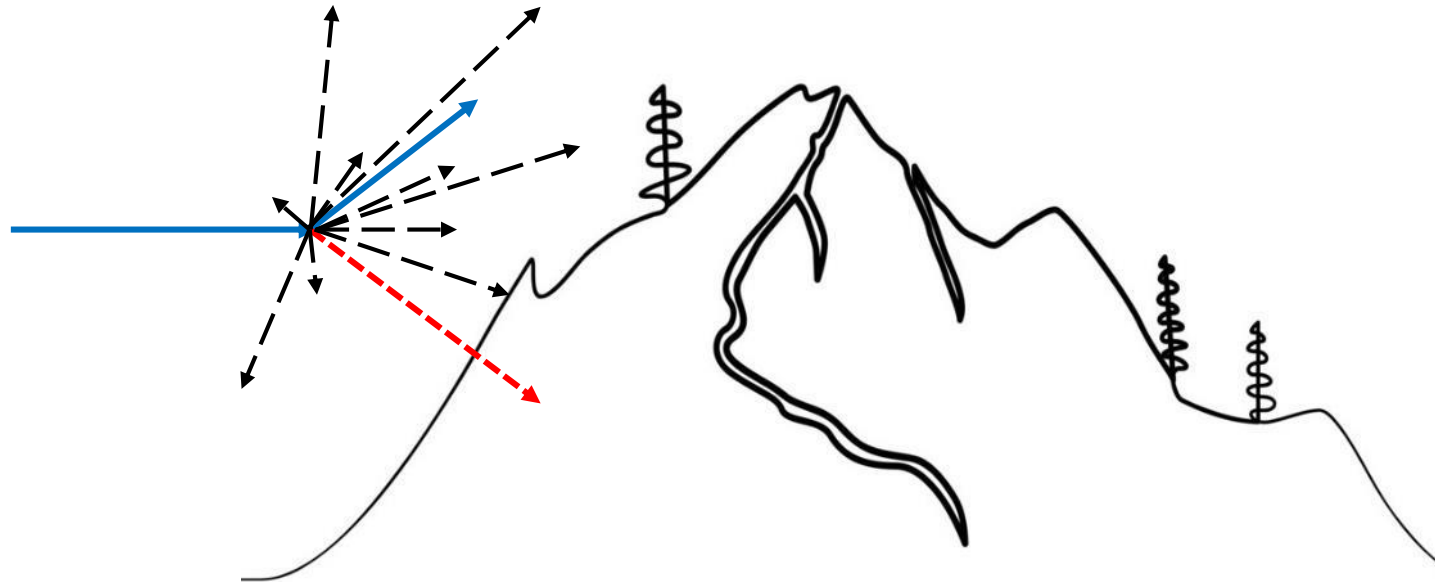
Extension en trois dimensions

- 2^e étape : générer les pas disponibles en 3D



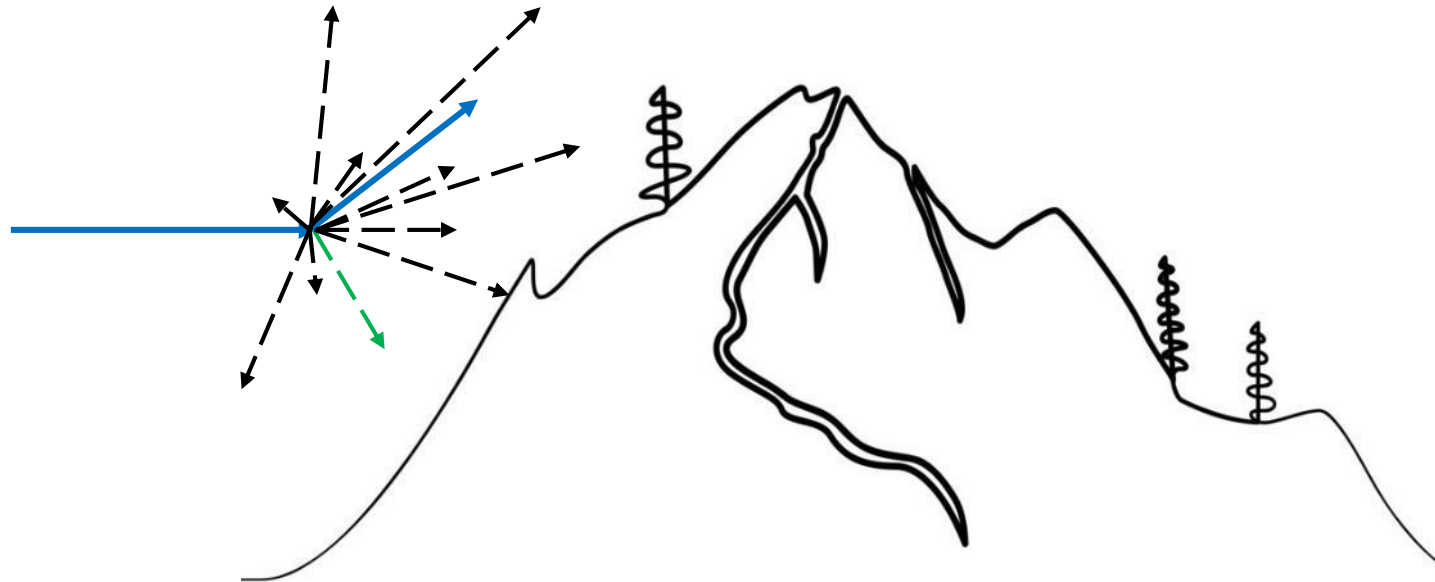
Extension en trois dimensions

- 2^e étape : générer les pas disponibles en 3D

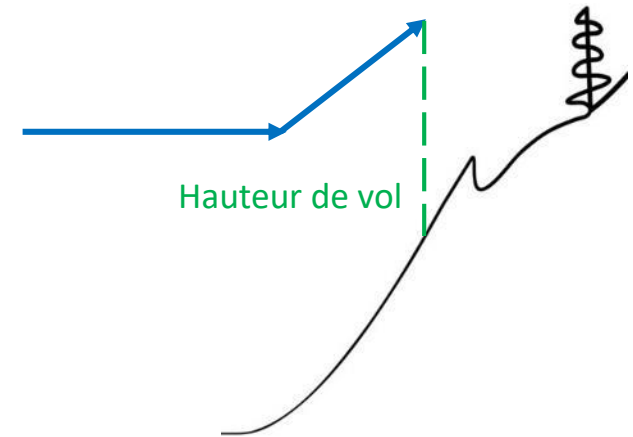
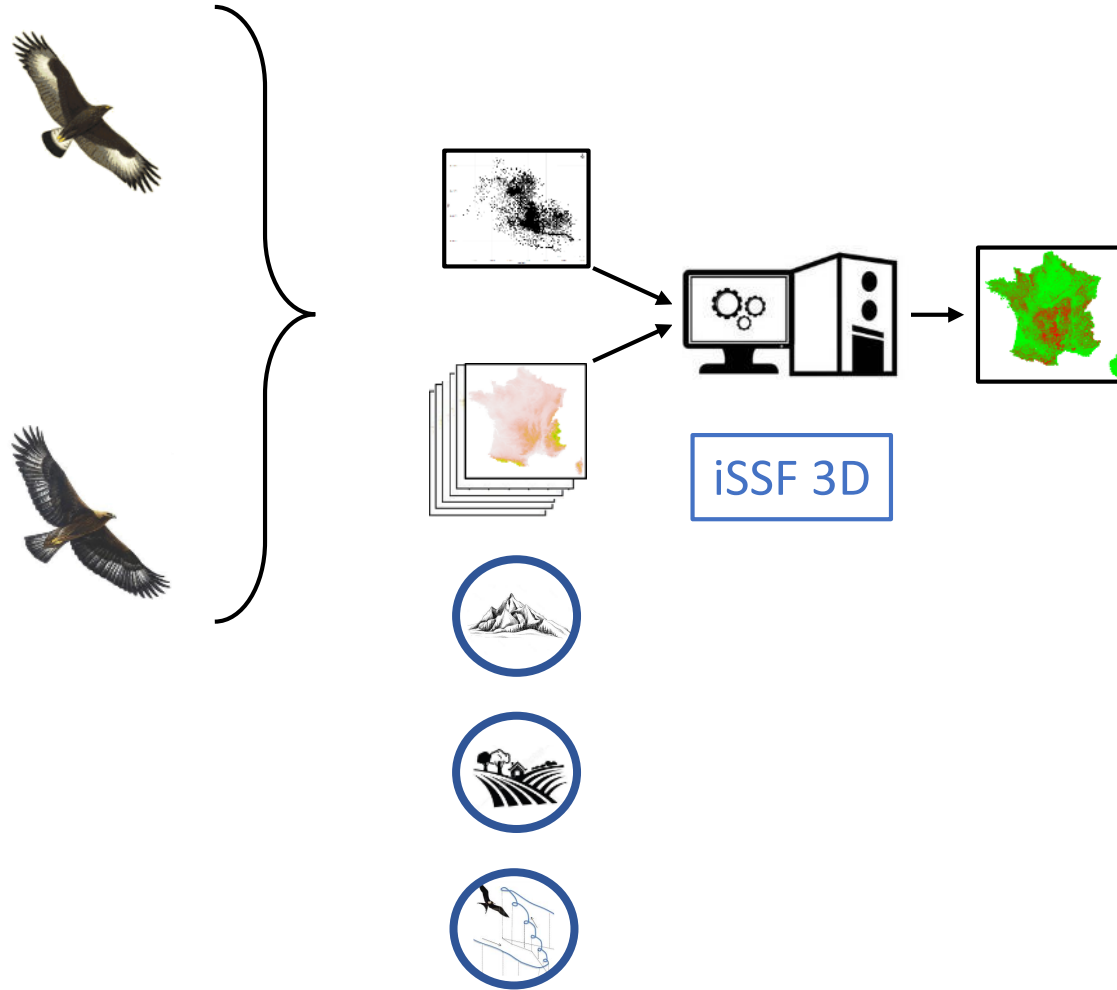


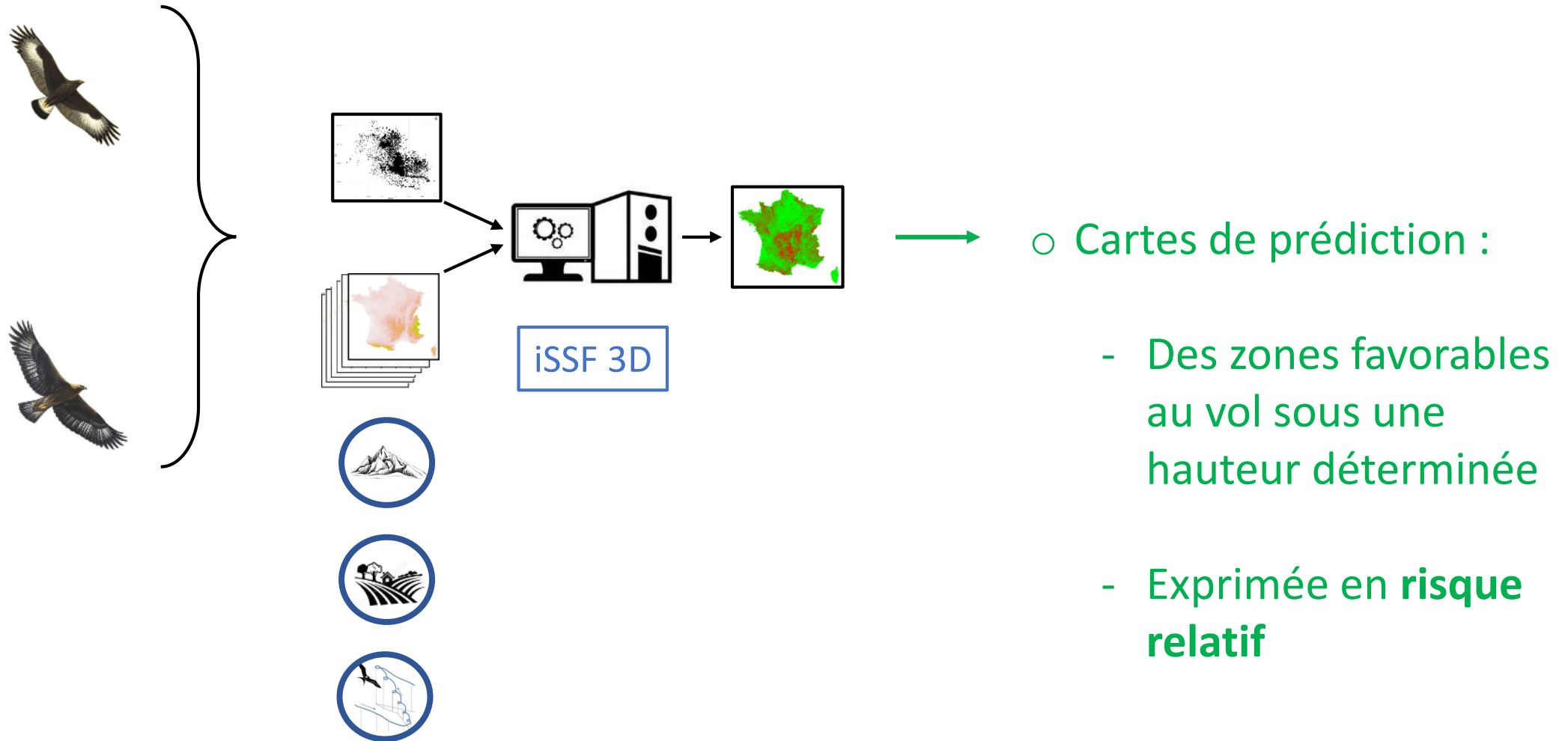
Extension en trois dimensions

- 2^e étape : générer les pas disponibles en 3D



Partie II – La sélection d'habitats en 3D

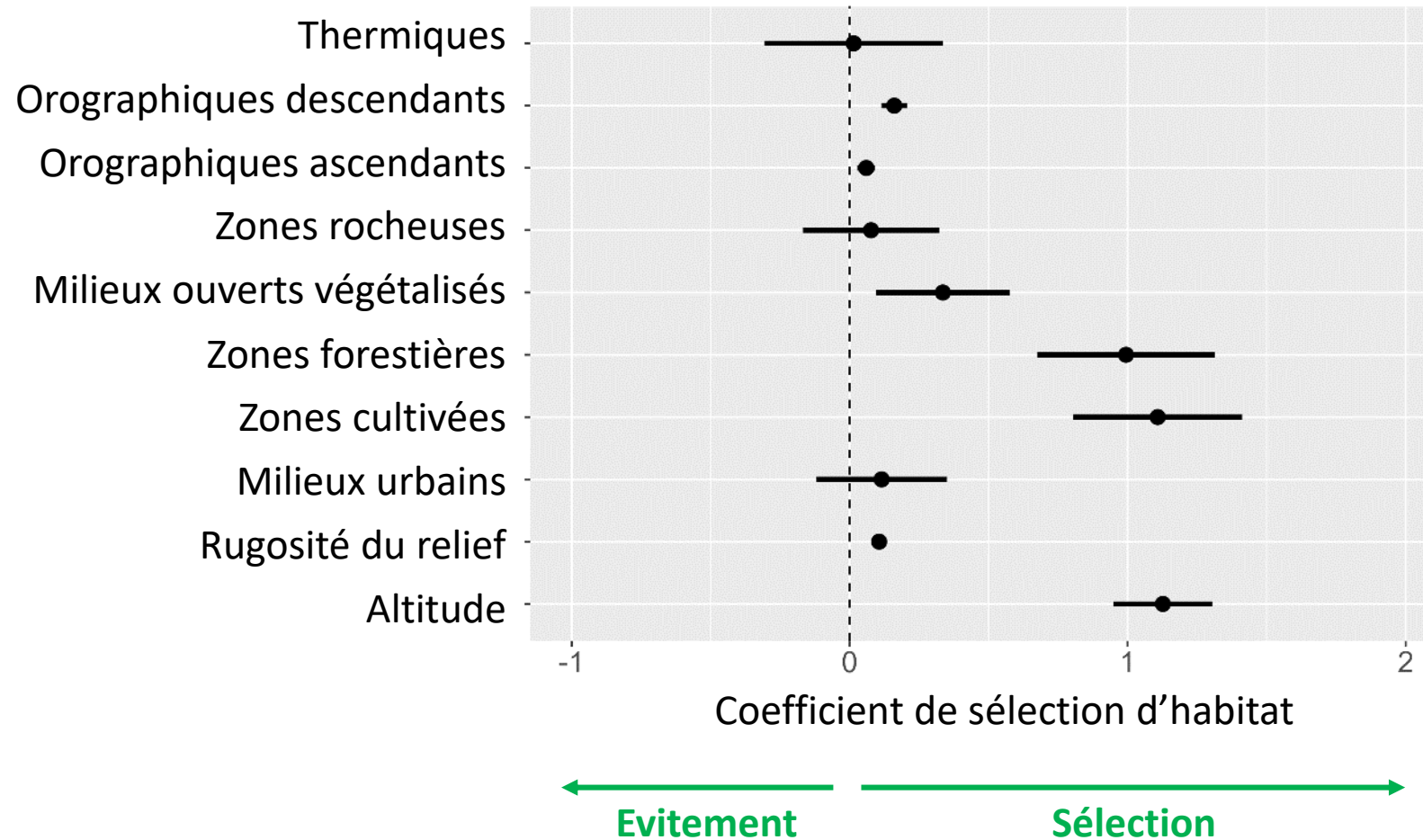




Partie II – La sélection d'habitats en 3D des aigles royaux territoriaux

Résultats

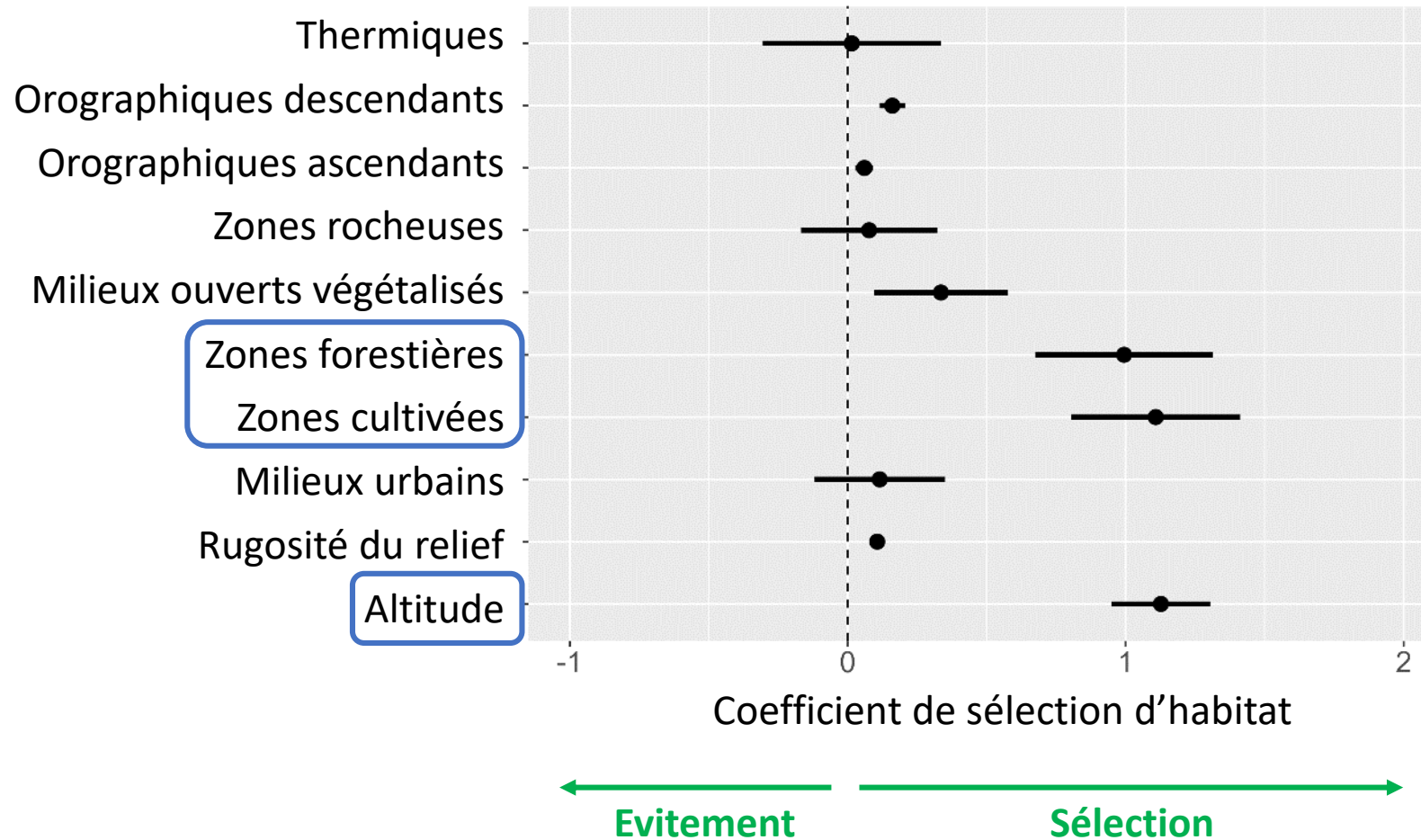
Individus territoriaux



Partie II – La sélection d'habitats en 3D des aigles royaux territoriaux

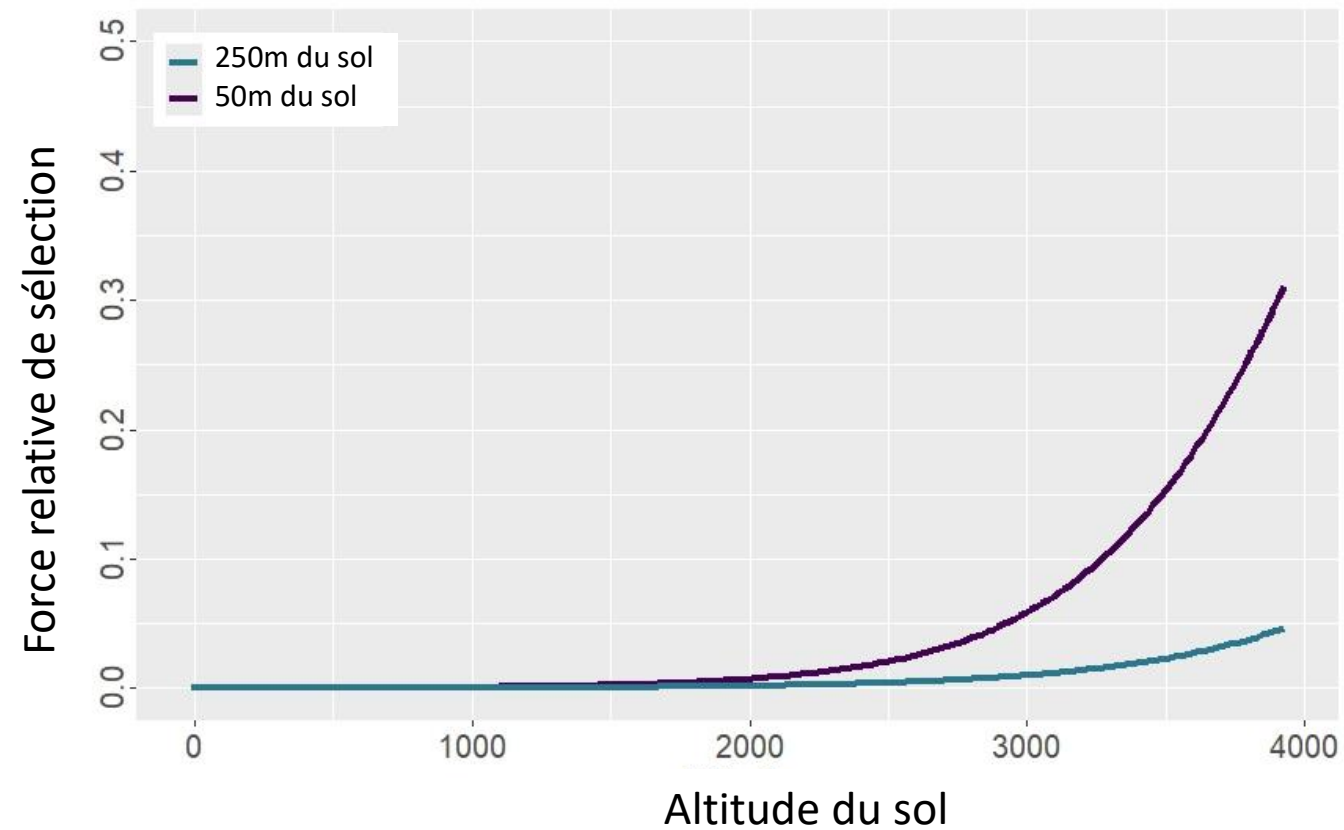
Résultats

Individus territoriaux



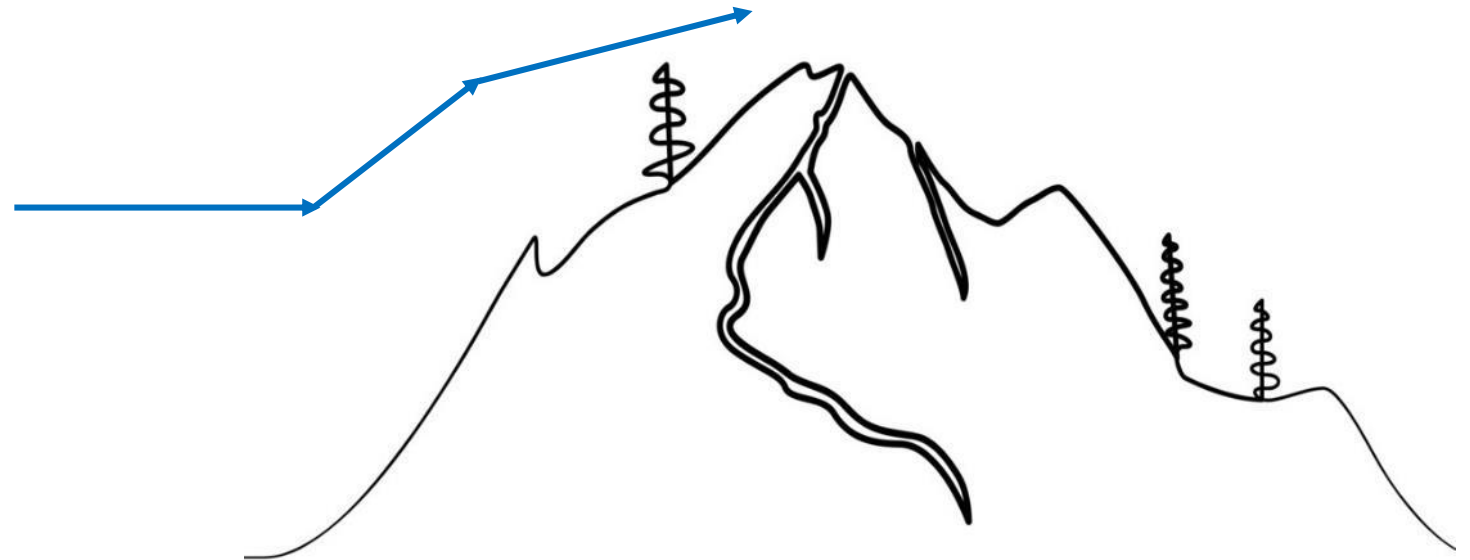
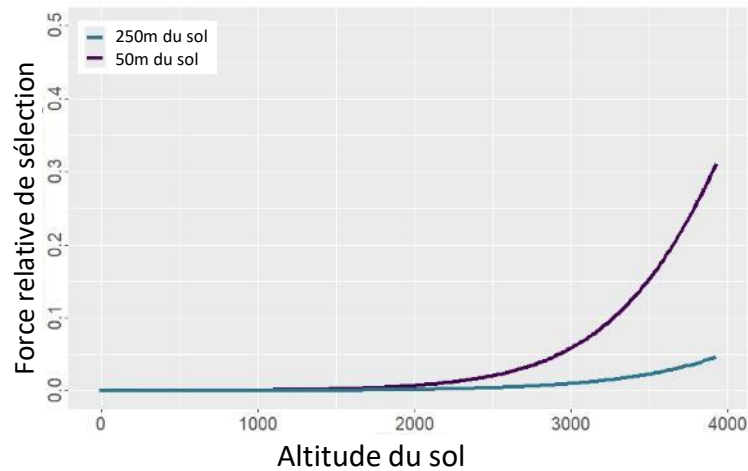
Résultats

Individus territoriaux



Résultats

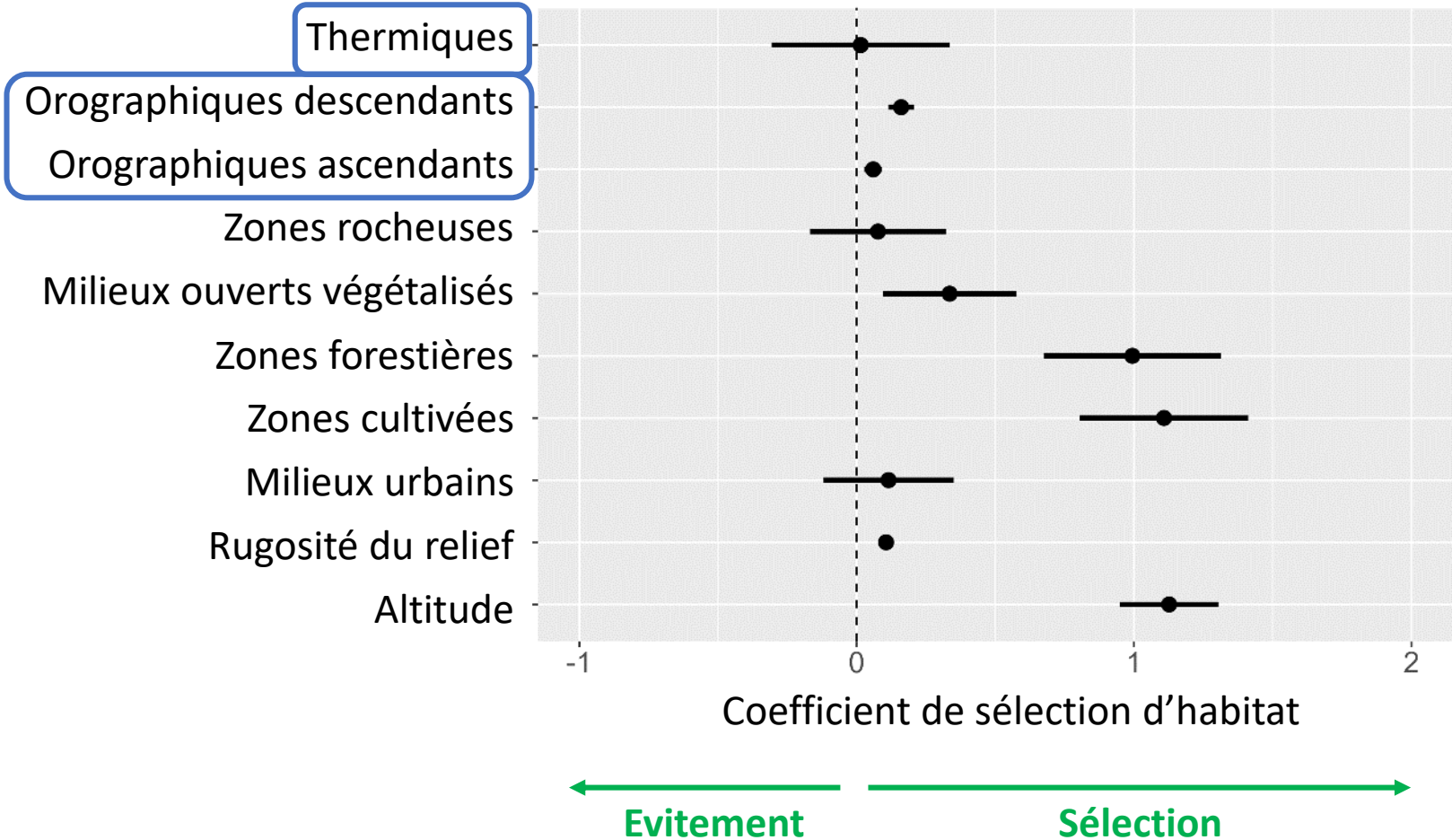
Individus territoriaux



Câbles aériens en zones de montagne

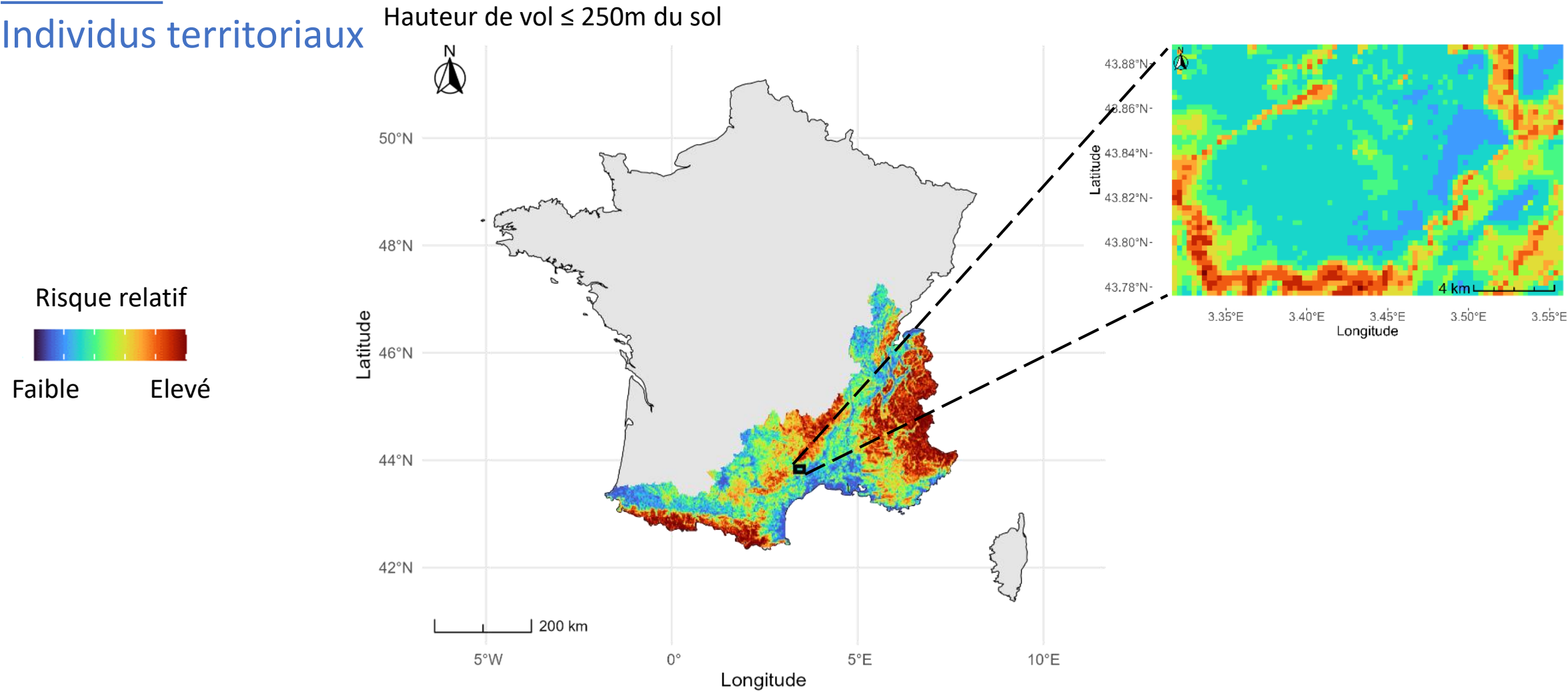
Résultats

Individus territoriaux



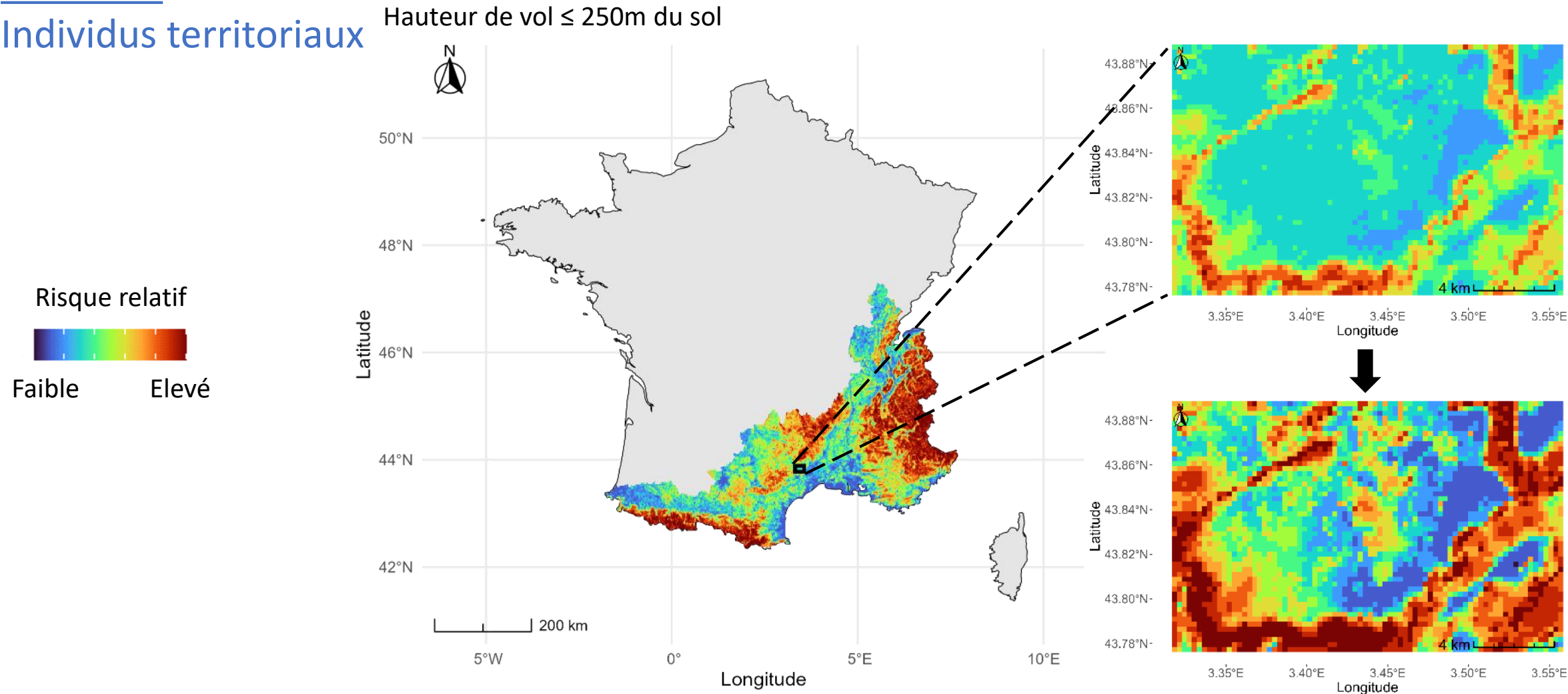
Résultats

Individus territoriaux



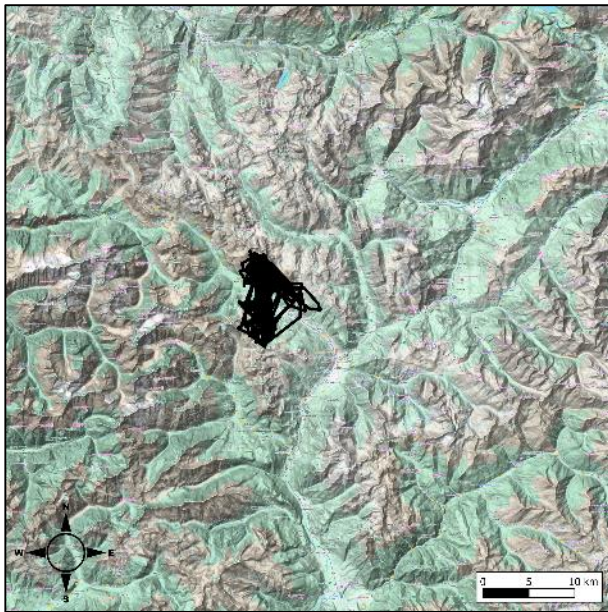
Résultats

Individus territoriaux

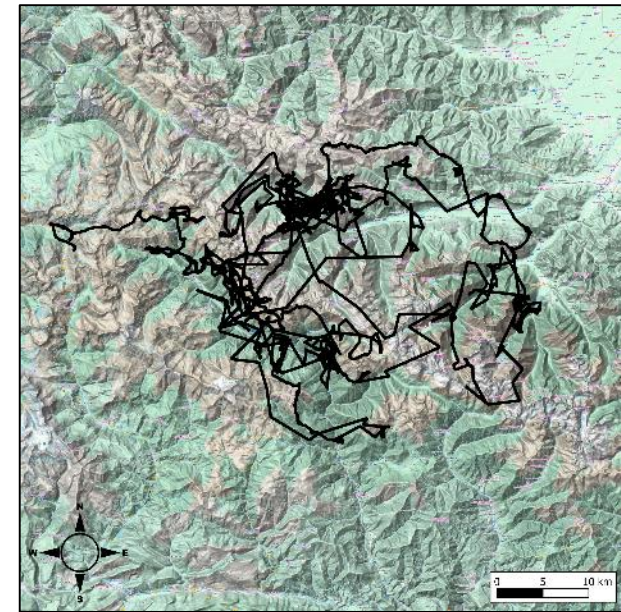


Partie II – Comparaison avec les aigles royaux erratiques

Aigle territorial

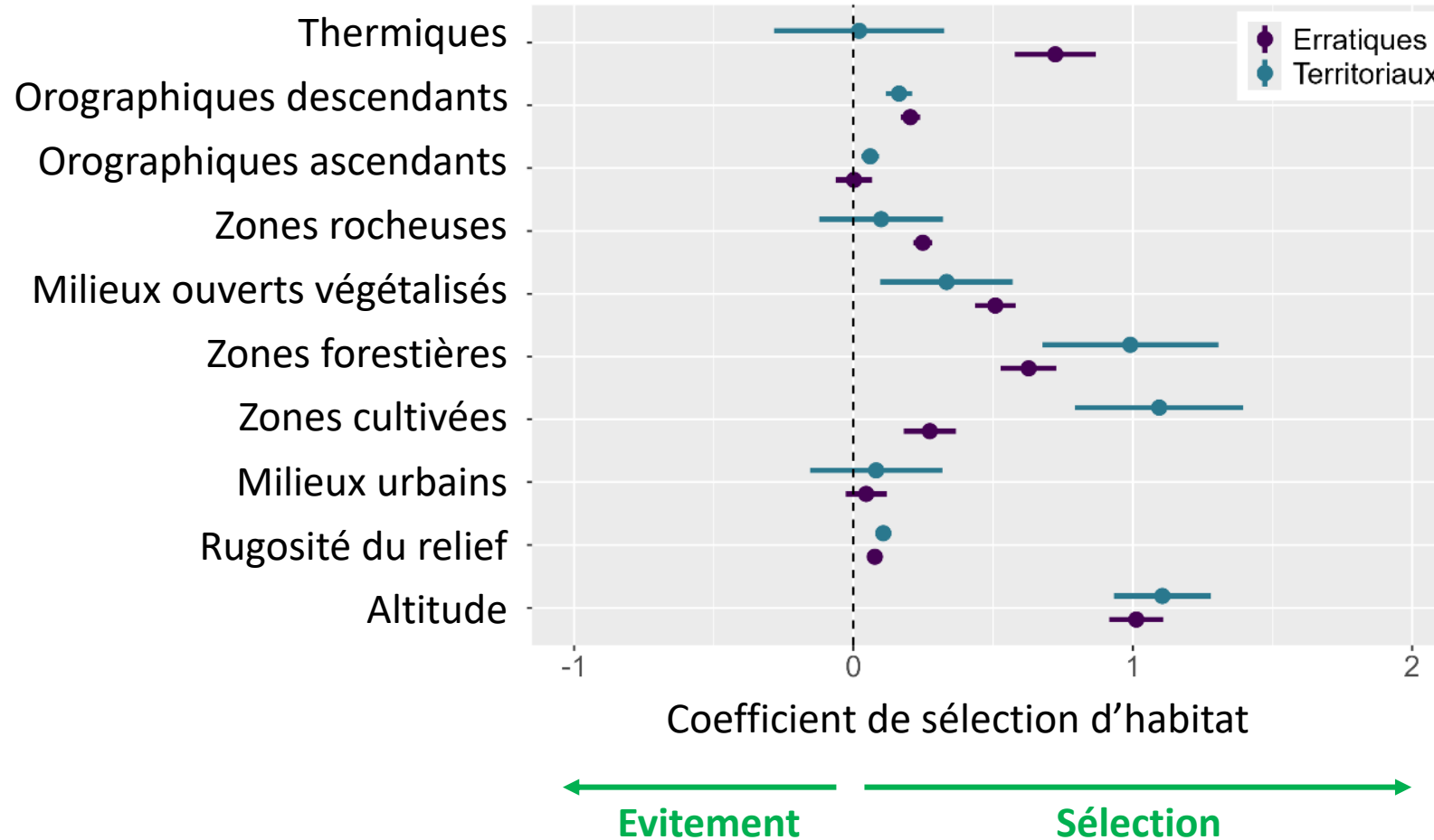


Individu en erratisme



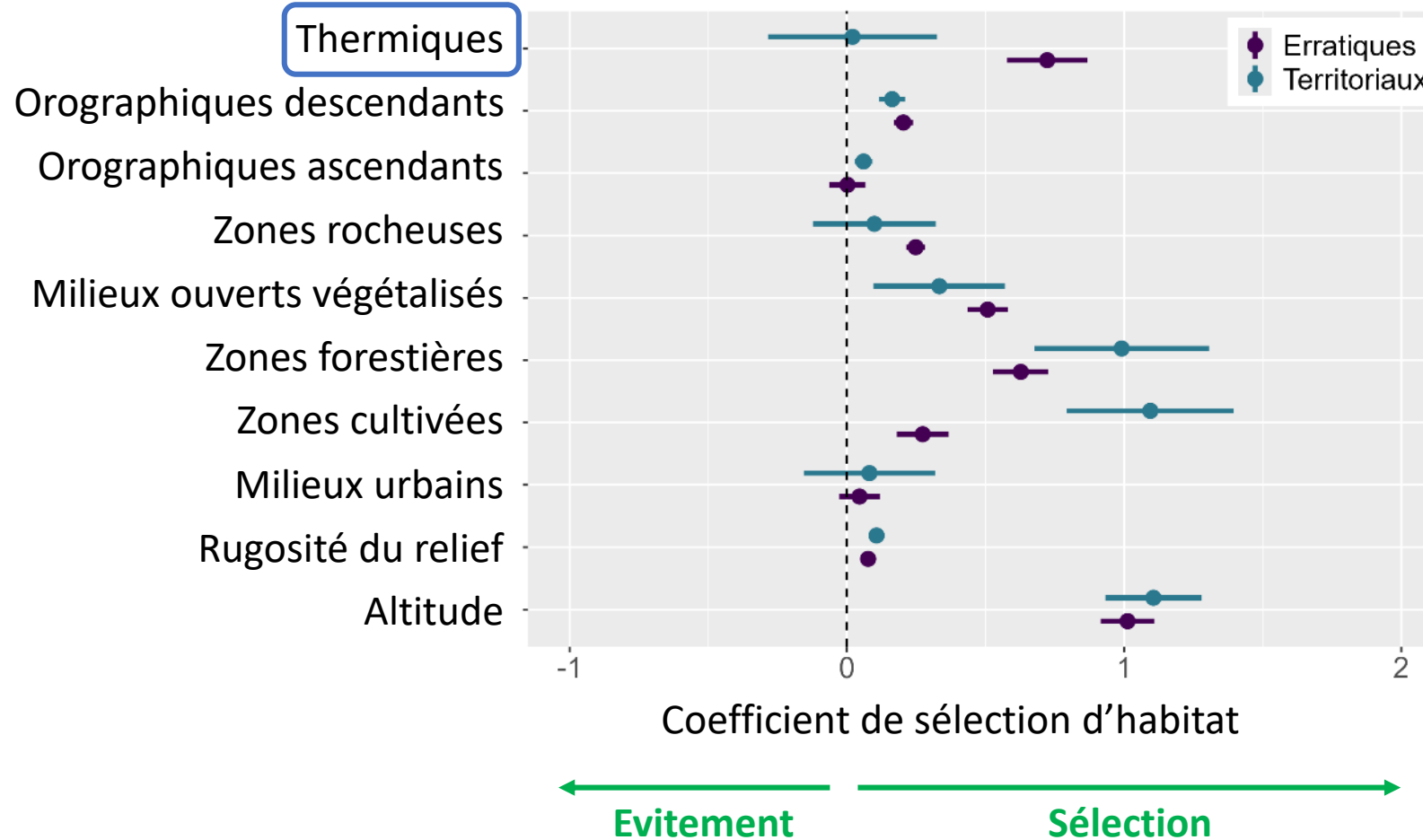
Résultats

Individus erratiques

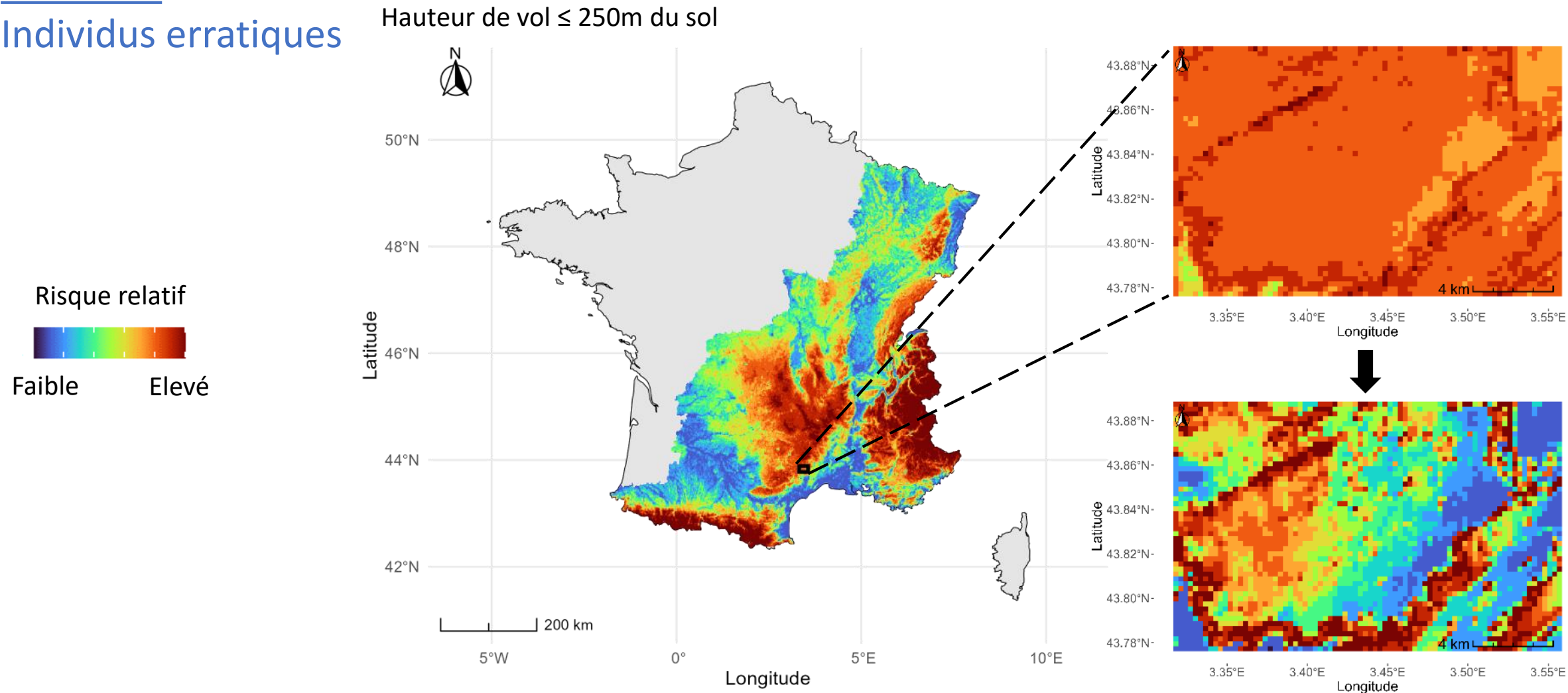


Résultats

Individus erratiques

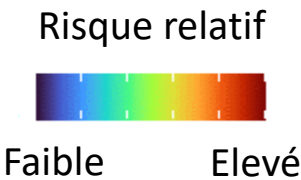


Résultats
Individus erratiques

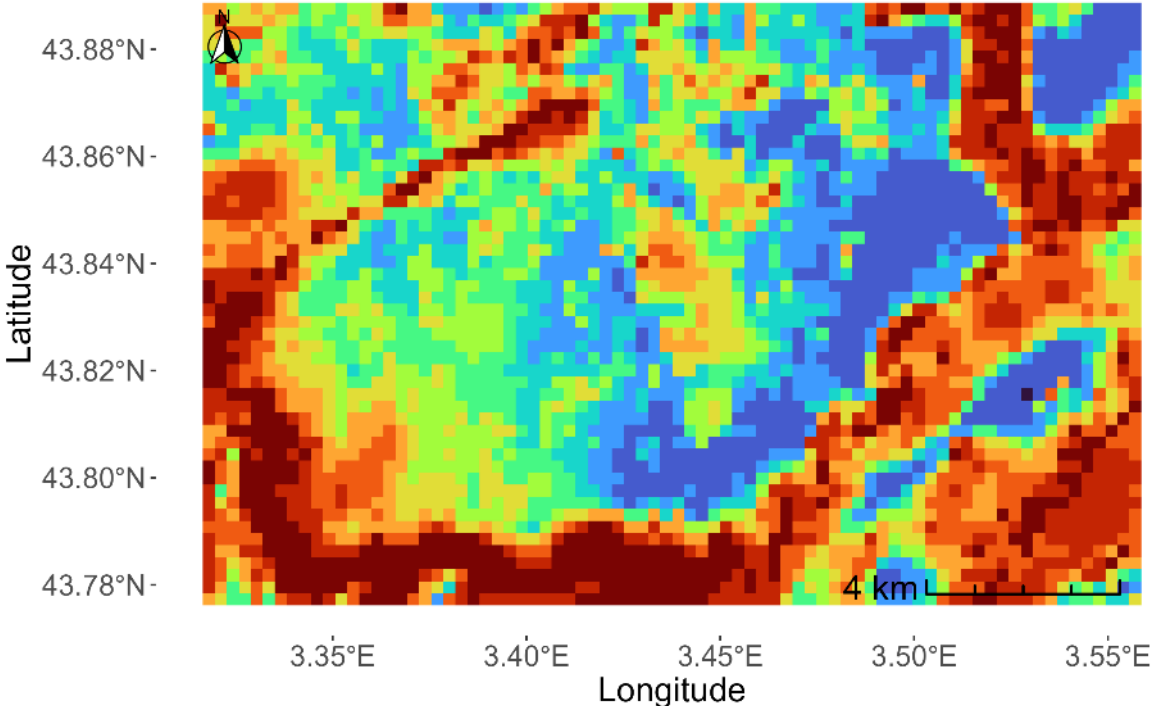


Résultats

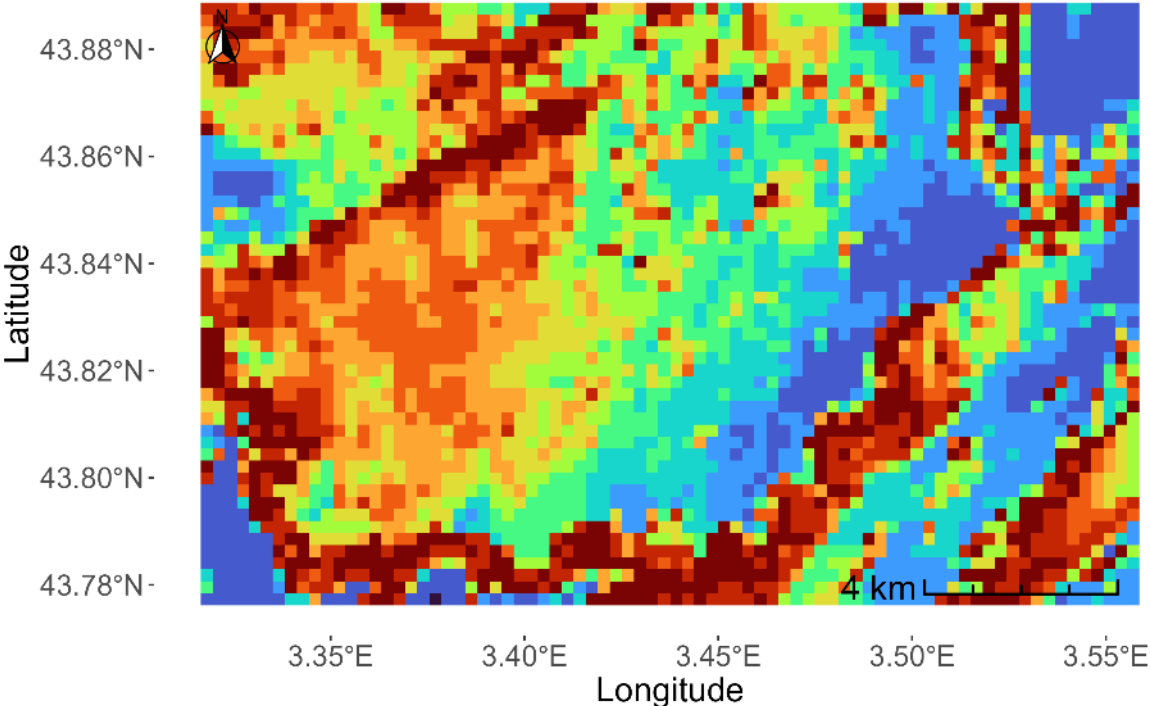
Individus territoriaux vs. erratiques



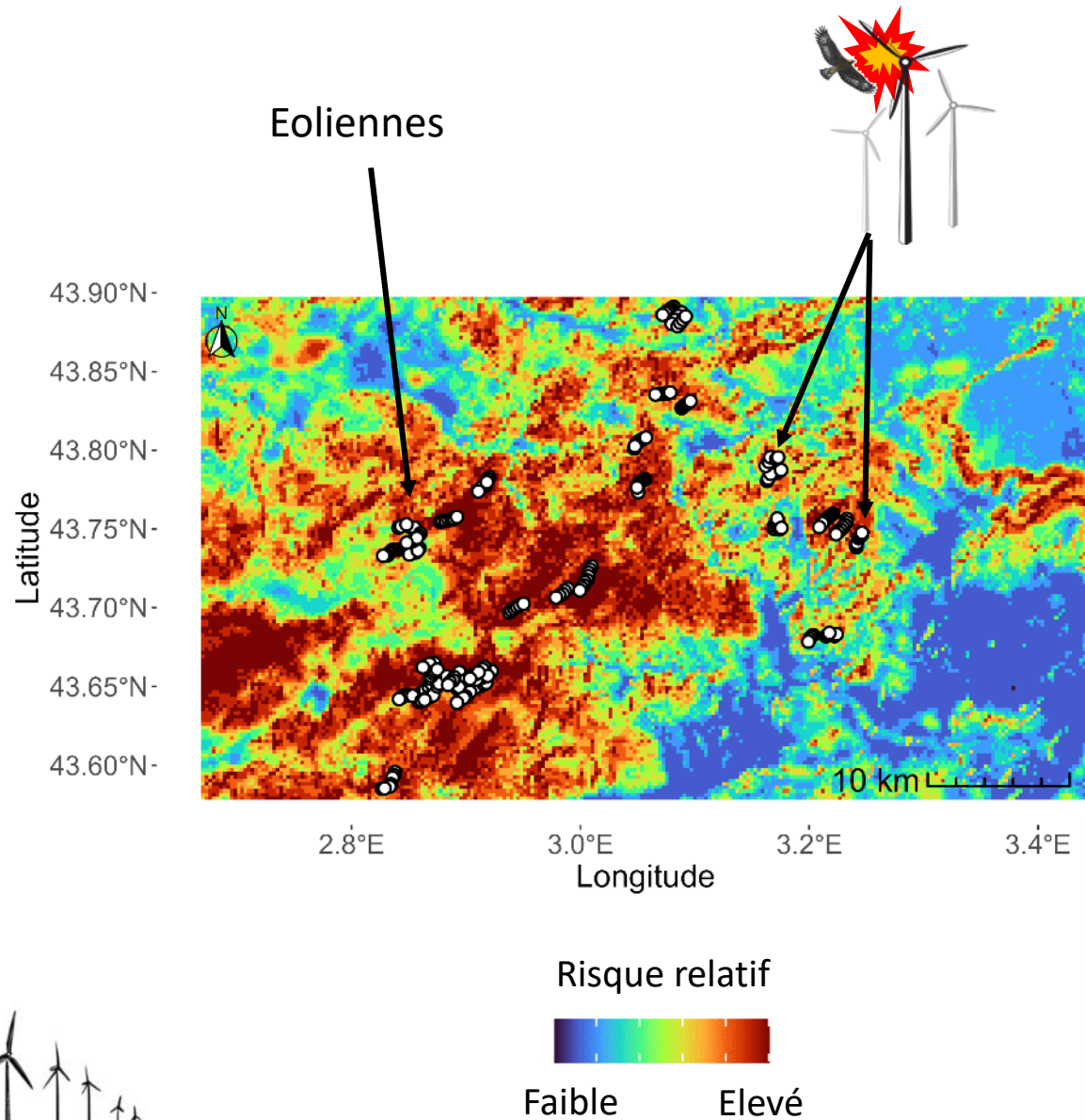
Aigles royaux territoriaux



Aigles royaux erratiques



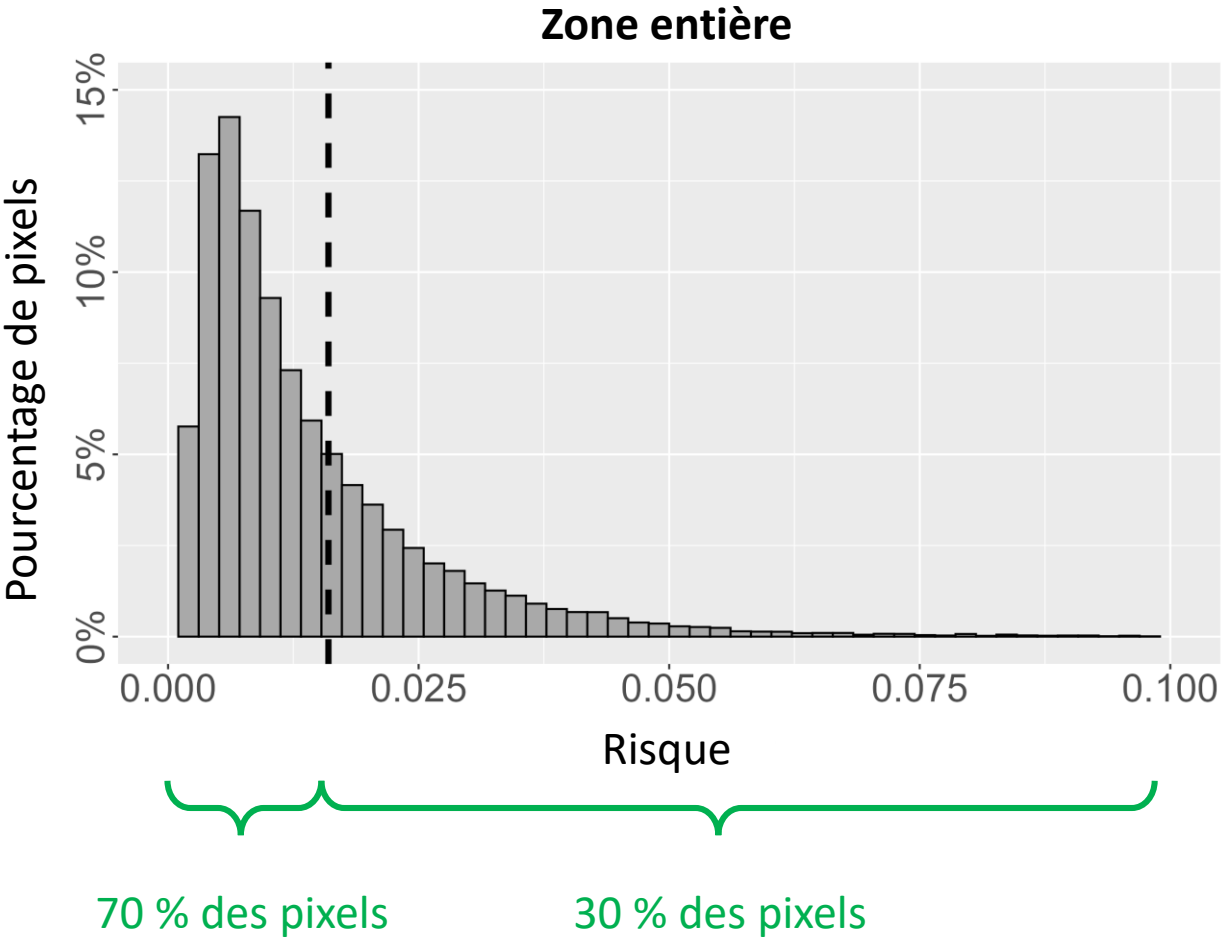
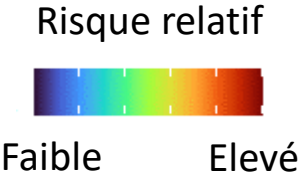
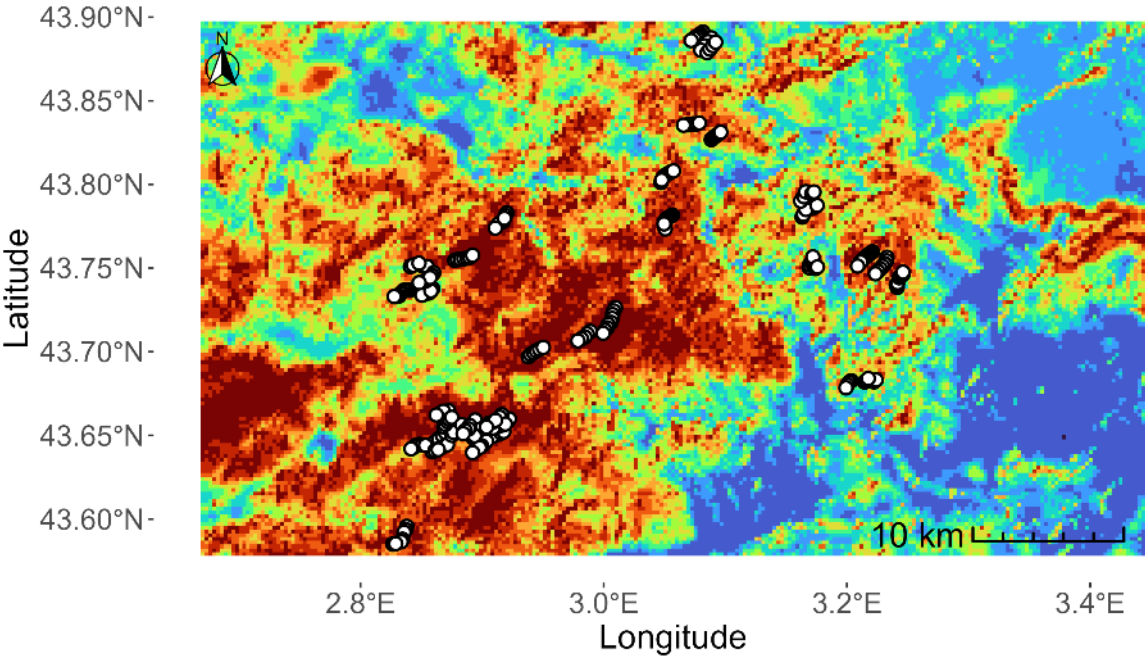
Partie II – Mise en application



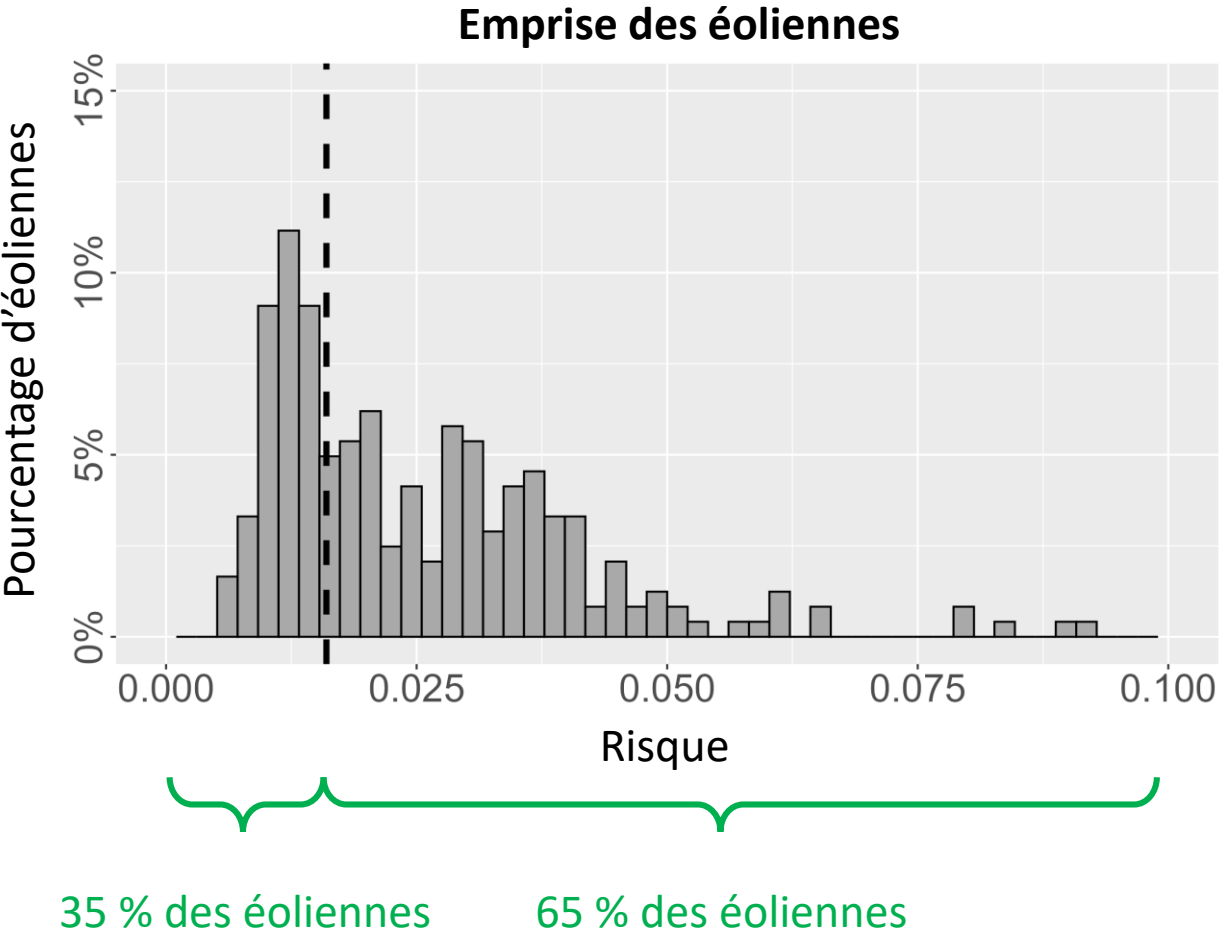
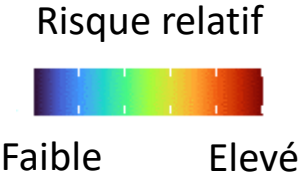
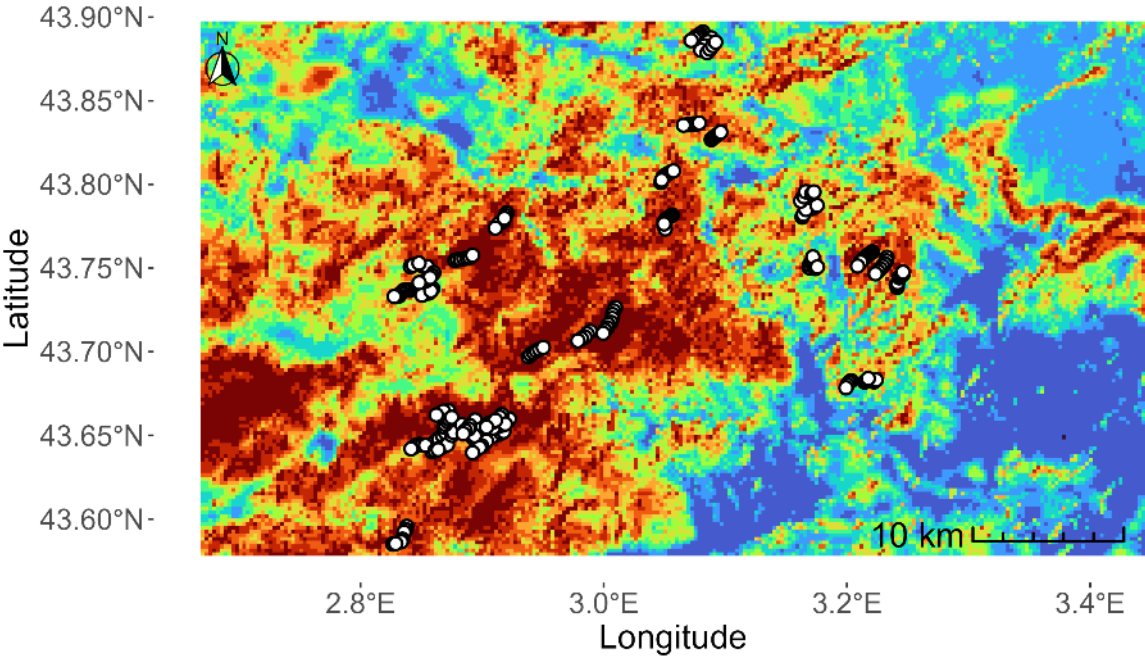
- Massif du Haut Languedoc :
 - 243 éoliennes
 - 10 territoires d'aigles royaux
 - 2 collisions documentées (GPS)



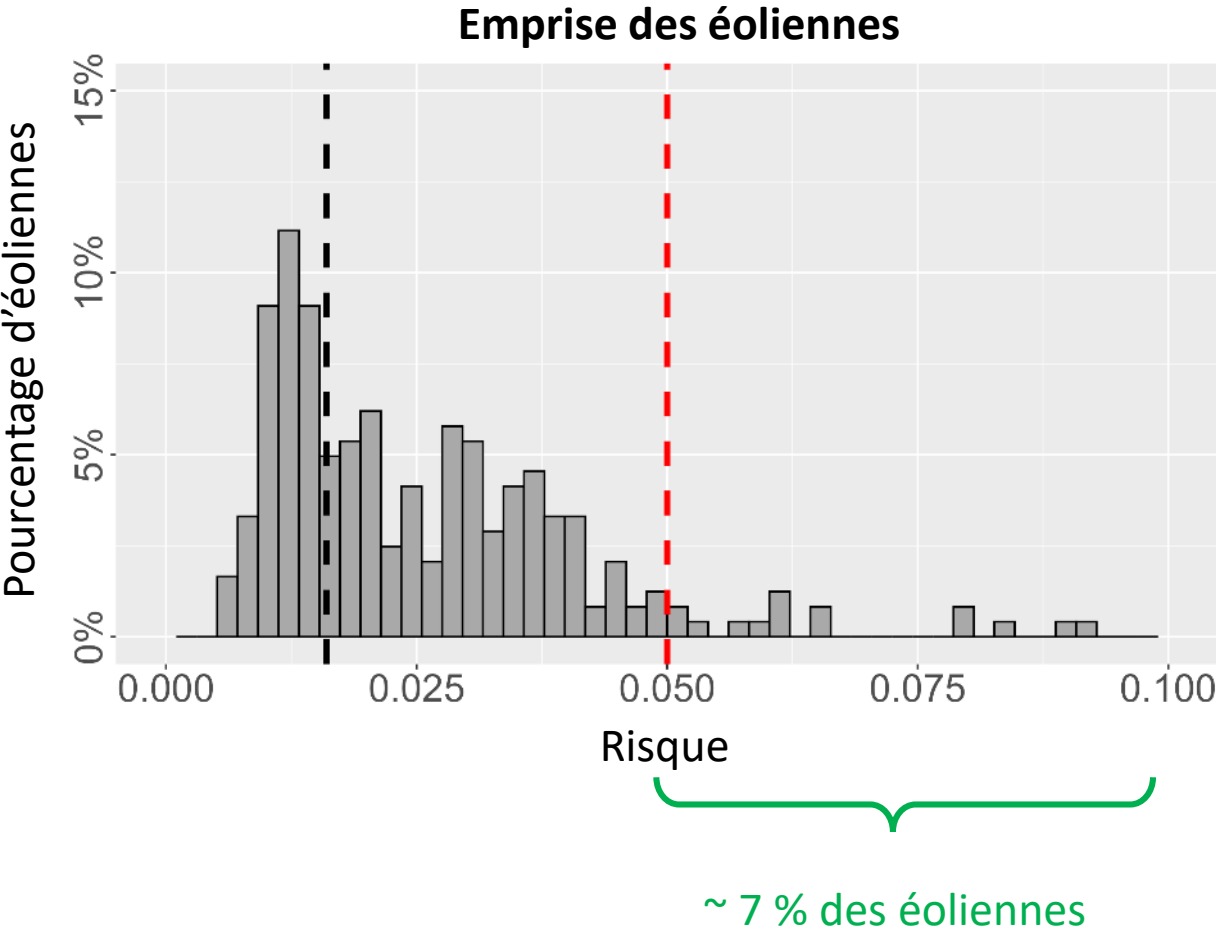
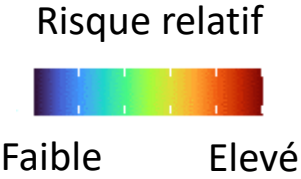
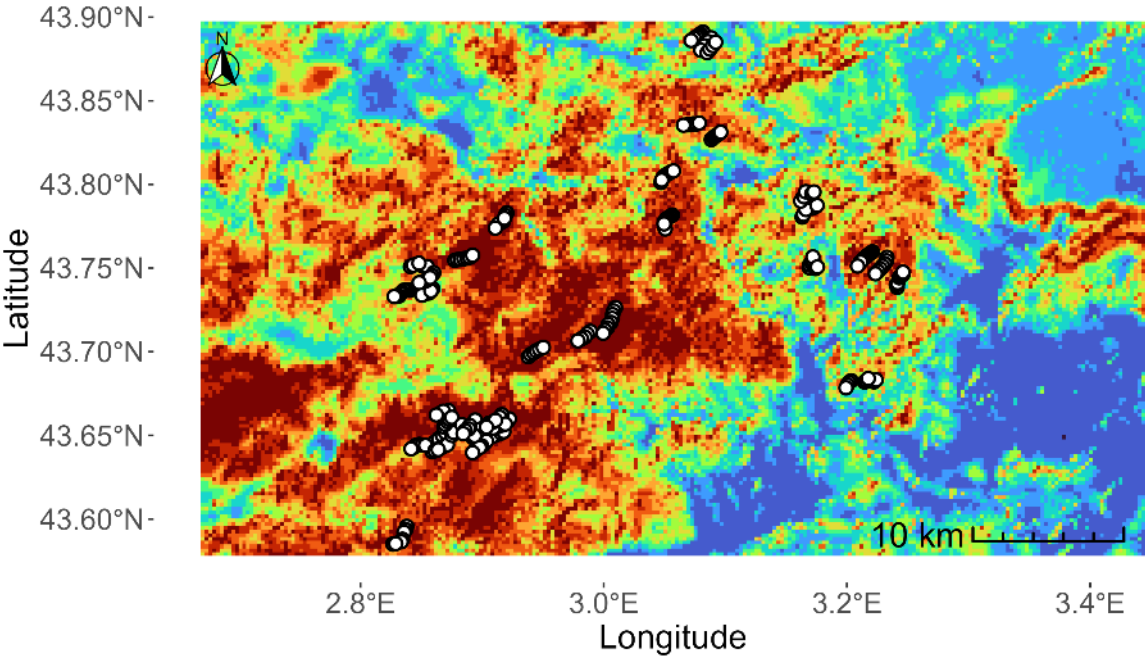
Partie II – Mise en application



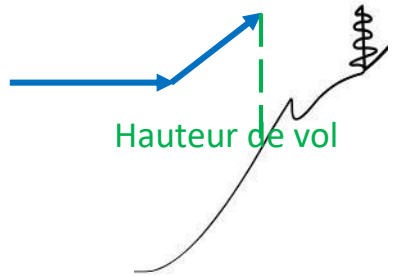
Partie II – Mise en application



Partie II – Mise en application



Mettre en évidence les zones à risque de collision avec les infrastructures aériennes



→ En utilisant les déplacements en 3D

→ A partir de variables pouvant influencer le vol



→ Possible de faire de la sélection d'habitats en 3D

Pour **prédire les zones** où les aigles sont en **conflit d'utilisation** de l'espace aérien



Juvénile en apprentissages

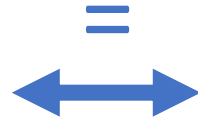
Adulte cantonné



Individus territoriaux



> 2 mois
post-envol



Juvénile en apprentissages

Adulte cantonné

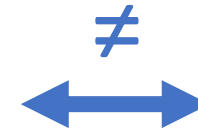
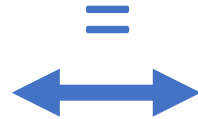
Jeune parti en erratisme



Individus territoriaux



> 2 mois
post-envol



Comportements spatiaux & classes d'âges → Exposition au risque différente ?

Juvénile en apprentissages

Adulte cantonné

Jeune parti en erratisme

> 2 mois
post-envol



Survie +

Survie +++

Survie +

Contribution au taux d'accroissement de la population

Discussion – Une thèse multi-approches

○ Ecologie fondamentale



Etude de la période d'apprentissages



Vol ascendant ?
Tutoré vs. autonomie ?



Discussion – Une thèse multi-approches

- Développement méthodologique



Extension en 3D des iSSF

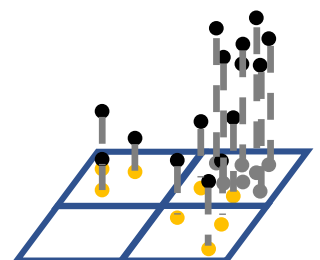
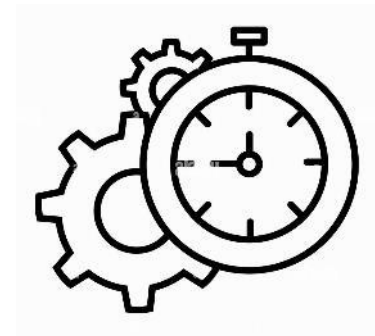


Chronophage
&

Besoin de puissance de calcul



DATA CENTER



- Développement méthodologique

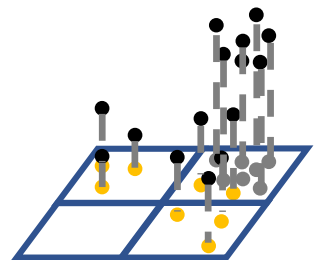


Extension en 3D des iSSF



DATA CENTER

Des améliorations possible :
cartes d'incertitude



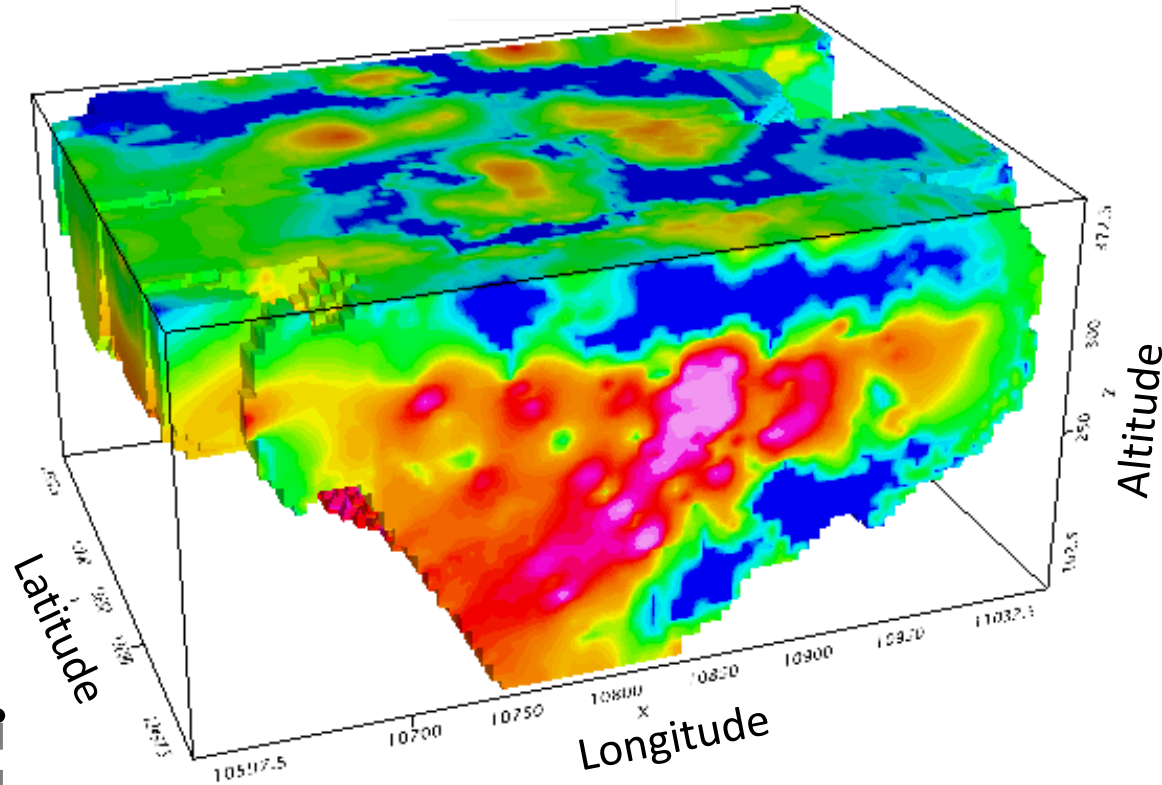
- Développement méthodologique



Extension en 3D des iSSF



Mais limites encore existantes :
résolution spatiale des variables
d'habitat aérien



Risque relatif



Faible

Elevé

- Ecologie appliquée



Création d'un outil d'aide à l'évitement / à la réduction

- En accès libre sur internet :

- Site web en cours de construction
- Atelier en janvier avec des participants de MAPE

mape^Y



Aurélien Besnard



Olivier Duriez

- Ecologie appliquée



Création d'un outil d'aide à l'évitement / à la réduction

- En accès libre sur internet :

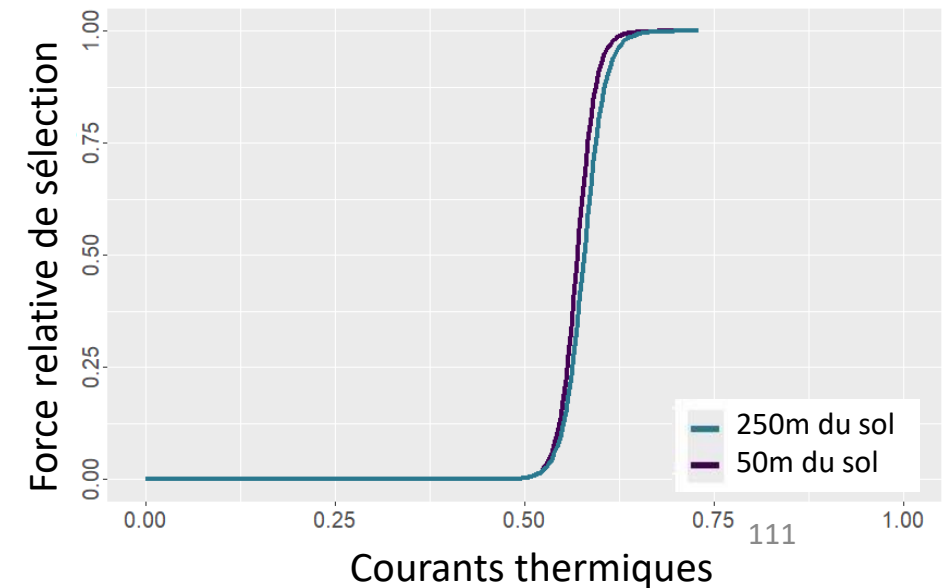
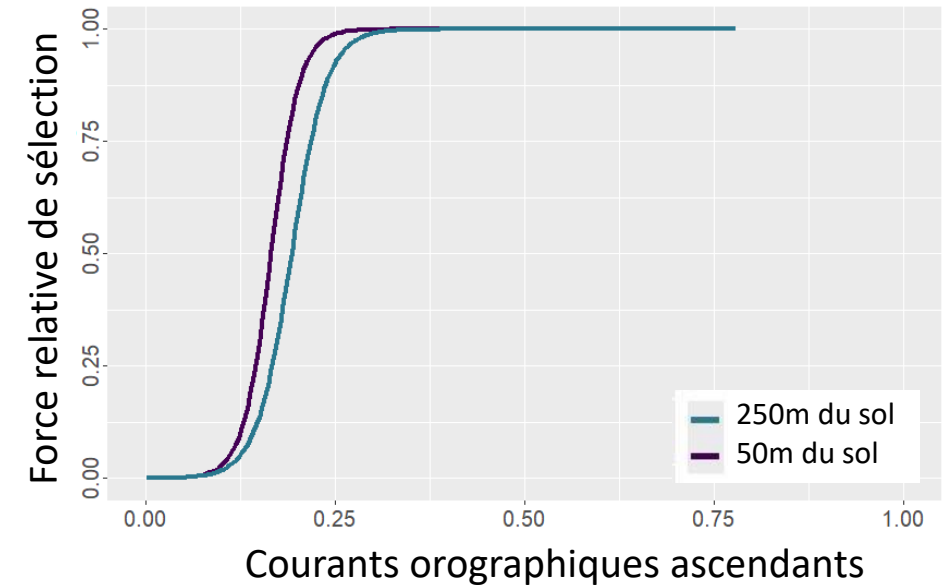
- Cartes en LizMap, associées à des aides
- Courants aériens, aigles royaux et vautours fauves



Exemple de LizMap avec les orographiques

Démarche reproductible à d'autres espèces

- Testée sur le vautour fauve
 - Sélection d'habitats différentes : fort effet des courants ascendants

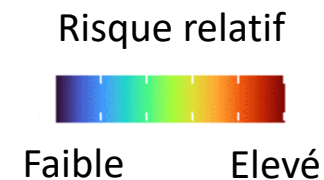


Démarche reproductible à d'autres espèces

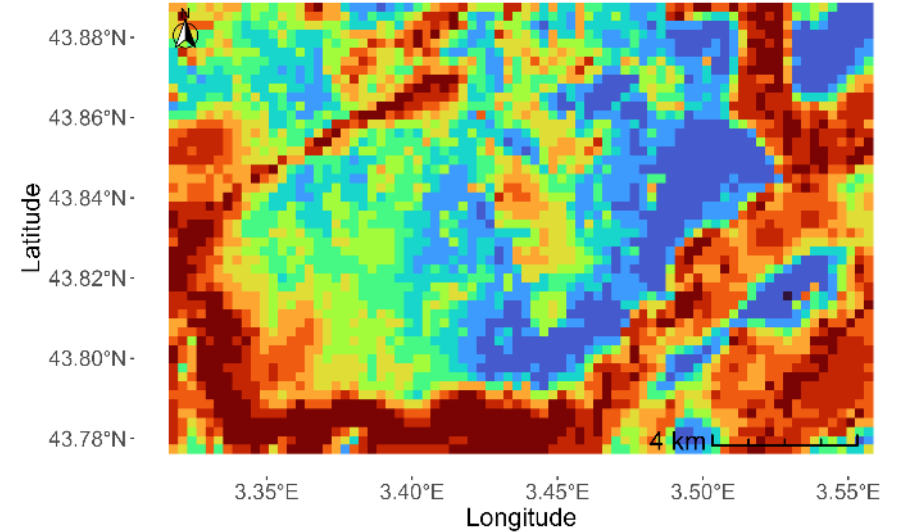
- Testée sur le vautour fauve
 - Sélection d'habitats différentes : fort effet des courants ascendants
 - Cartes de prédiction du risque de collision différentes



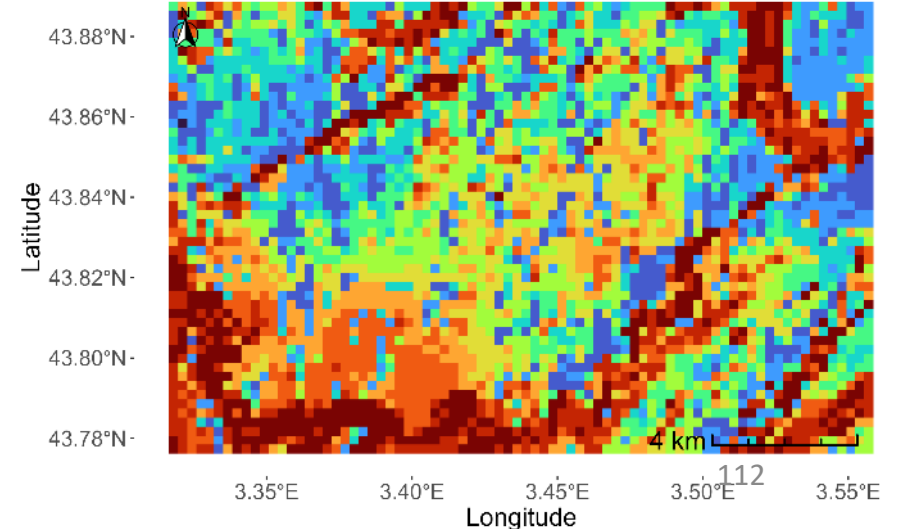
Comment choisir ?



Aigles royaux territoriaux



Vautours fauves



Questions de politiques publiques

- Comment fait-on quand plusieurs espèces « à enjeux » fréquentent la zone retenue ?
 - Comment hiérarchiser les espèces ?
 - Quels critères pour aider à la prise de décision ?
 - Comment fixer ces critères ?

Exemple du milan royal :

- Forte responsabilité de la France à l'échelle internationale (20% des effectifs)
- Des dizaines de mortalités dues aux éoliennes dans le N-E de la France



Merci pour votre attention



Parc national
des Ecrins

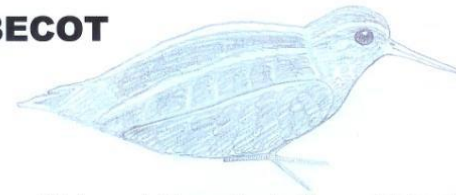
mape^Y

ADEME



AGENCE DE LA
TRANSITION
ÉCOLOGIQUE

BECOT



Baguage et Etudes pour la Conservation des Oiseaux et de leurs Territoires

Rte