

# 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) - Examinateur

Alexandre MILLON (MC AMU IMBE) - Examinateur

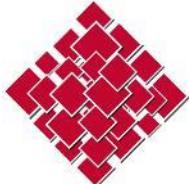
Directeur de thèse : Aurélien BESNARD (DE EPHE CFE)

Co-directeurs de thèse : Olivier DURIEZ (MC UM CFE)  
& Pierre-Yves HENRY (Prof. MNHN MECDEV)

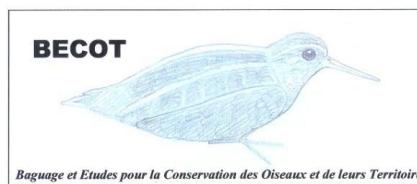
Partenaire : Christian ITTY (association BECOT)



CENTRE D'ECOLOGIE  
FONCTIONNELLE  
& EVOLUTIVE



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

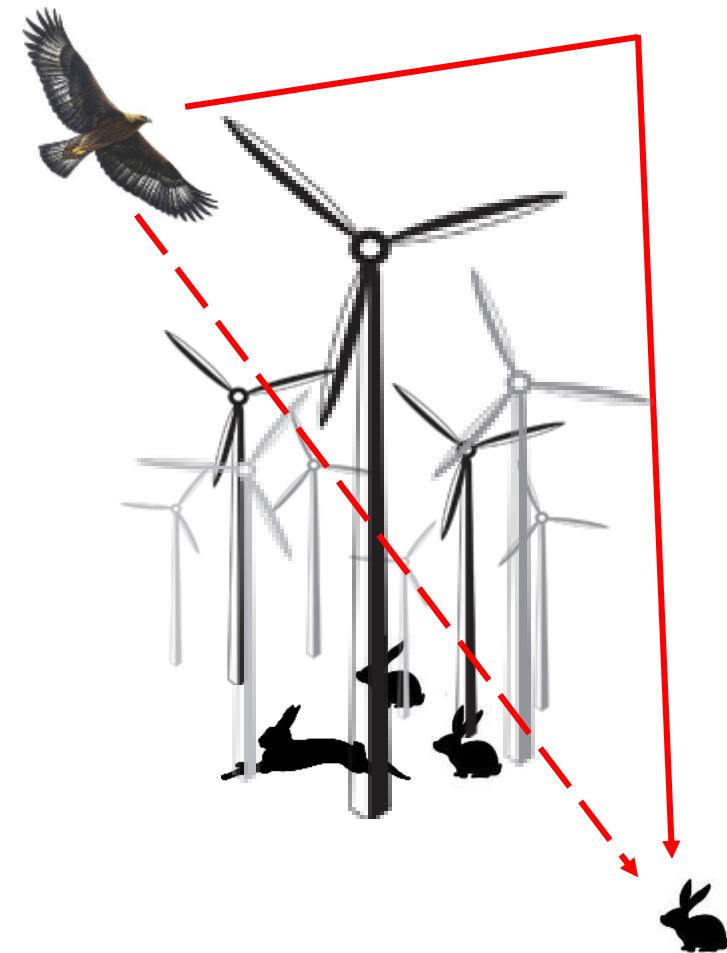


- Impacts directs

- Mortalités par électrocution, collision ou percussion

- Impacts indirects

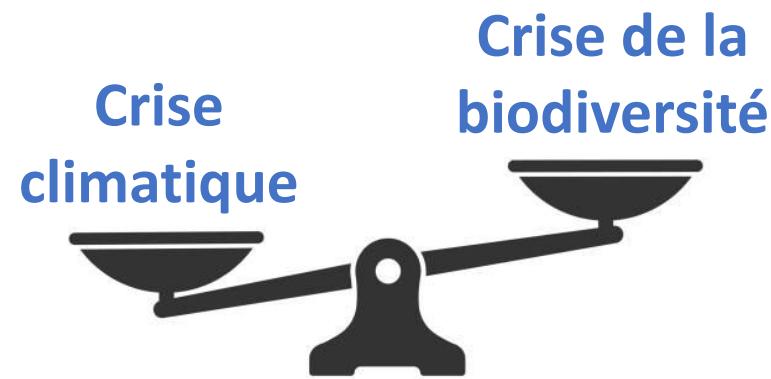
- Pertes d'habitats
  - Modifications des couloirs de circulation



# Introduction – Le « Green - Green Dilemma »

---

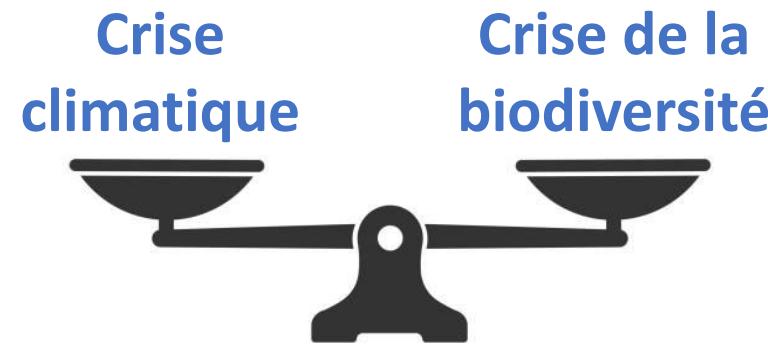
- Impacts & pertes de biodiversité → Viabilité des populations ?



# Introduction – Le « Green - Green Dilemma »

---

- Impacts & pertes de biodiversité → Viabilité des populations ?



- Rapaces particulièrement impactés

- Petites populations
- Espèces longévives



Démographie sensible aux mortalités additionnelles



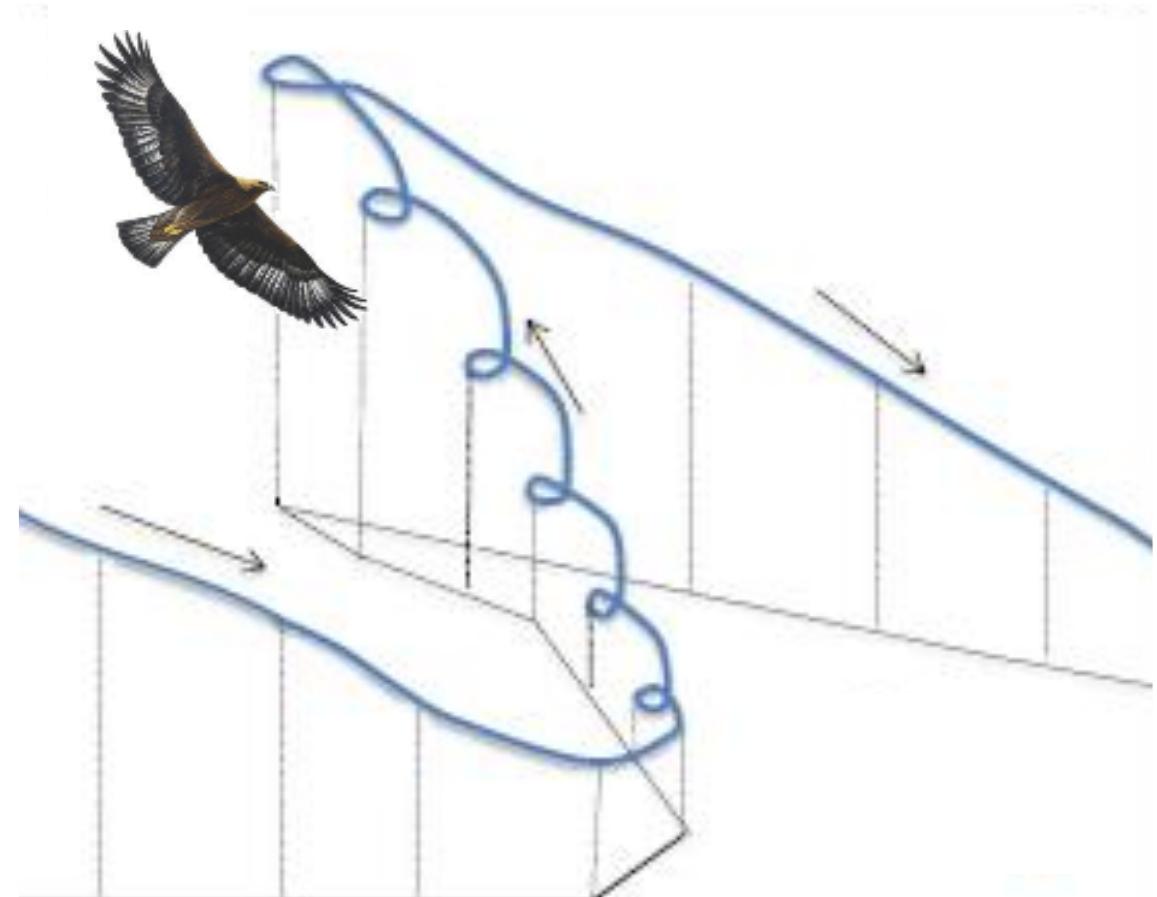
*Crédit : LPO Hérault*

## 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

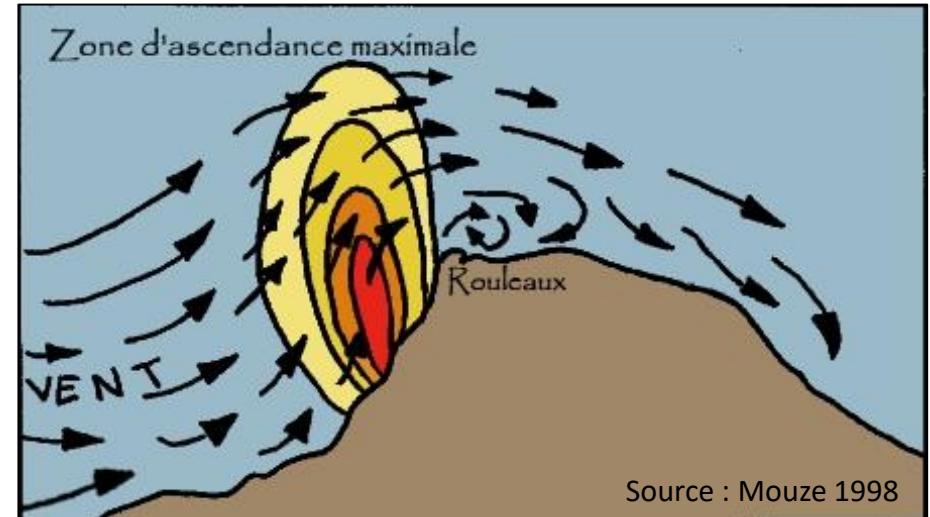


Source : [www.nps.gov](http://www.nps.gov)

## Courants aériens

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

Orographiques



Source : Mouze 1998

## 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 ?

- Besoin de planification

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



- Besoin de planification

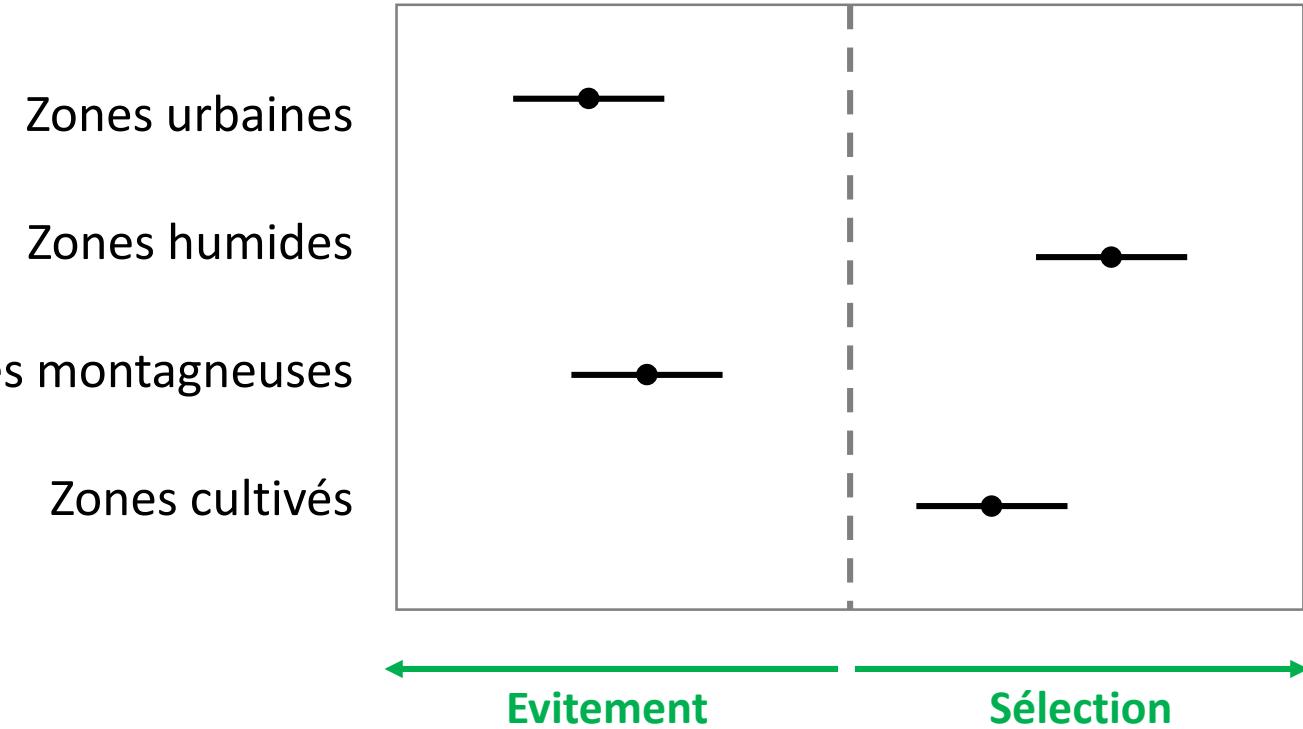
- Eviter de construire dans des secteurs à risque
- « prédire le risque de collision » = mettre en évidence les secteurs à risque



Comprendre comment les oiseaux utilisent l'espace et les habitats

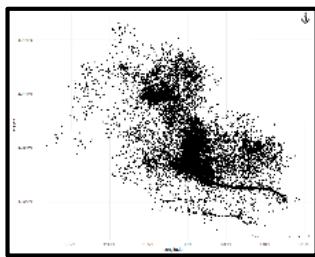


# Introduction – La sélection d'habitats

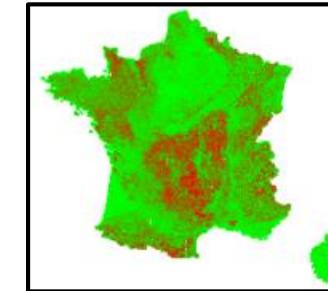


Grue cendrée

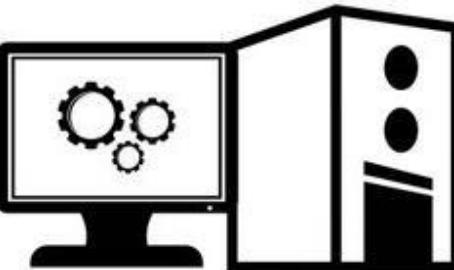
Localisations animales



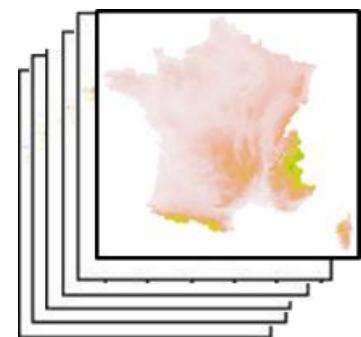
Distribution potentielle



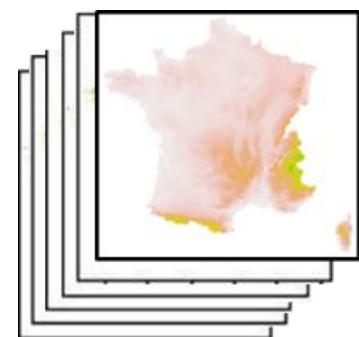
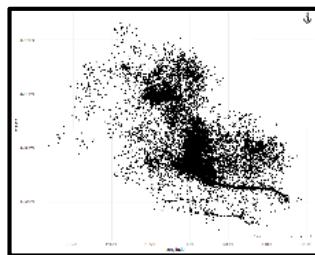
Modèles statistiques



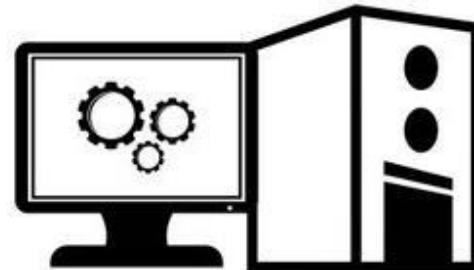
Variables environnementales



## Localisations animales

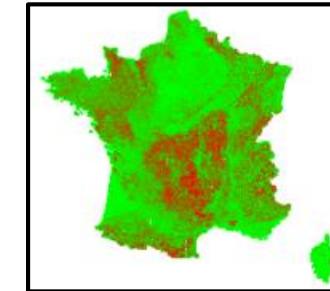


## Variables environnementales



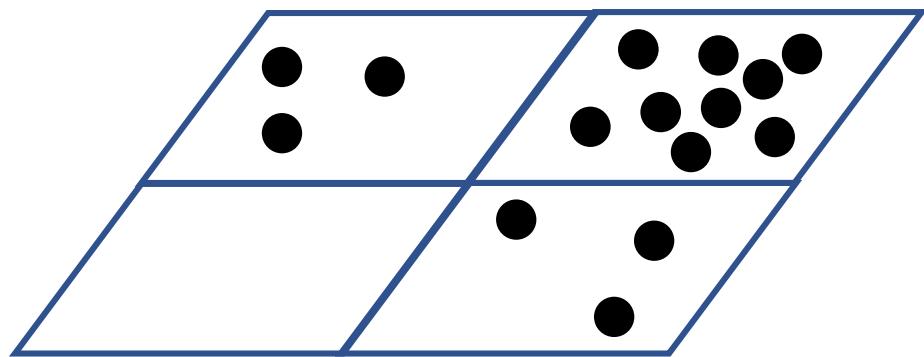
## Modèles statistiques

## Distribution potentielle

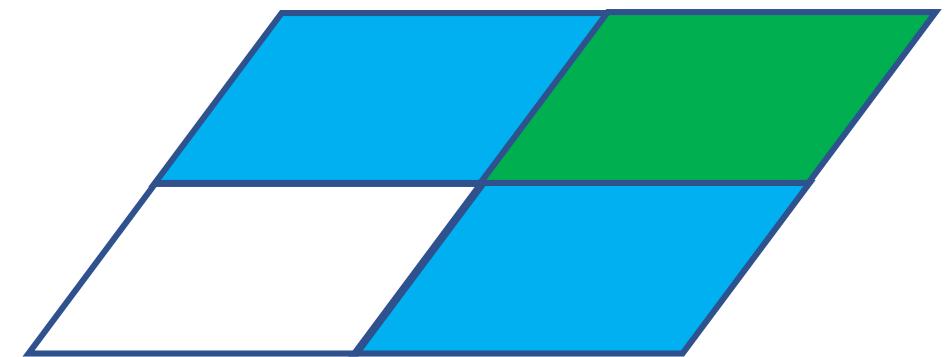
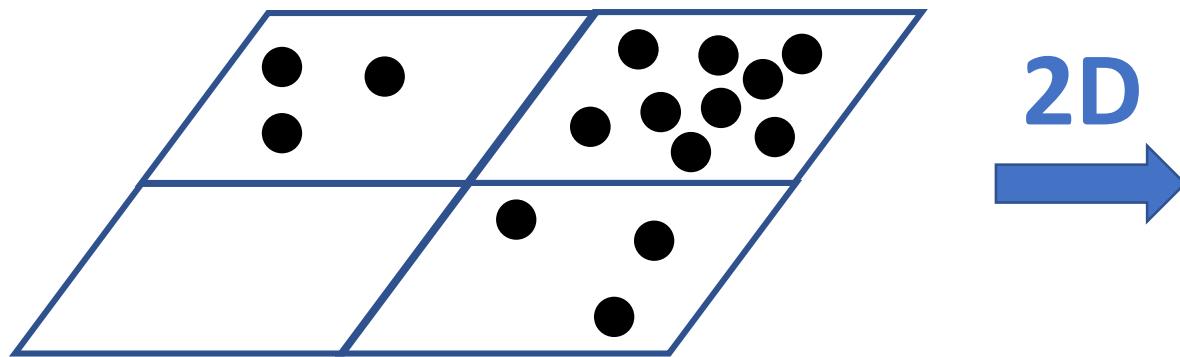


- Modèles développés à partir de suivis d'animaux terrestres
- Imparfaits pour les animaux aériens

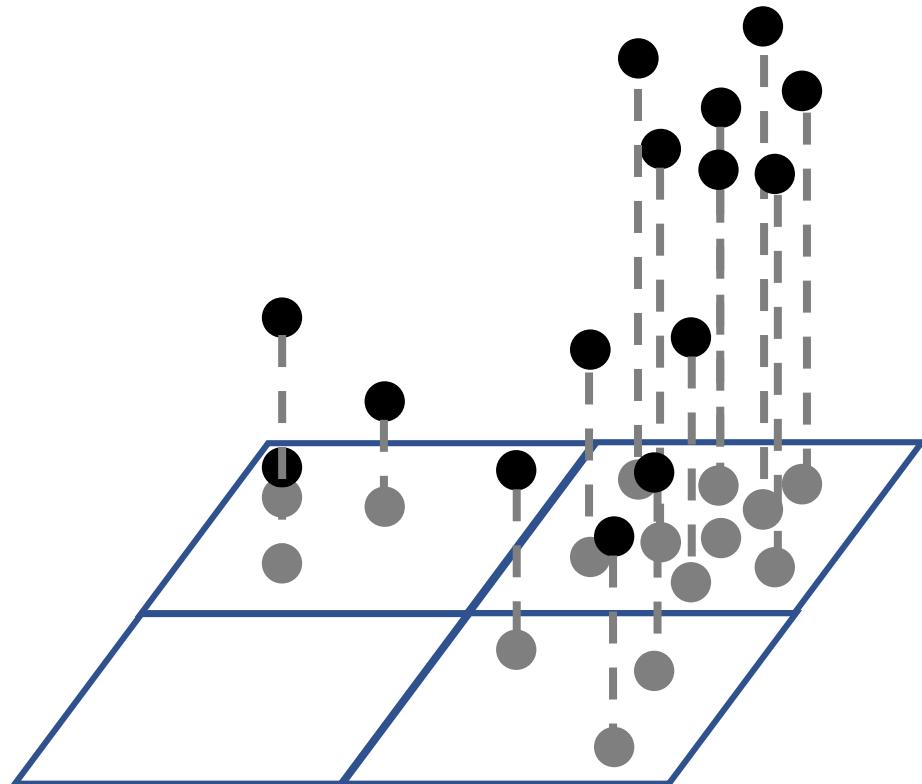
- Sélection d'habitats en 2D



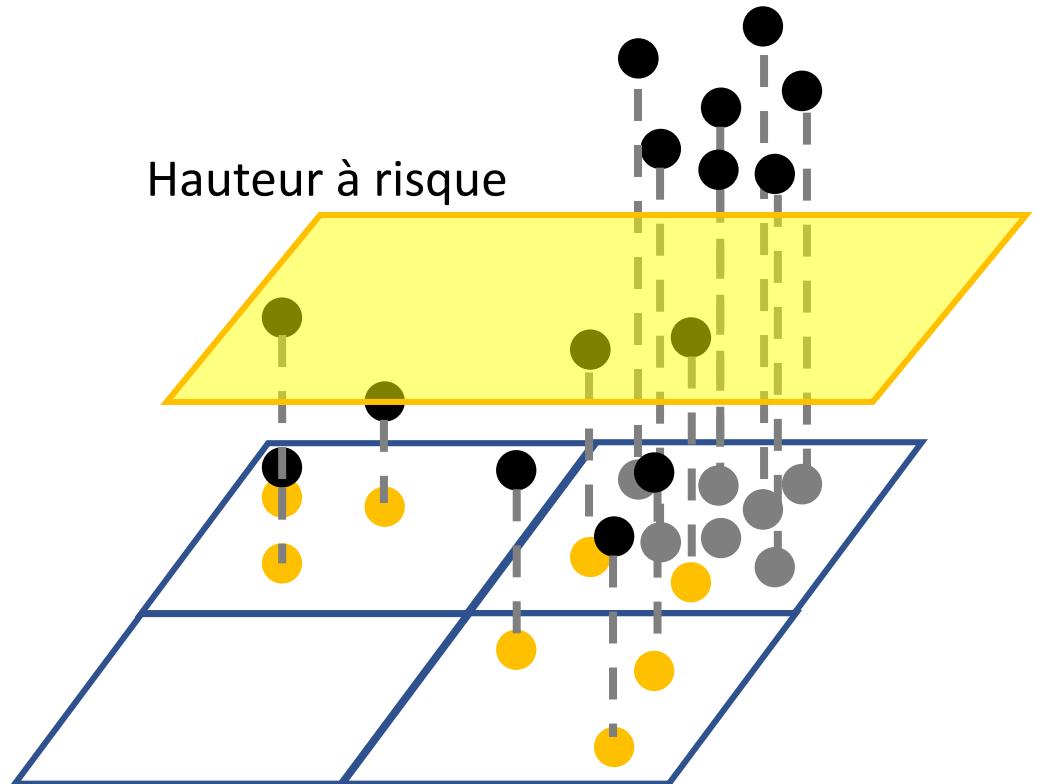
- Sélection d'habitats en 2D



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

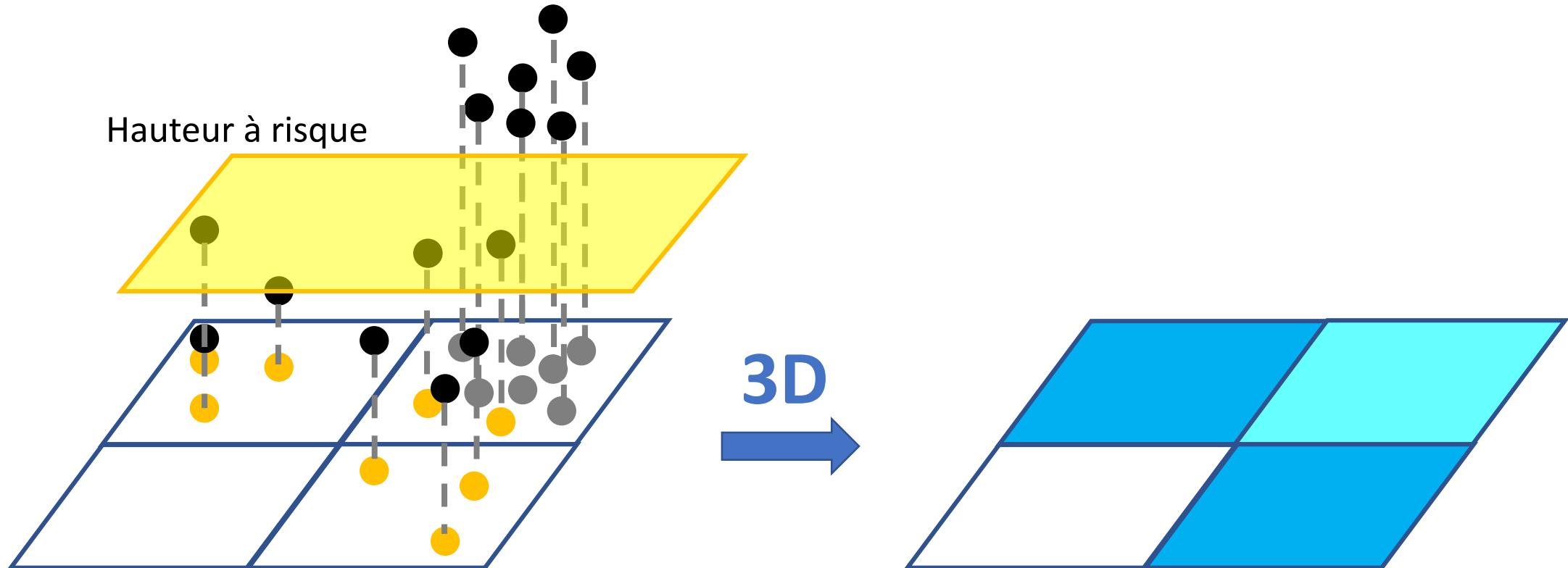


- Sélection d'habitats en 3D : en tenant compte de la hauteur de vol



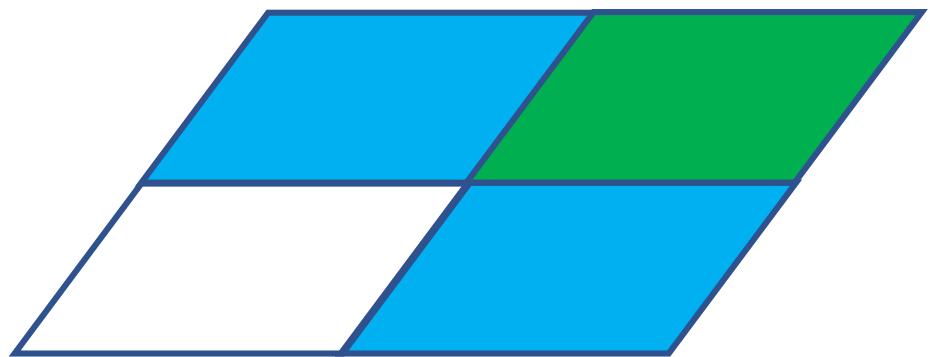
- Sélection d'habitats en 3D : en tenant compte de la hauteur de vol

Sélection  
→  
[cyan] [blue] [green]

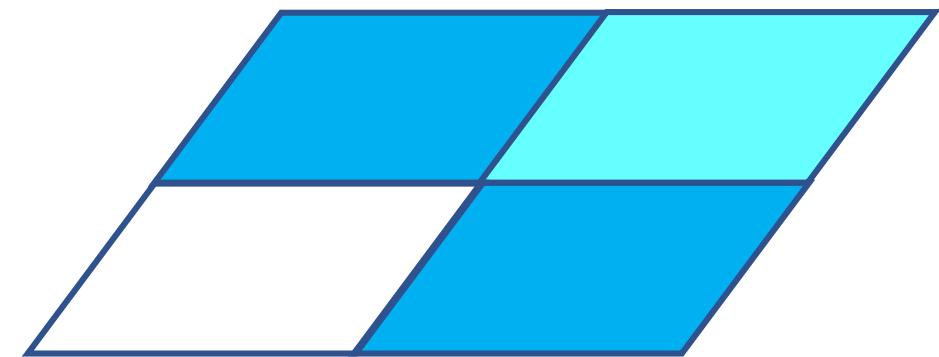


- Sélection d'habitats en 2D vs. en 3D

Sélection  
→  
■ ■ ■



**2D**



**3D**

Biais de sélection : sur ou sous-estimation

# 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

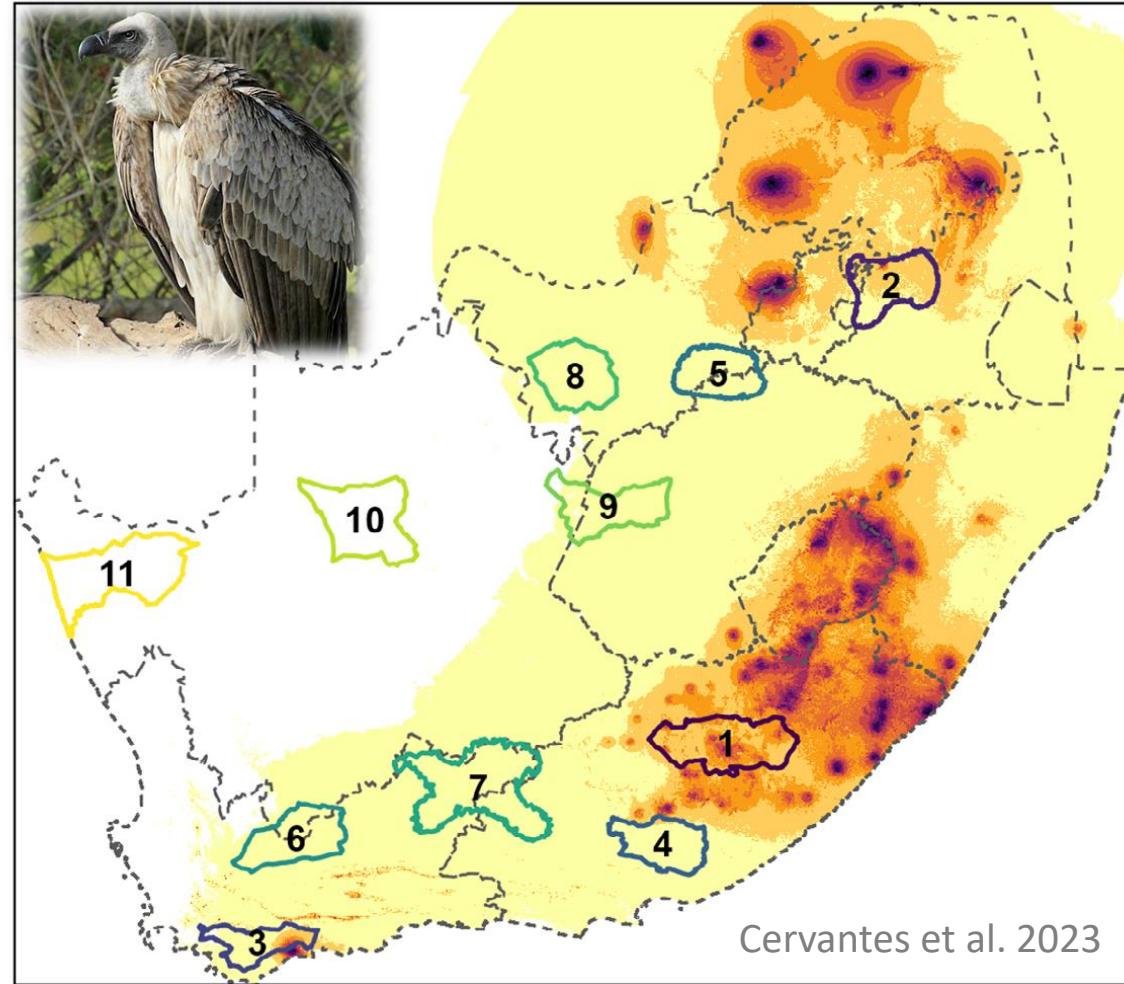


Occupation du sol



Courants aériens

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



## 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 ( $\emptyset$  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 ( $\emptyset$  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**



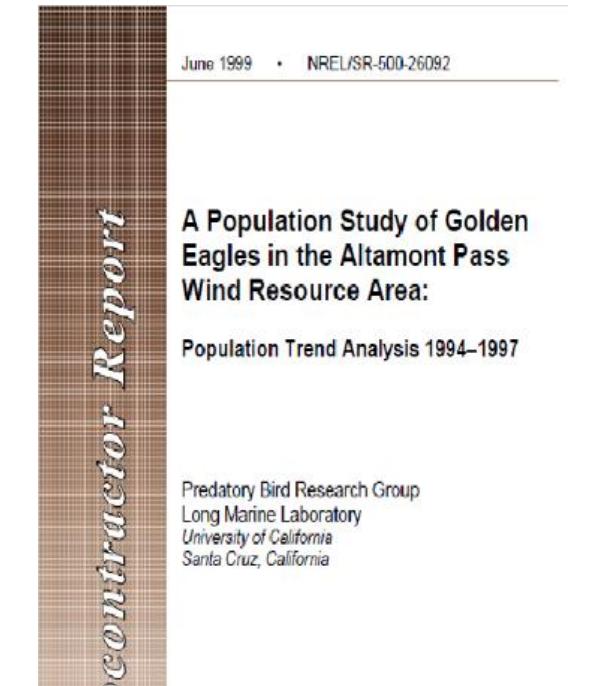
*Crédit : Felix Michaud*



*Crédit : Patrick Damiano*

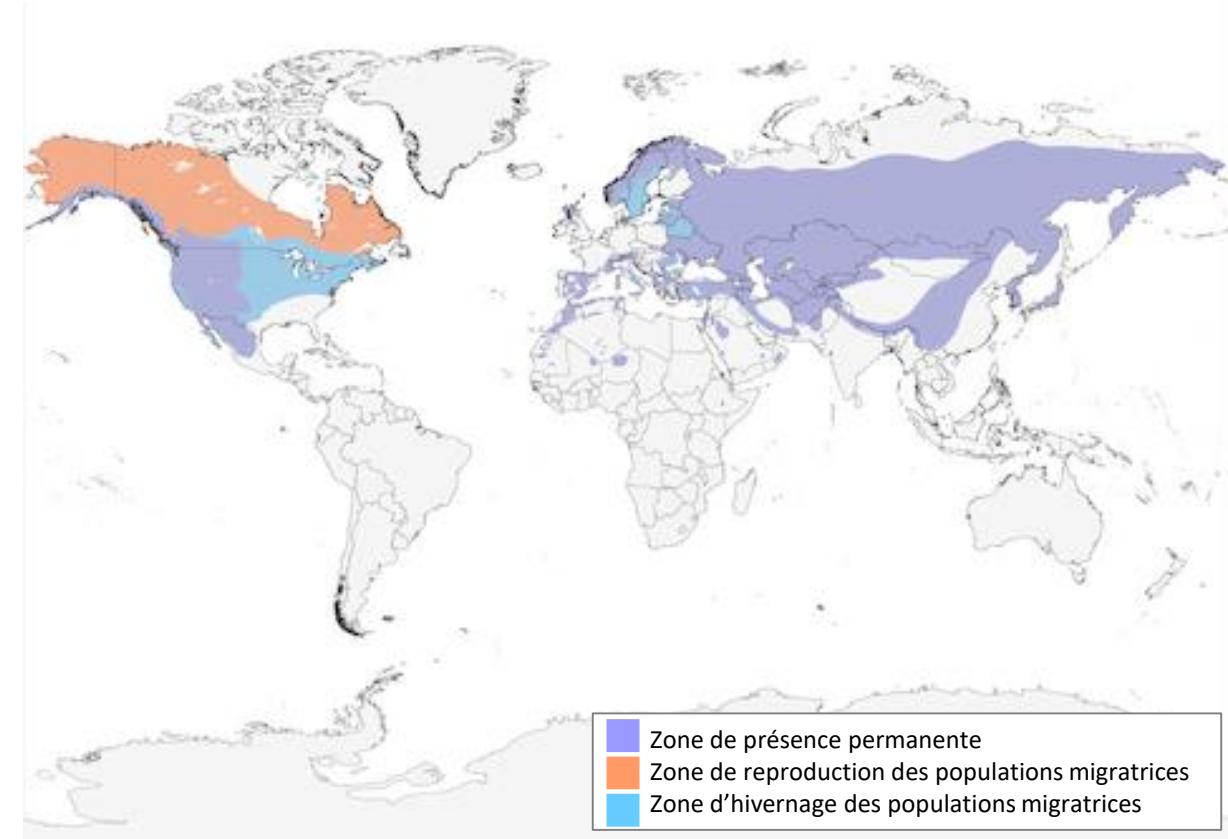
## Exemple historique : Altamont Pass (USA)

- ~ 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

→ Comportements spatiaux différents ?



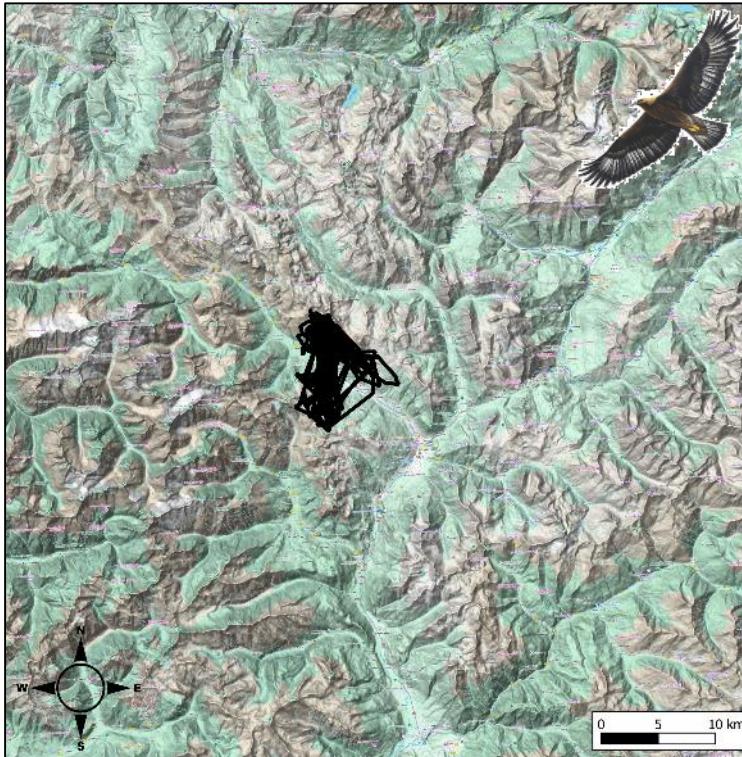
Crédit : Silvia Alberti



Crédit : Franck Della Vedova

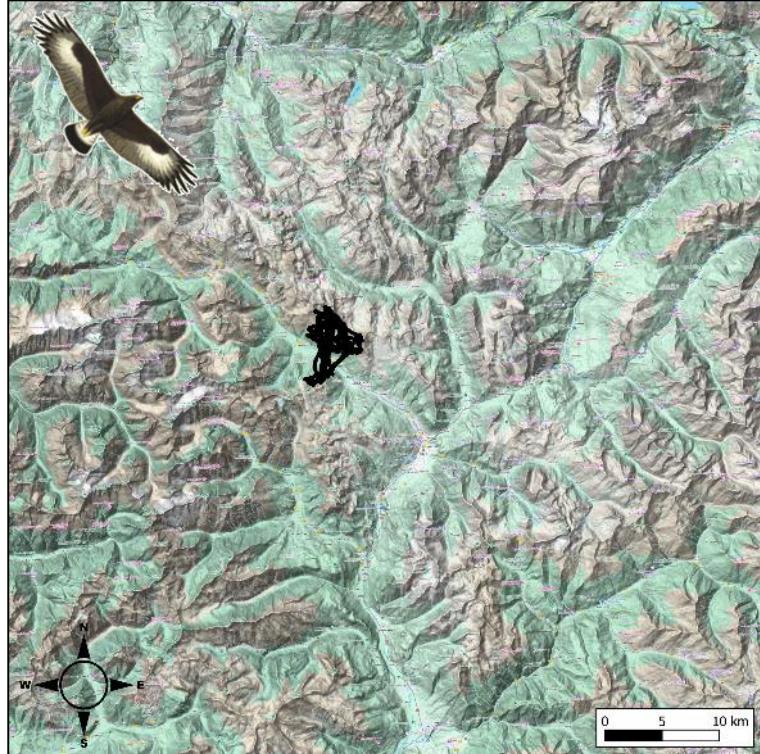
## Comportements spatiaux & stade du cycle de vie

**Adulte cantonné**  
(durée 9 jours, même territoire)

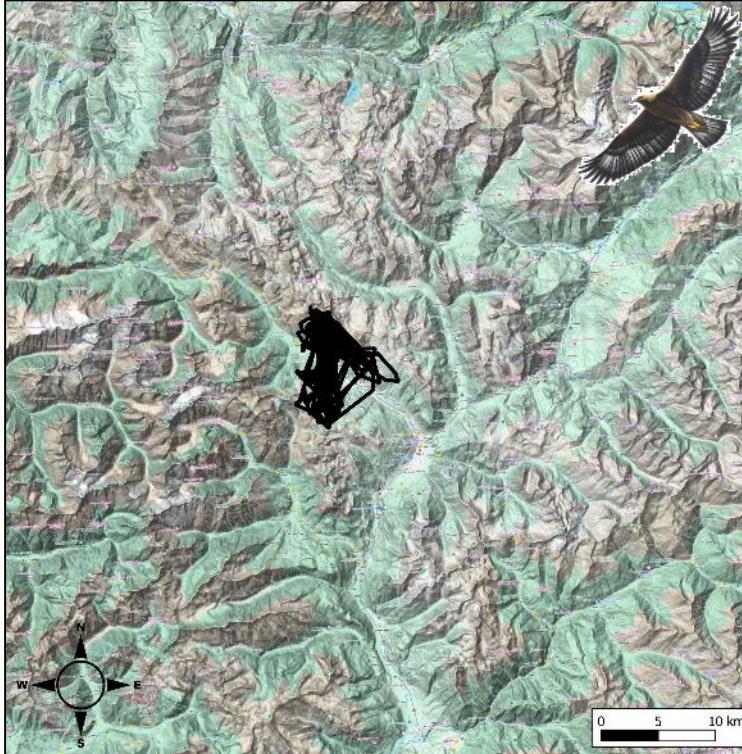


## Comportements spatiaux & stade du cycle de vie

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

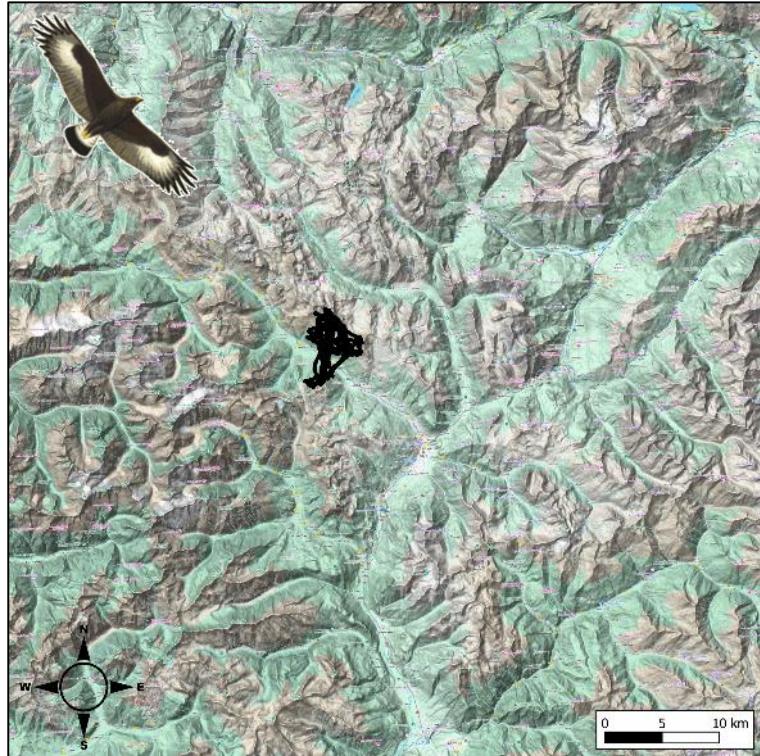


**Adulte cantonné**  
(durée 9 jours, même territoire)

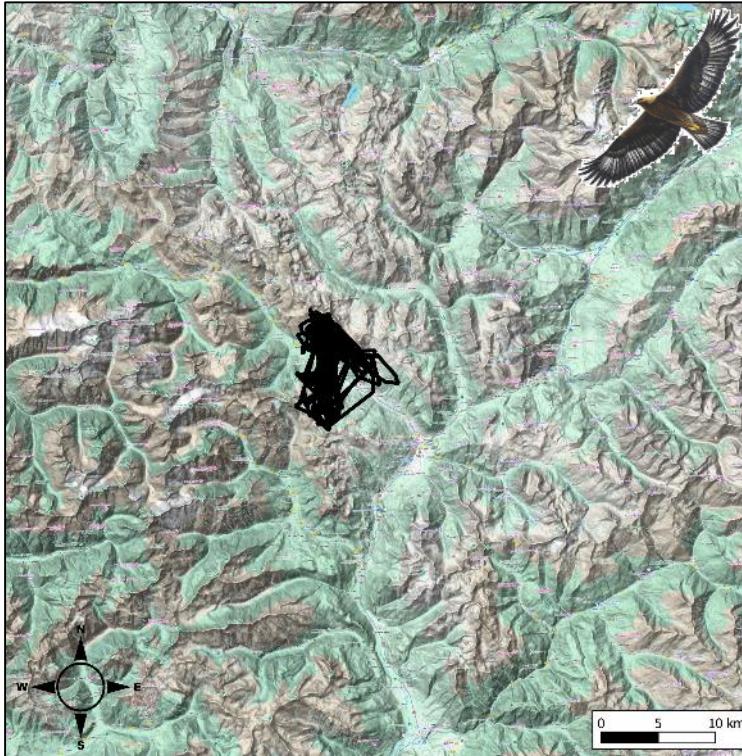


## Comportements spatiaux & stade du cycle de vie

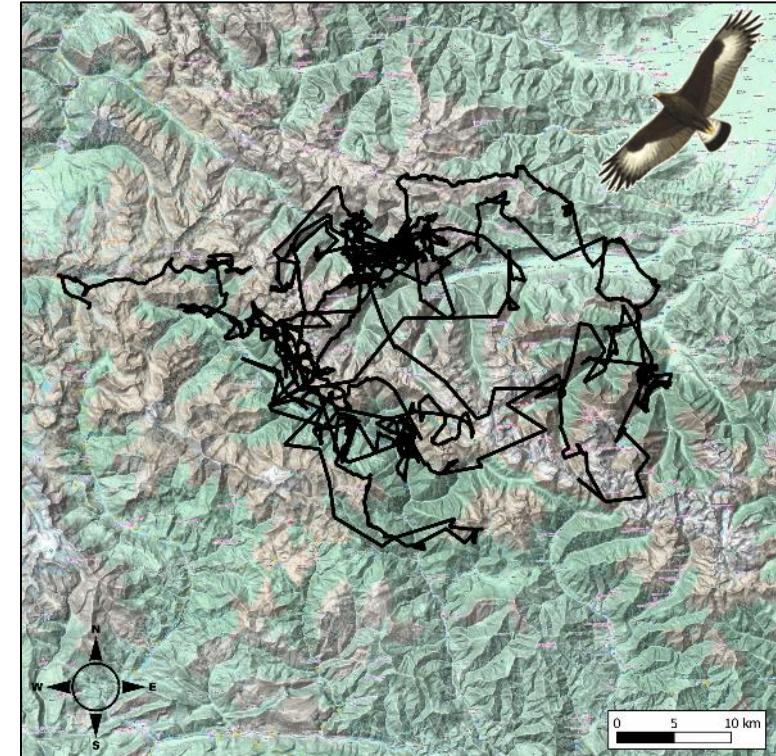
**Juvénile en apprentissages**  
(durée 9 jours, 35 jours post envol)



**Adulte cantonné**  
(durée 9 jours, même territoire)



**Jeune parti en erratisme**  
(durée 30 jours)



Juvénile en apprentissages

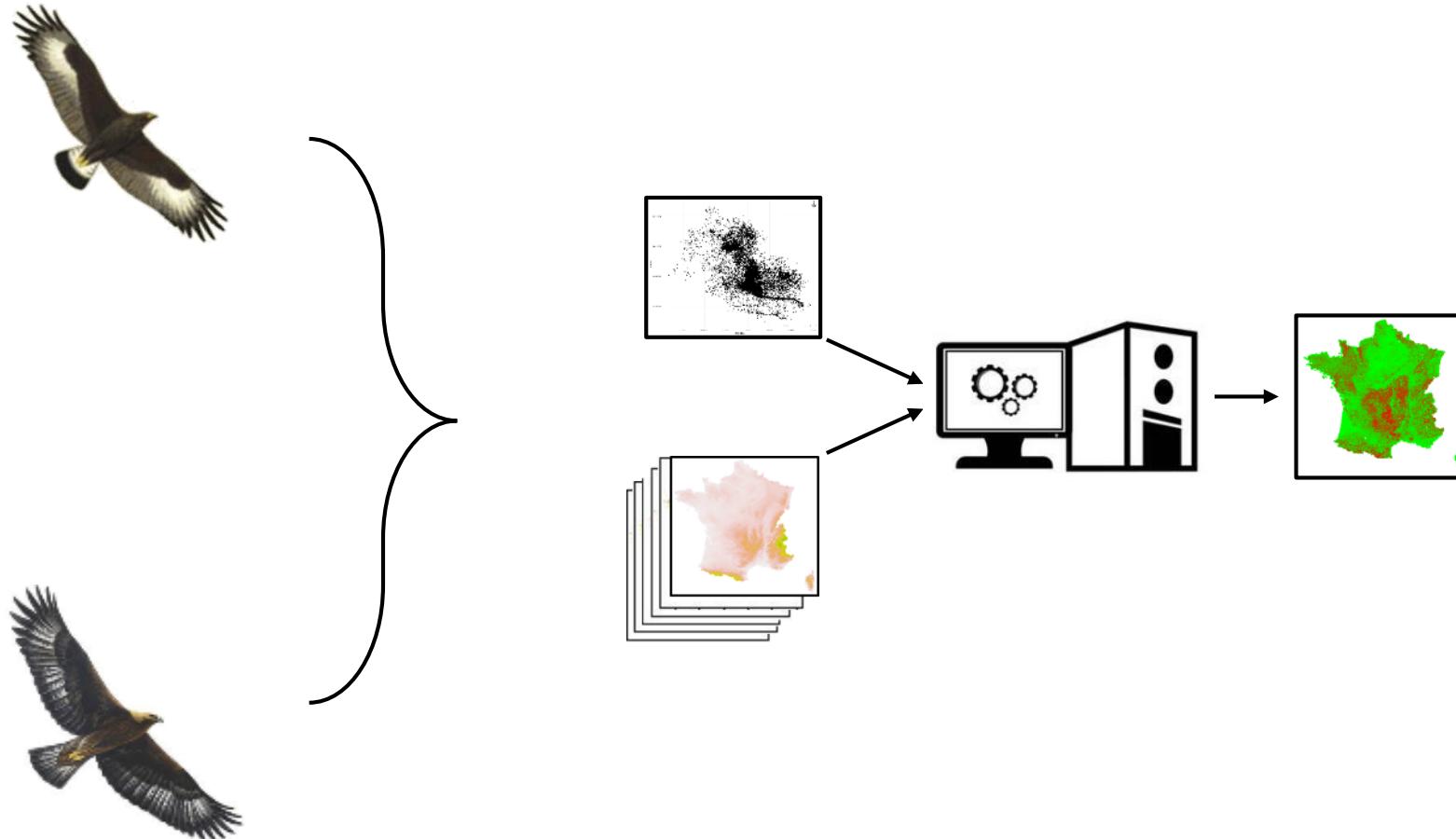
Adulte cantonné

~~Jeune parti en erratisme~~

Individus territoriaux

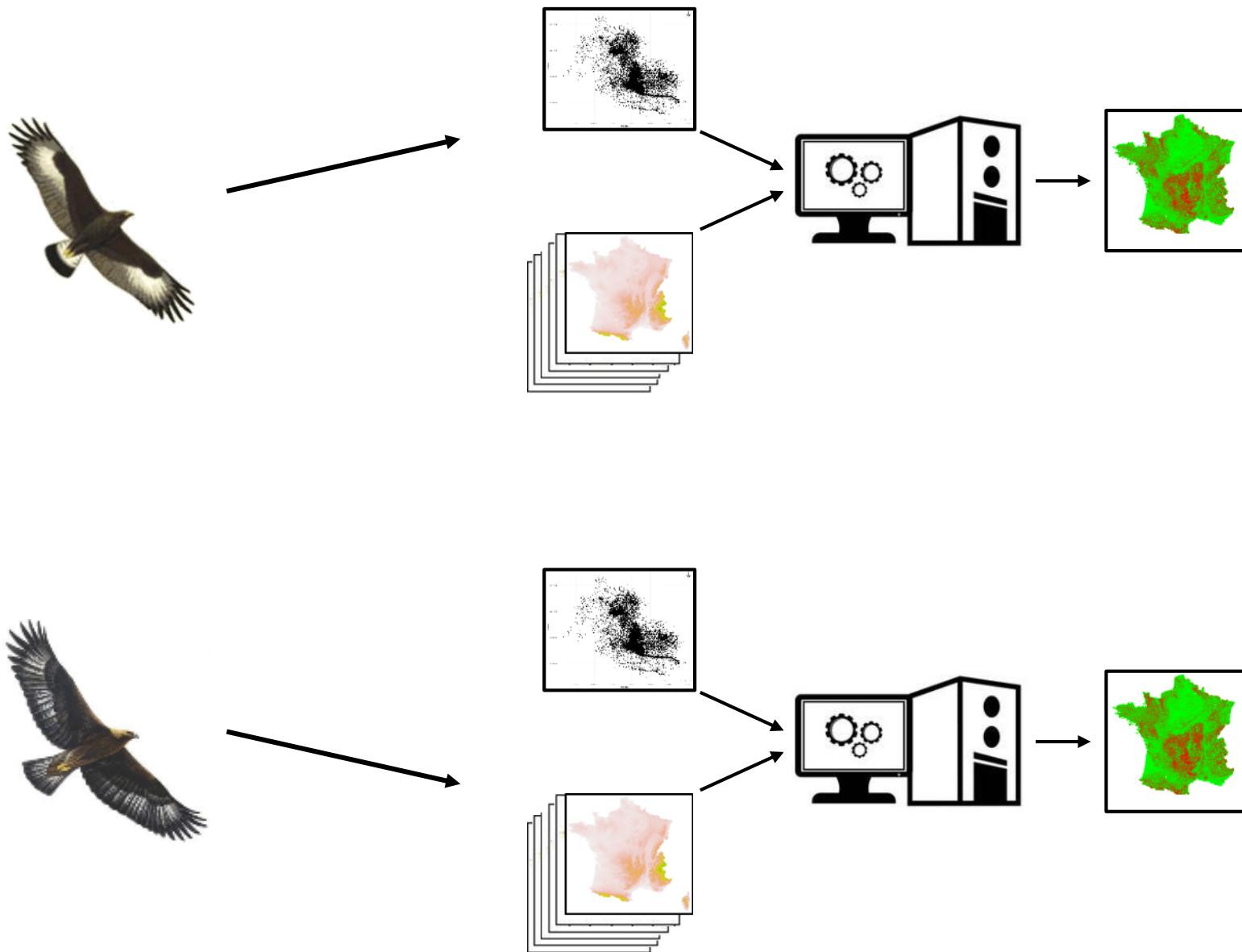


→ Exposition au risque peut-être différente selon la classe d'âge ?



# Introduction – Démarche

---



## 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 ?**

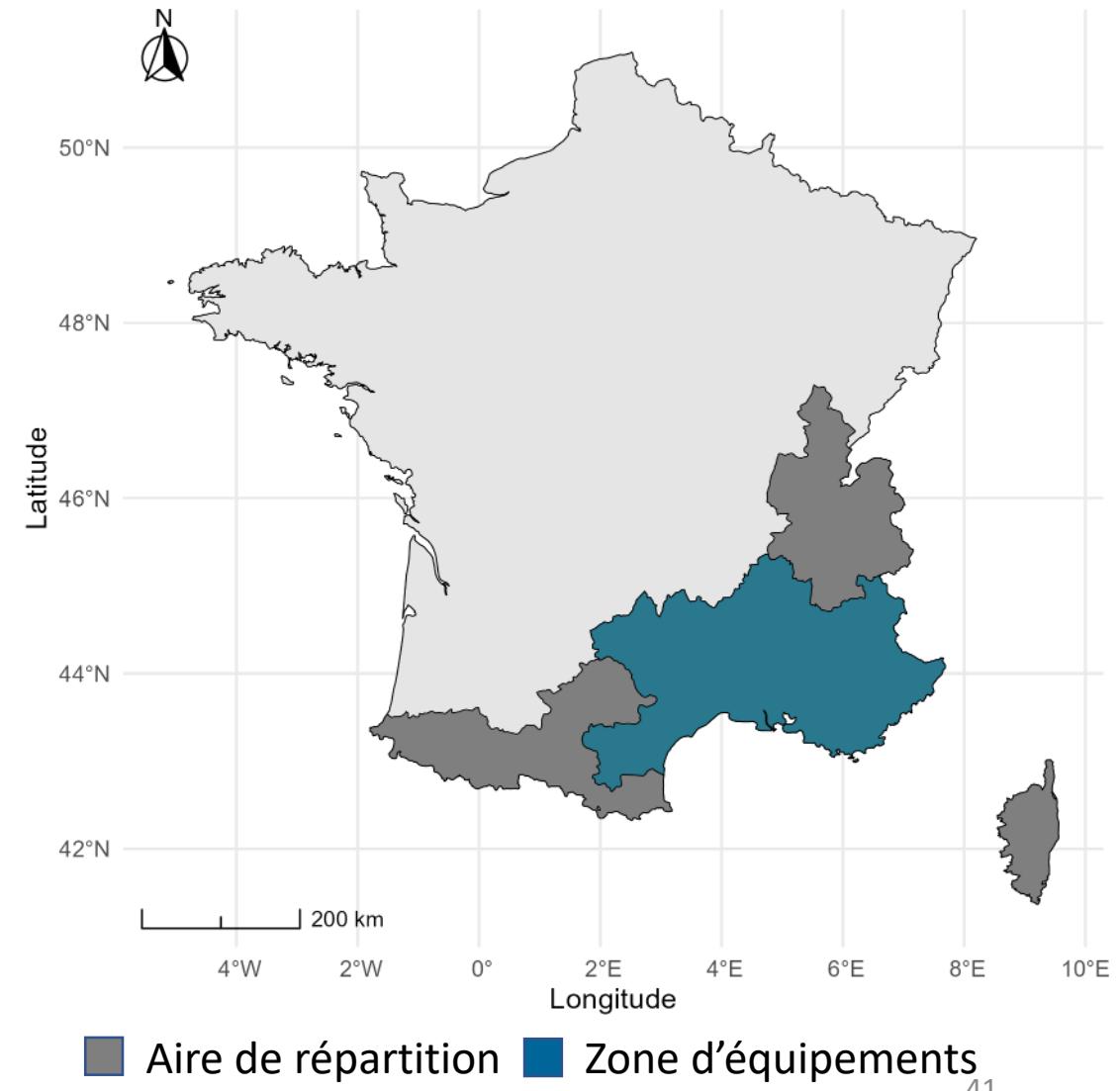
- Chapitre 1 : l'ontogénie des performances de vol des jeunes aigles royaux
- Chapitre 2 : l'utilisation du domaine vital des parents par les jeunes aigles royaux

## 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

- 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*

## Modèle d'étude – Equipements GPS

- 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



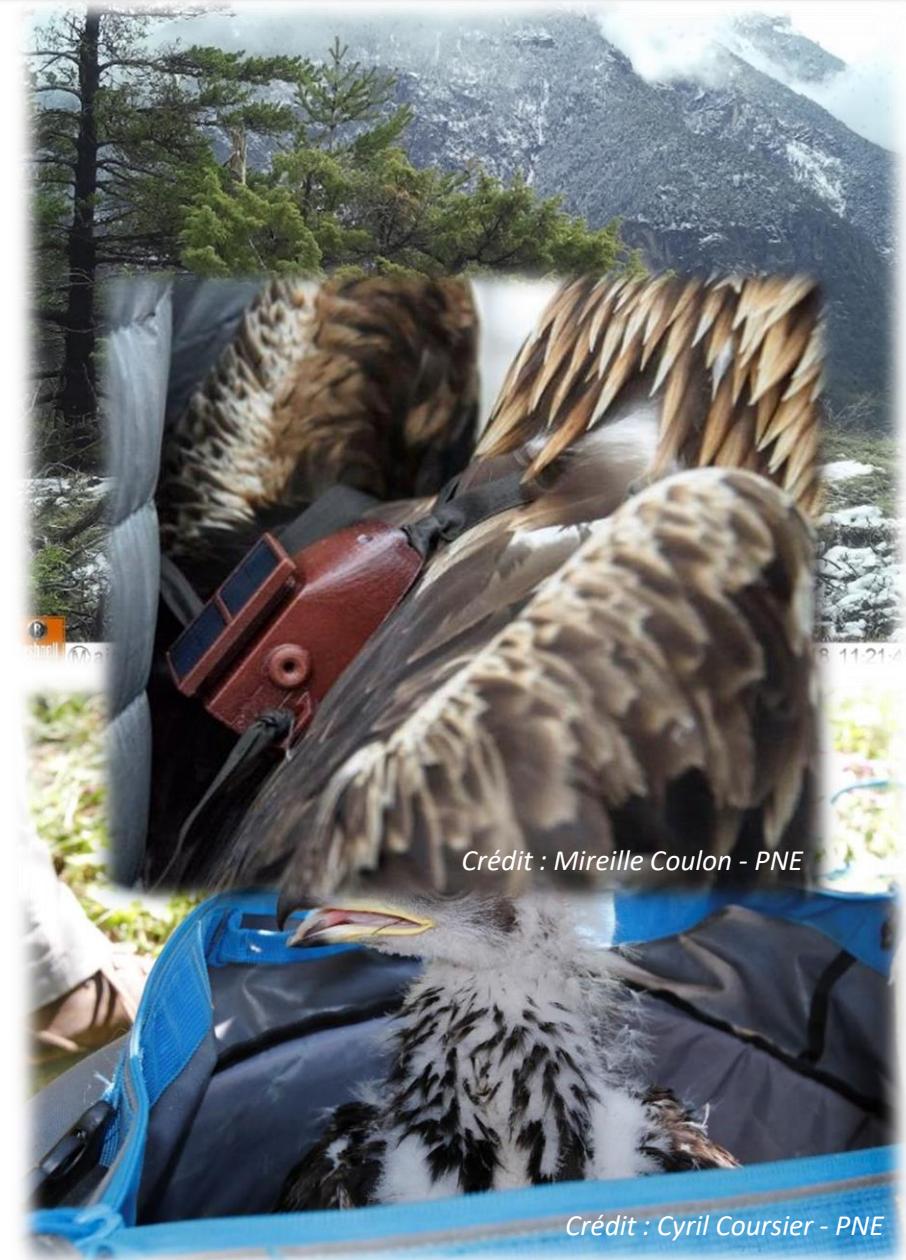
## Modèle d'étude – Equipements GPS

- 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



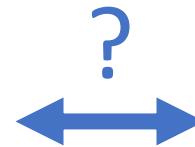
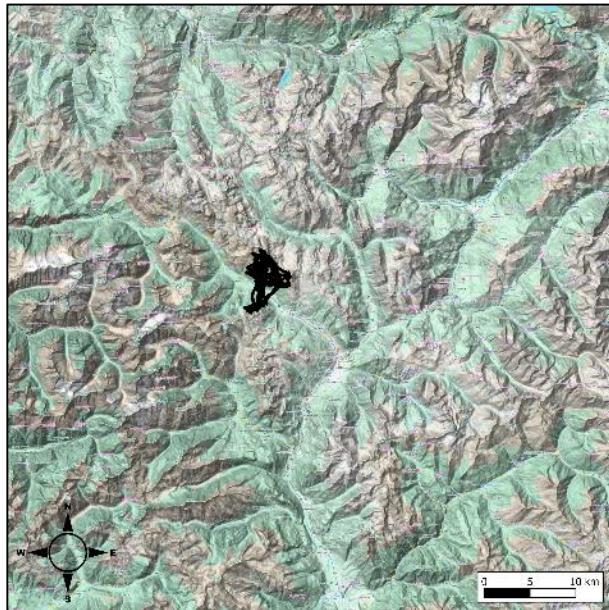
## Comment les juvéniles utilisent-il l'espace pendant leur période d'apprentissages ?



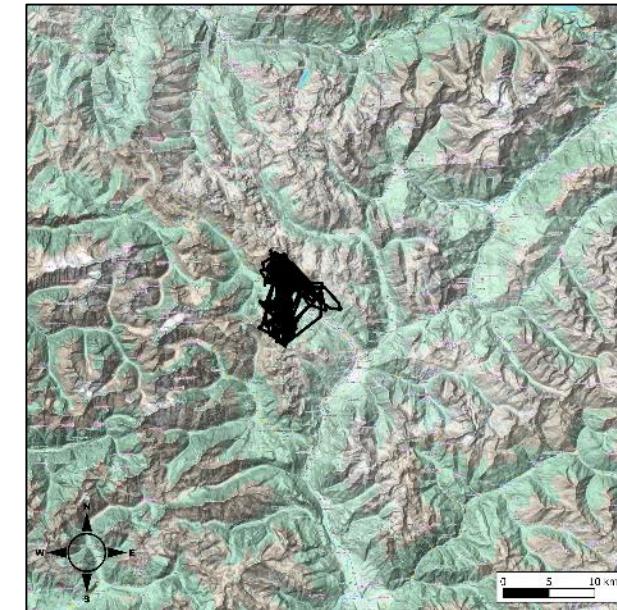
*Crédit : Yann Serreau*



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

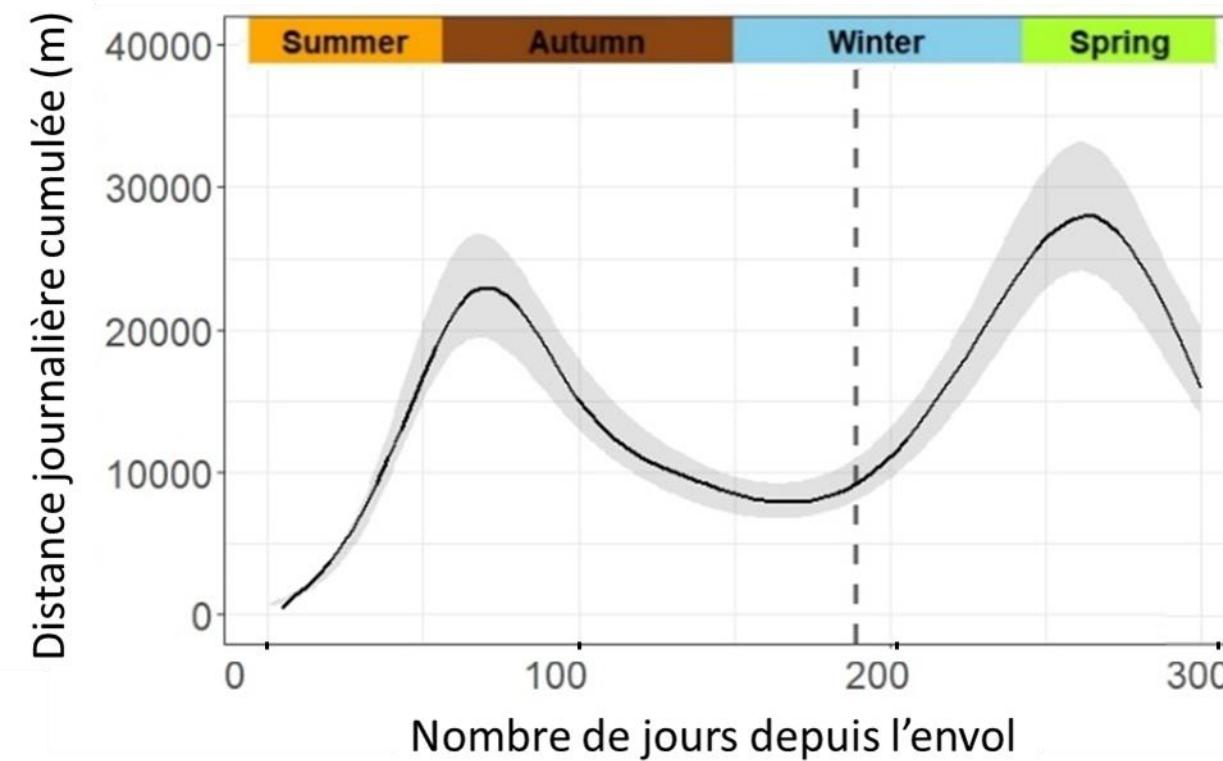


- Utilisation de l'espace

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



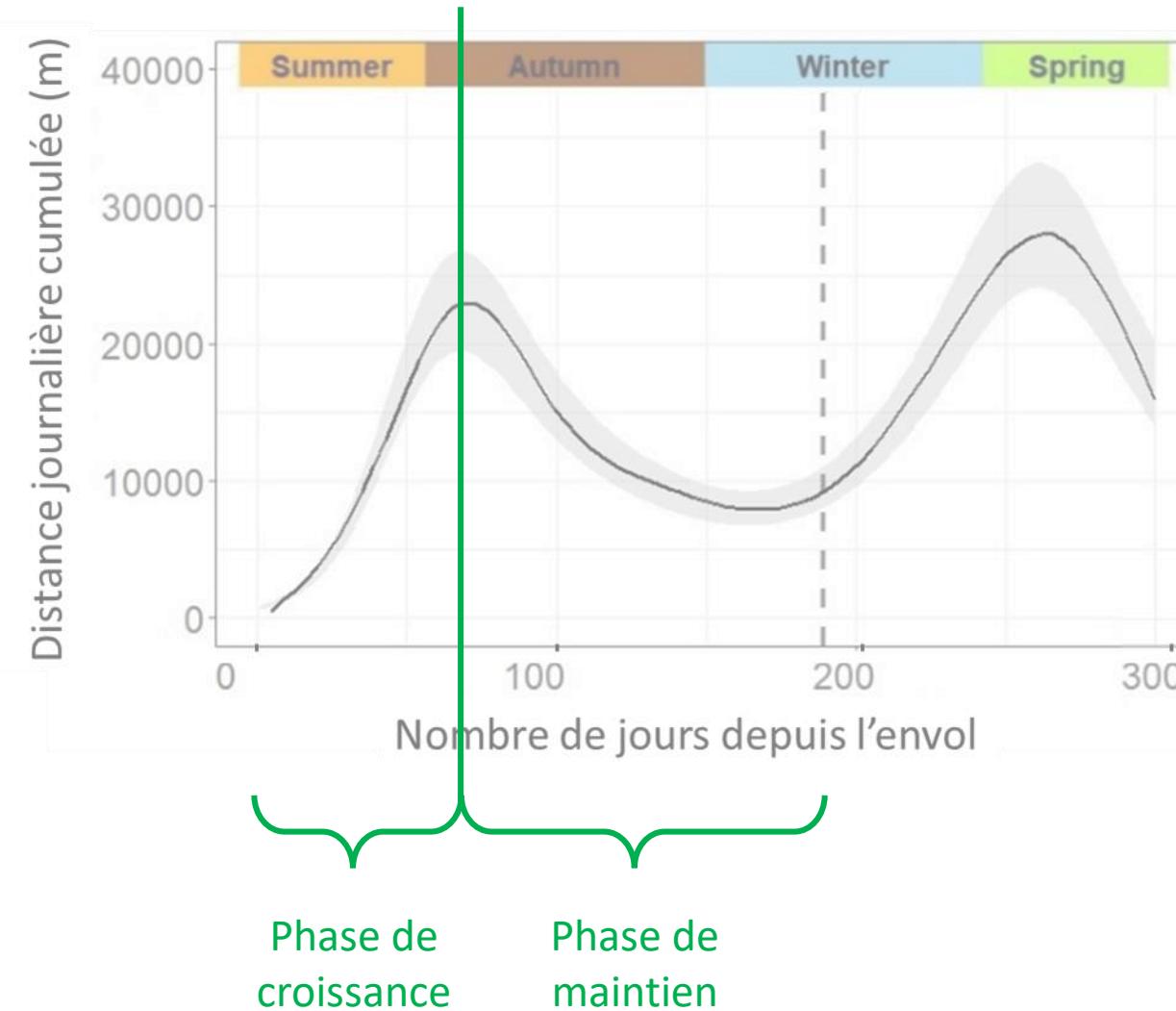
# Partie I – Caractérisation du vol



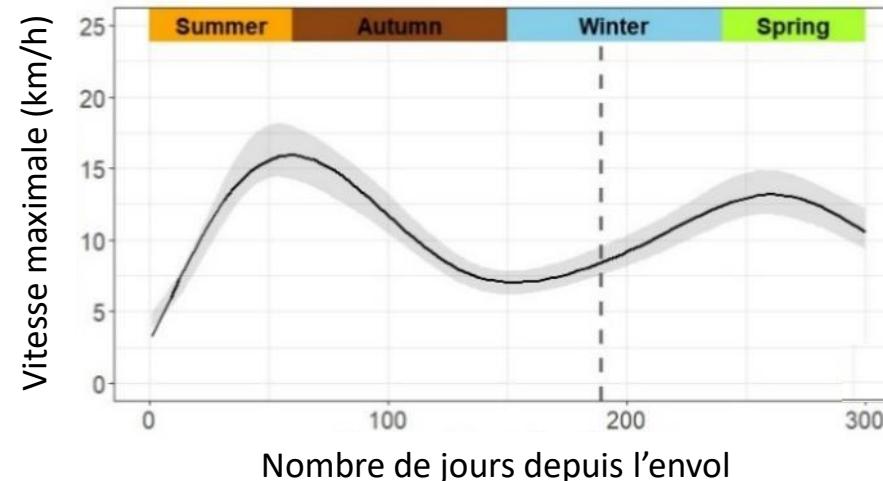
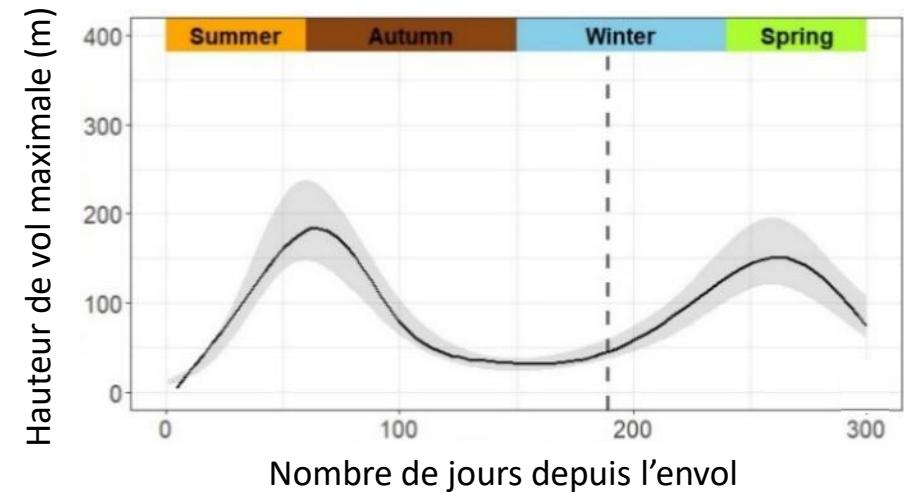
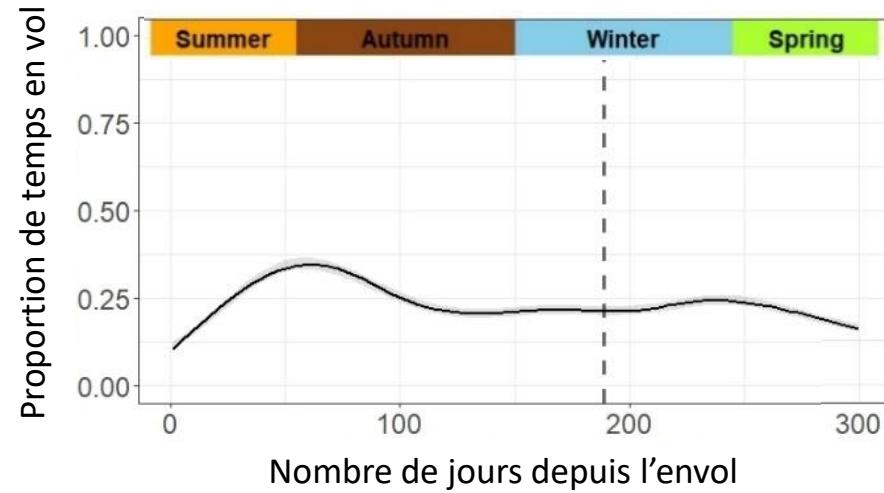
Date médiane de départ du territoire de naissance (189 jours)



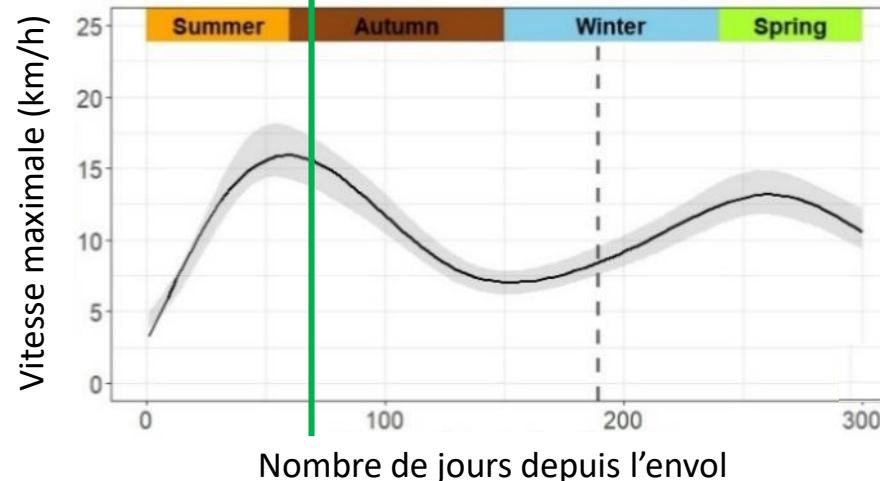
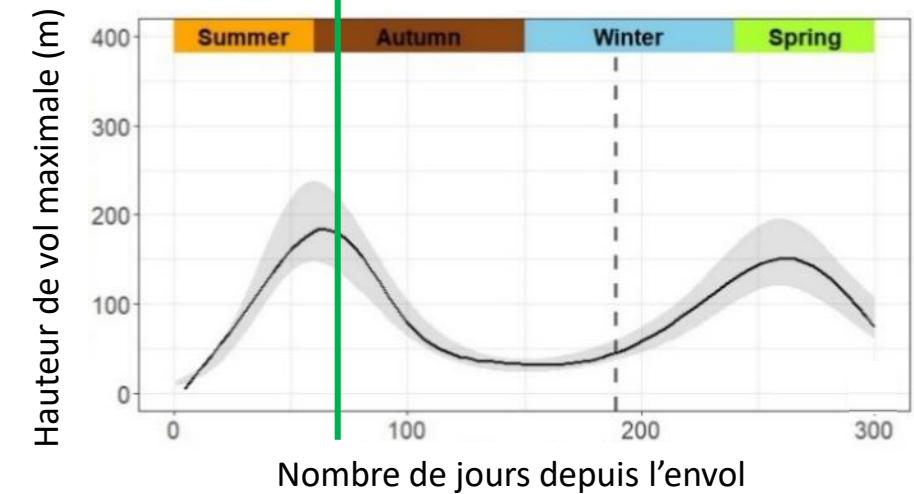
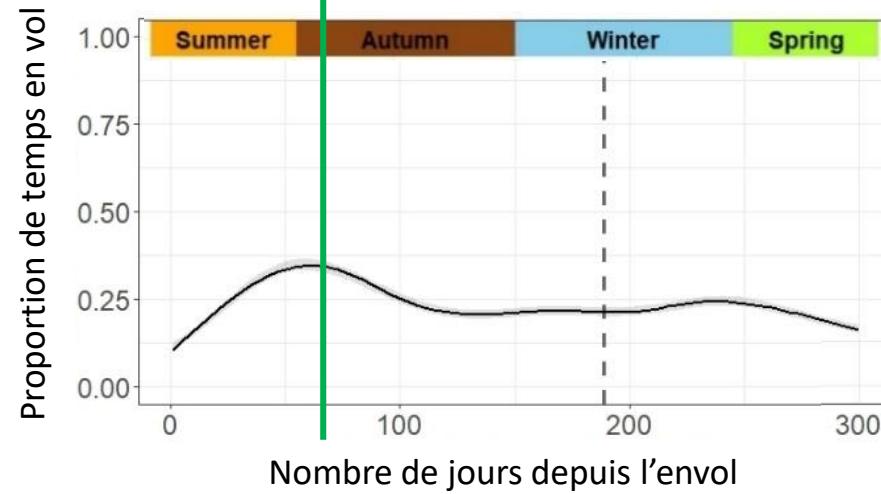
# Partie I – Caractérisation du vol



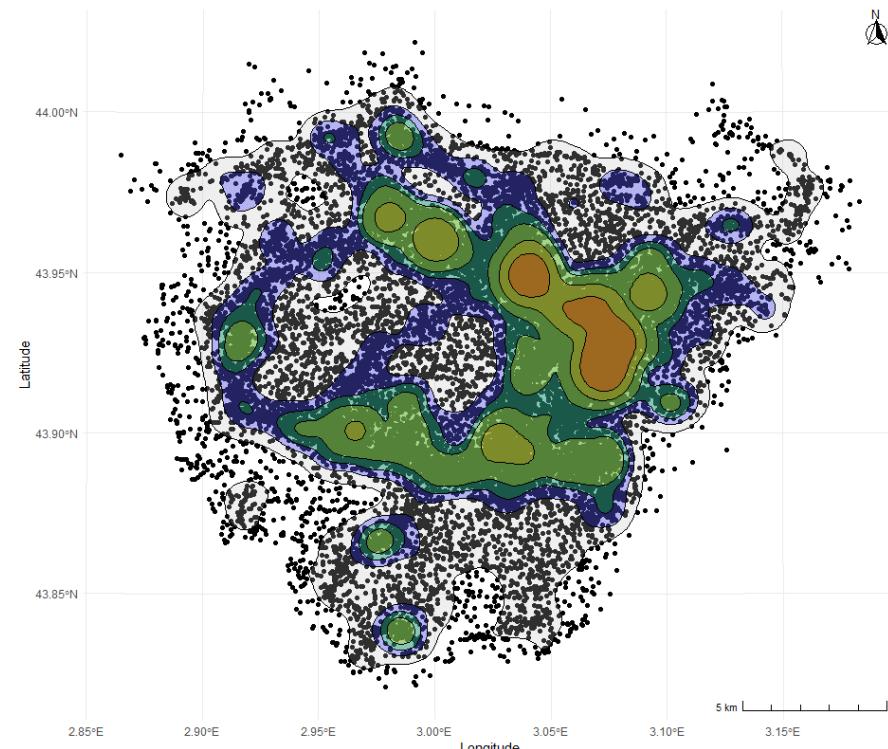
# Partie I – Caractérisation du vol



# Partie I – Caractérisation du vol

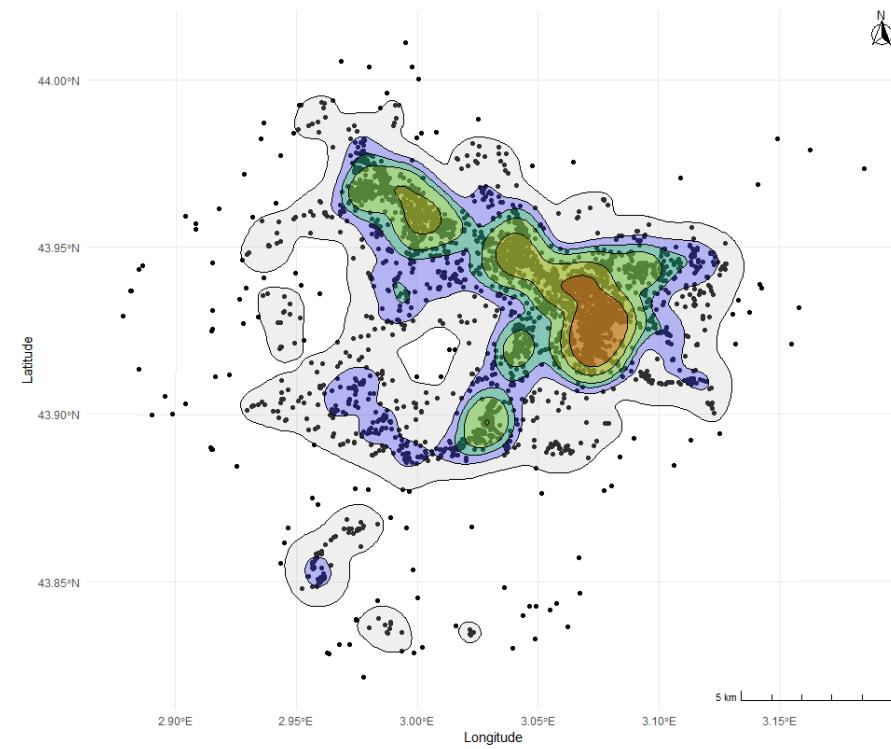


## Domaine vital

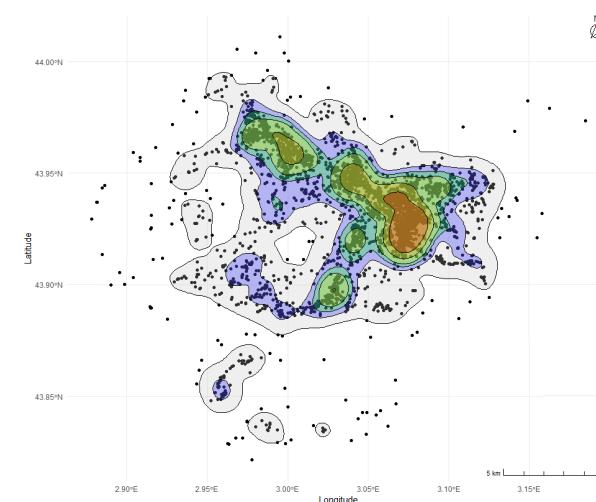
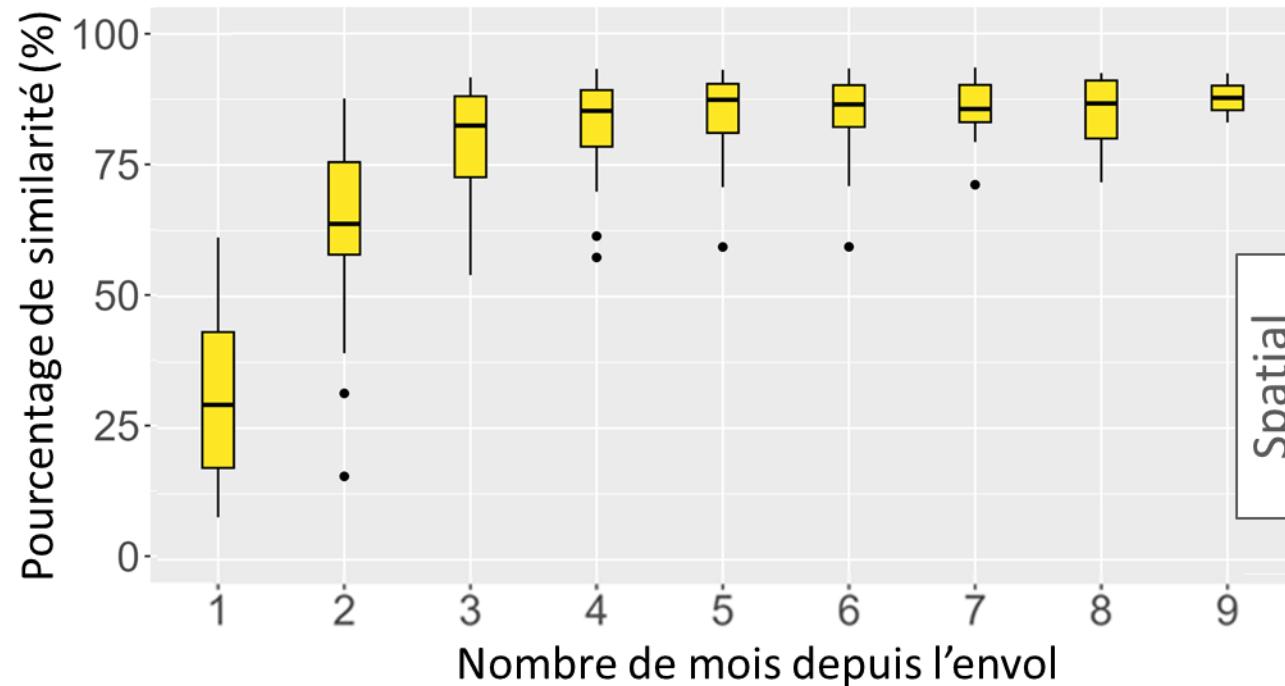
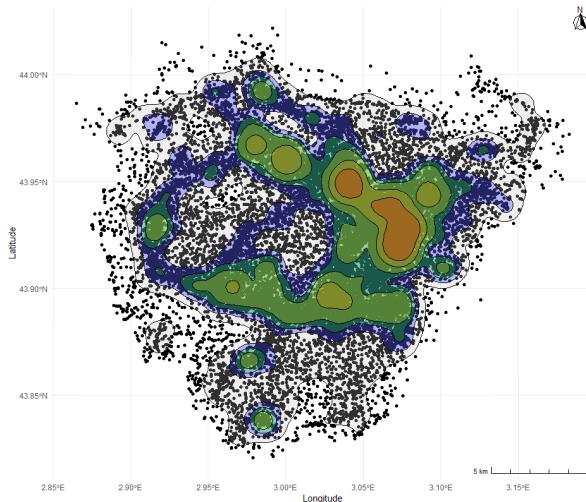


Kernels

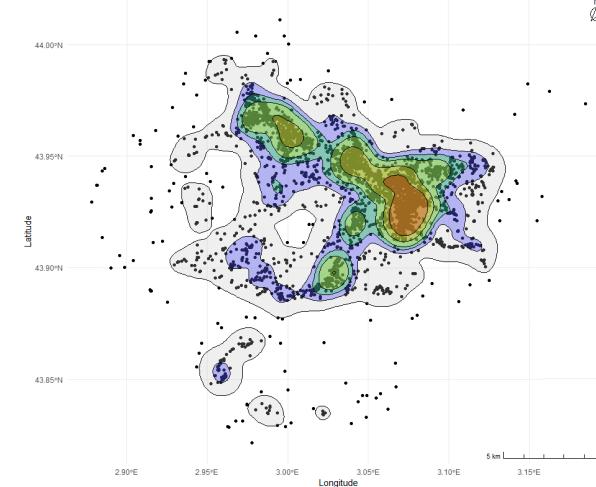
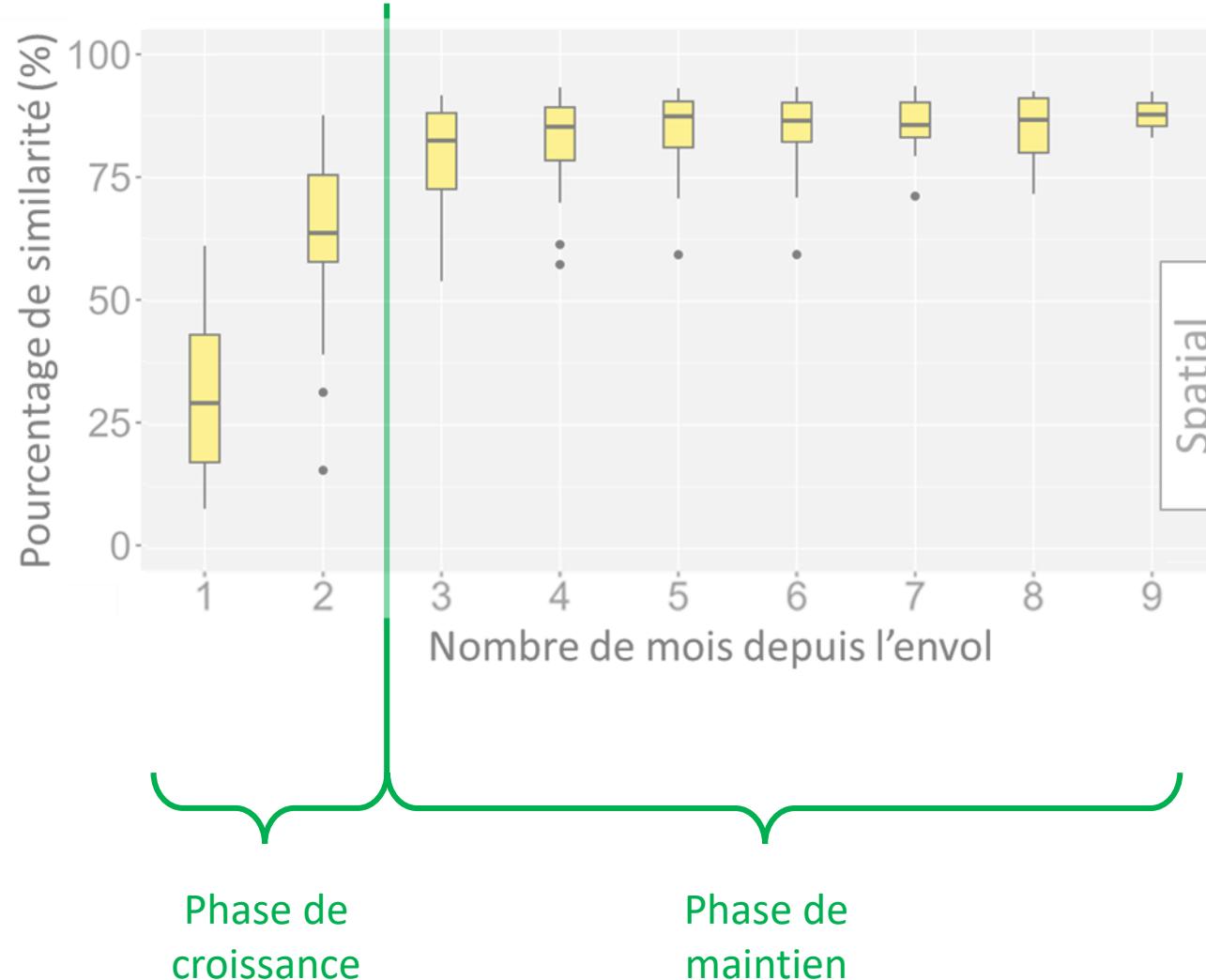
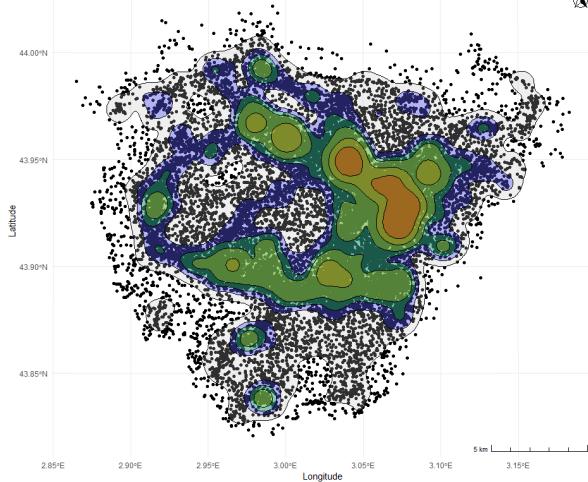
99 % 95 % 90 % 85 % 70 % 50 %



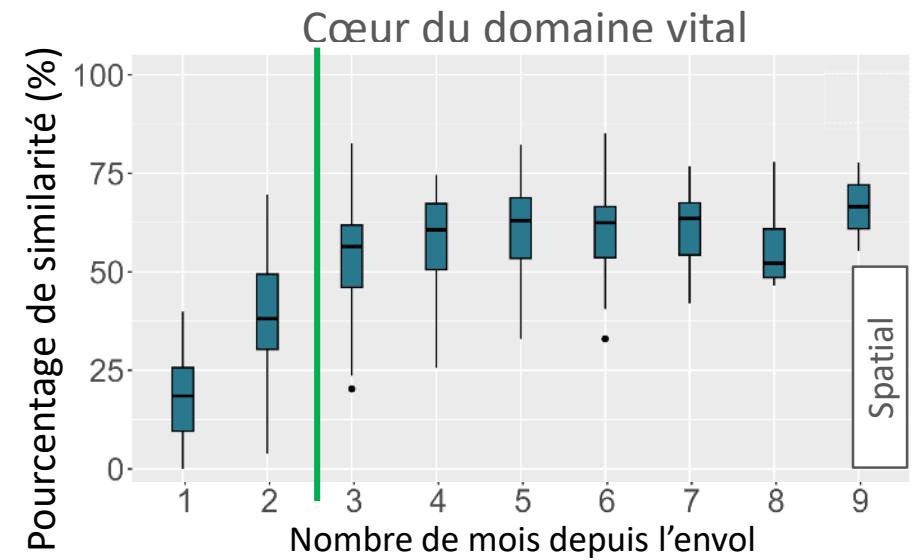
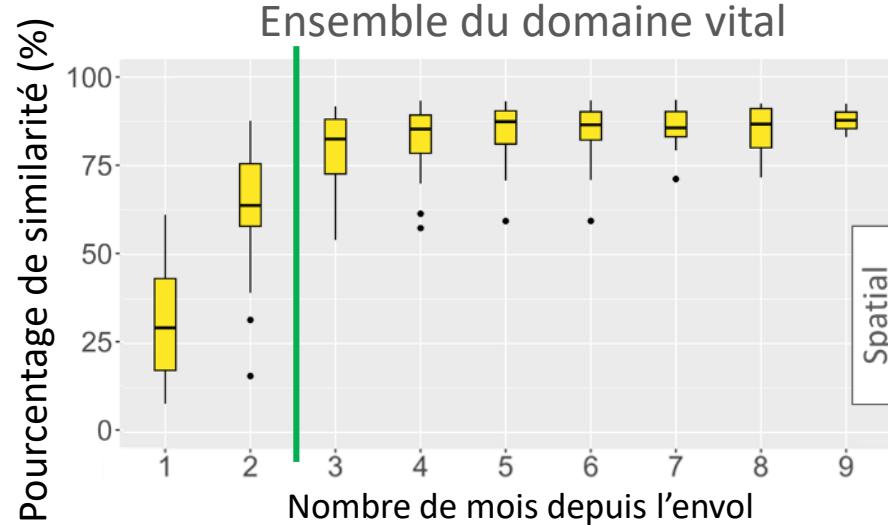
## Mois après mois



## Mois après mois



## Mois après mois

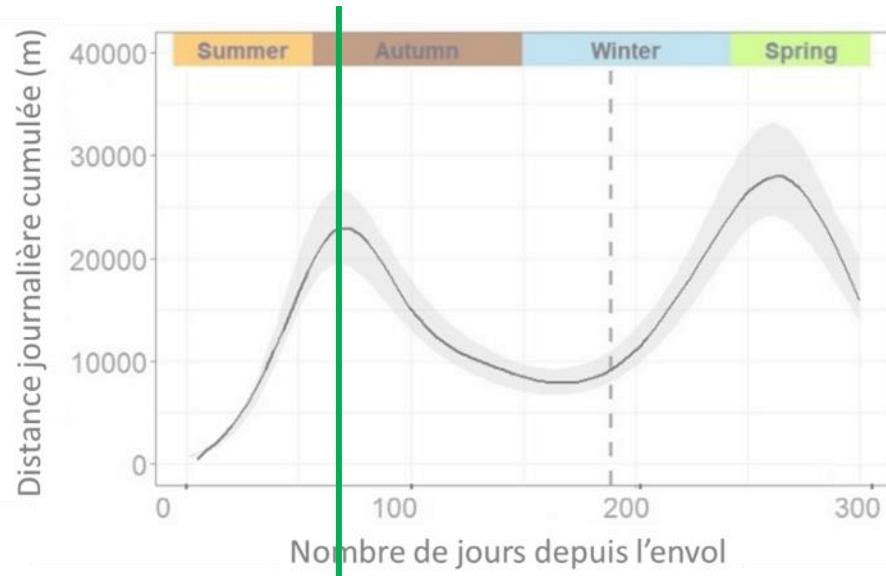




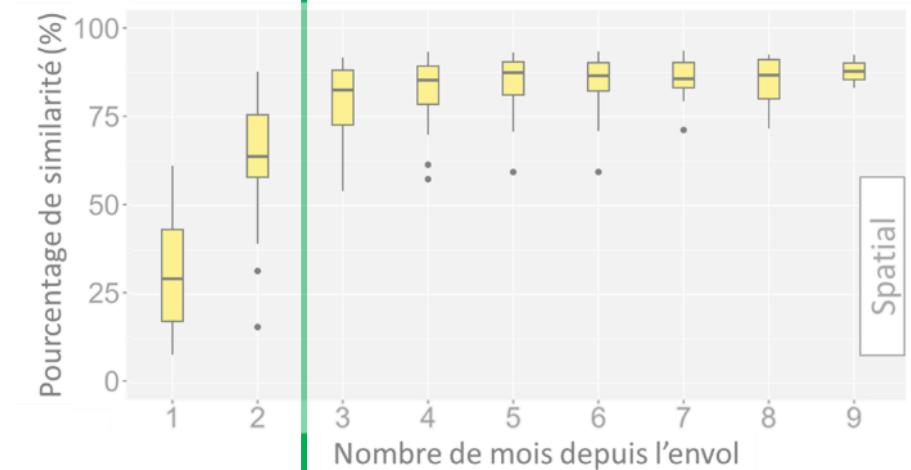
Credit : Cyril Coursier - PNE



## Caractérisation du vol



## Utilisation de l'espace



- 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**

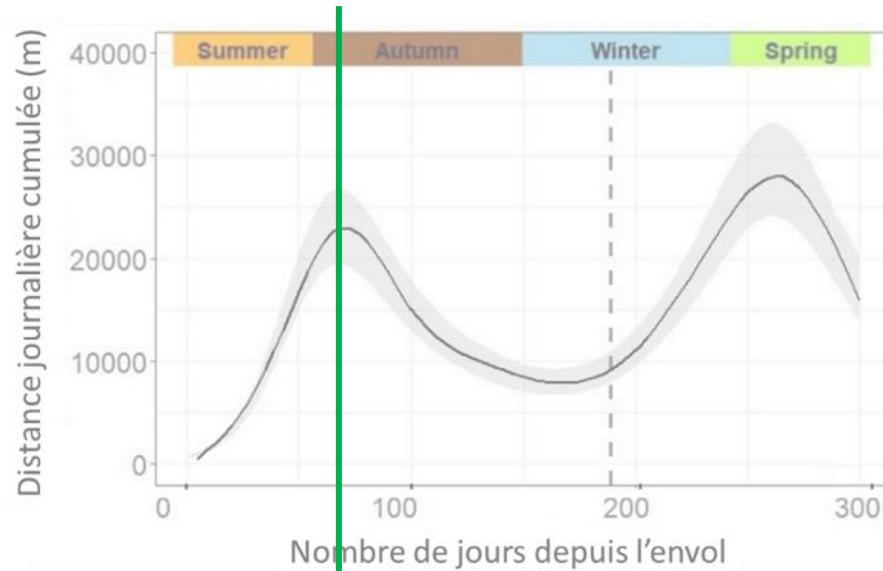
Soutullo et al. 2006

- **Aigles de Bonelli**

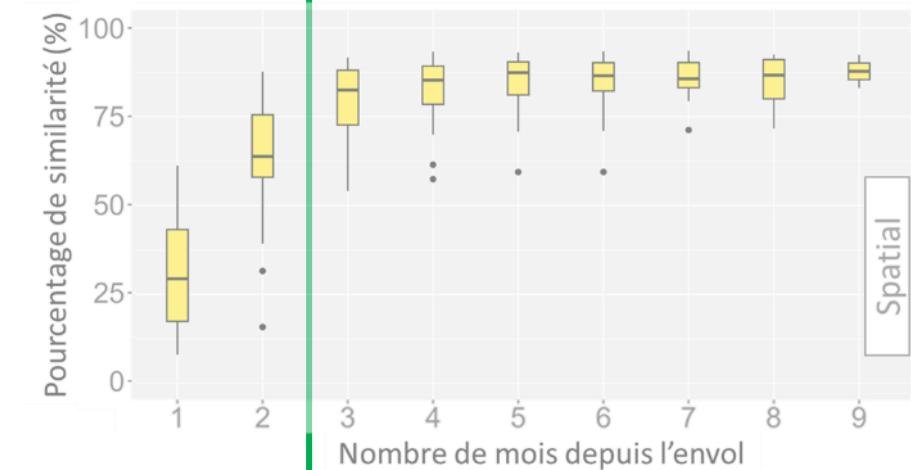
Cadahia et al. 2008

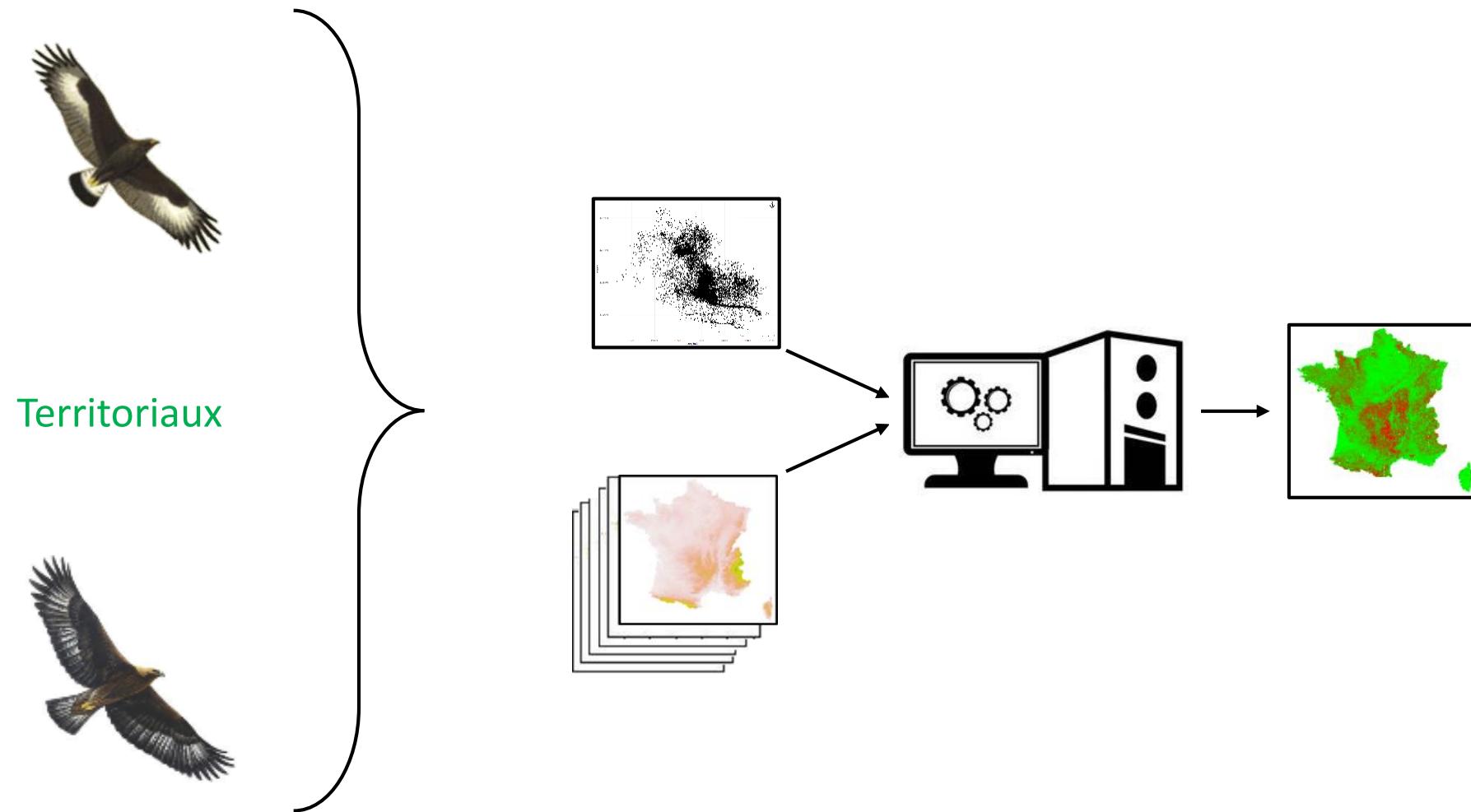


## Caractérisation du vol



## Utilisation de l'espace



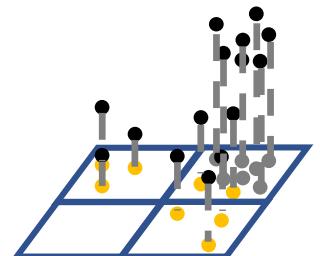


### Quels sont les habitats sélectionnés par les aigles royaux, en fonction de leur hauteur de vol ?



*Credit : Mireille Coulon - PNE*

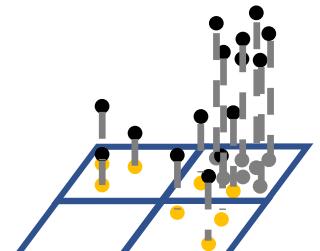
- Possibilité d'étudier la sélection d'habitats en 3D
  - A partir de variables pouvant influencer le vol
  - En adaptant à la 3D une méthode 2D



- 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**



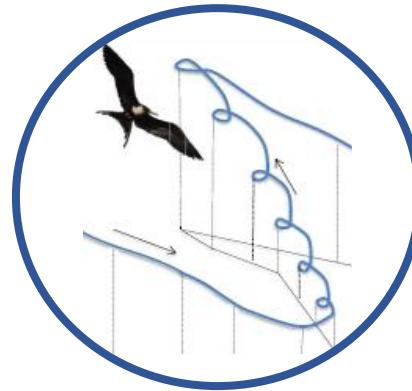
### Habitats disponibles



Topographie



Occupation du sol



Courants aériens

### Habitats disponibles

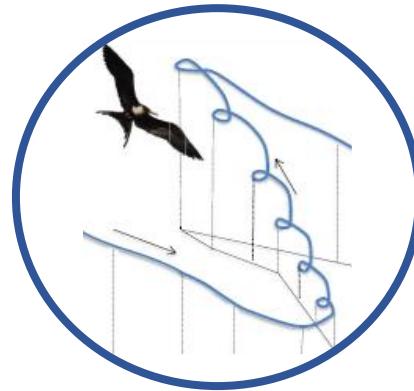


Topographie



Occupation du sol

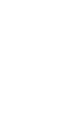
+



Courants aériens



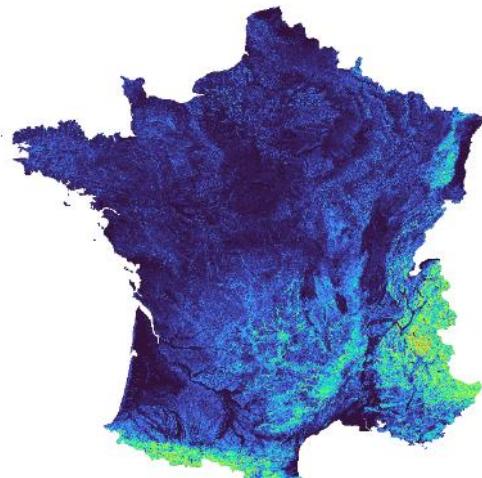
Facilement disponibles  
(sur BDD en ligne)



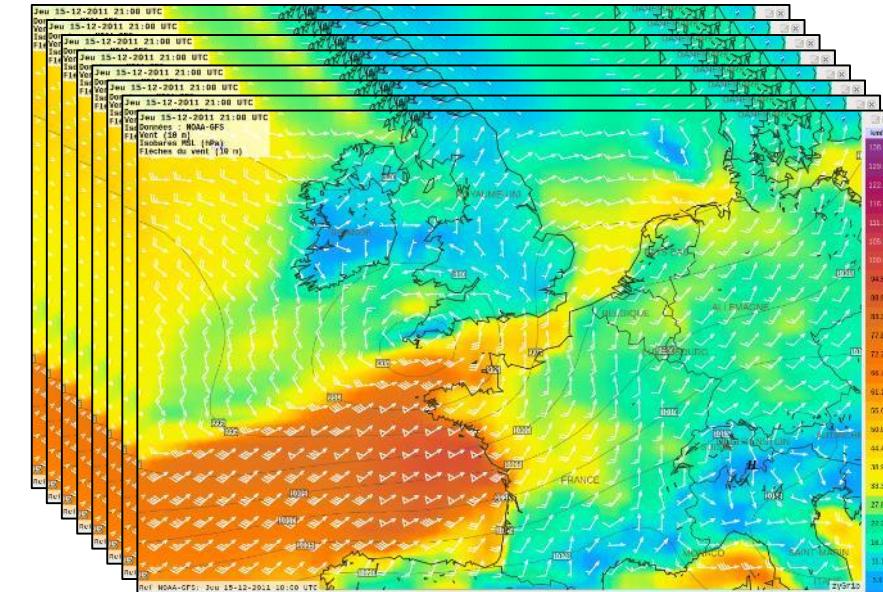
Non directement  
disponibles

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

IGN



Carte des pentes



Exemple de GRIB de vents

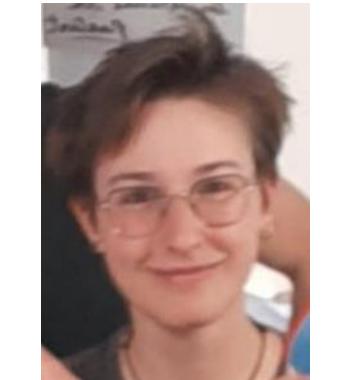


Jacinthe Paradis



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

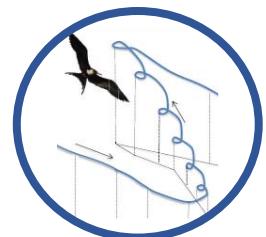
Capucine Grignard



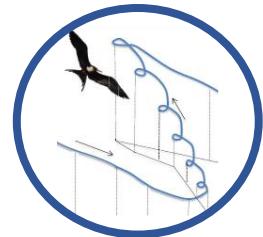
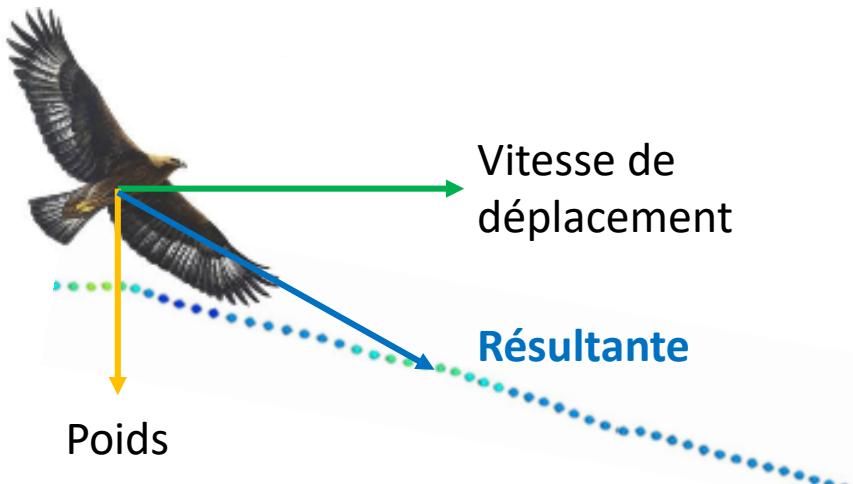
→ Résolution temporelle non adaptée à la question  
(prédition du risque global)



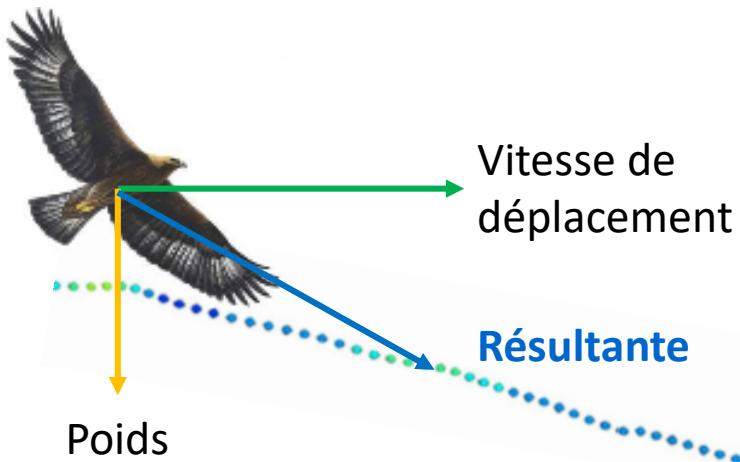
Variable climatique plutôt que météorologique



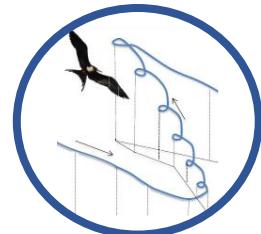
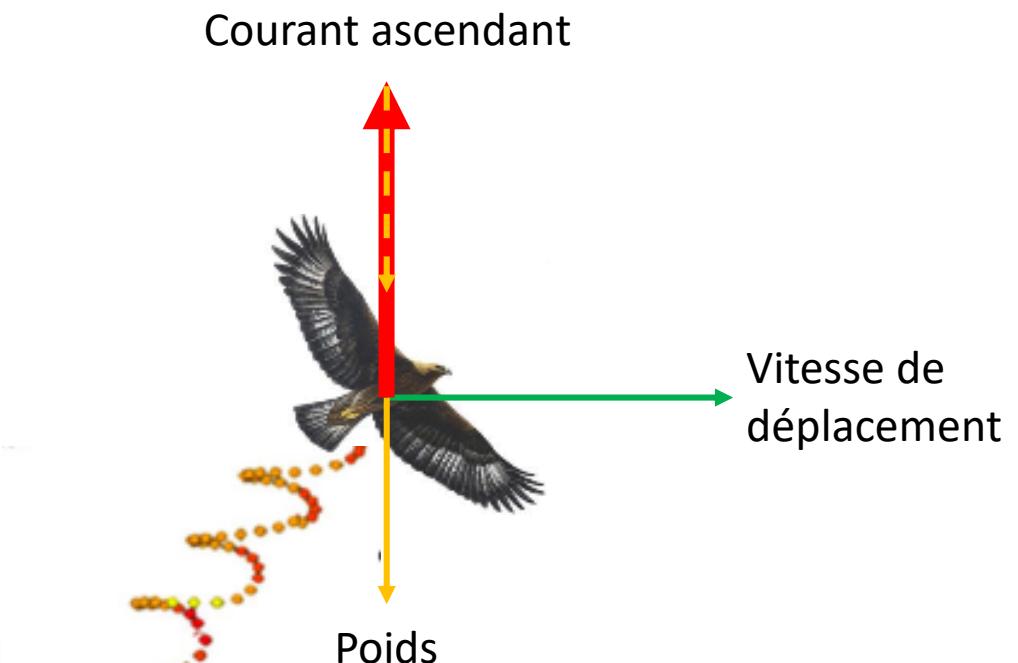
- Vol plané descendant



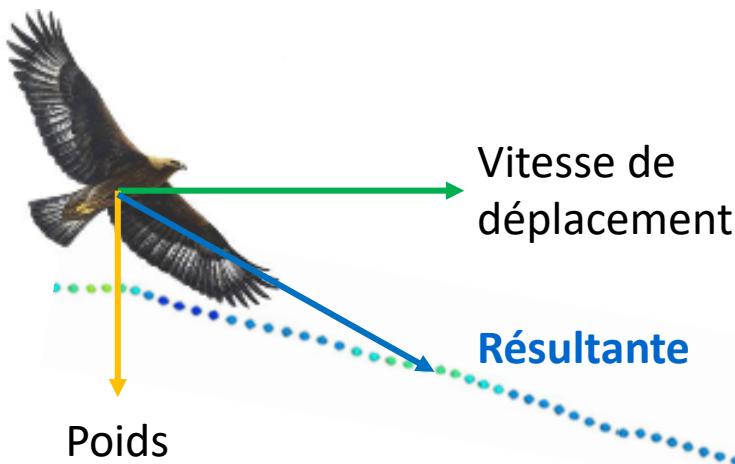
- Vol plané descendant



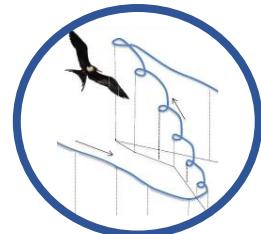
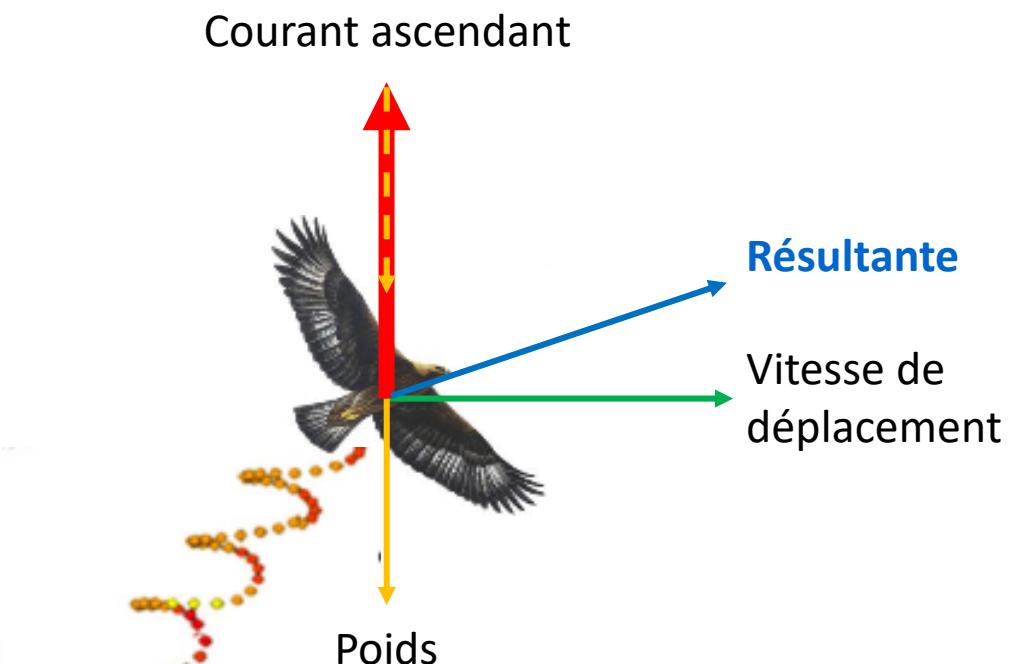
- Vol plané ascendant



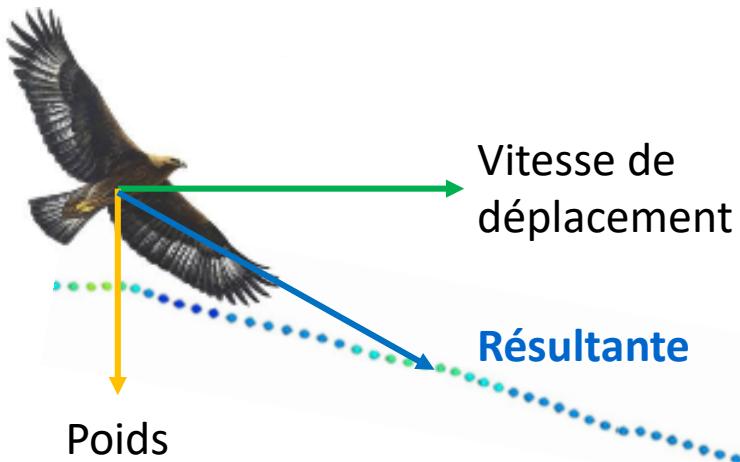
- Vol plané descendant



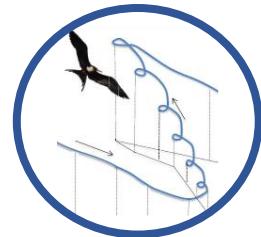
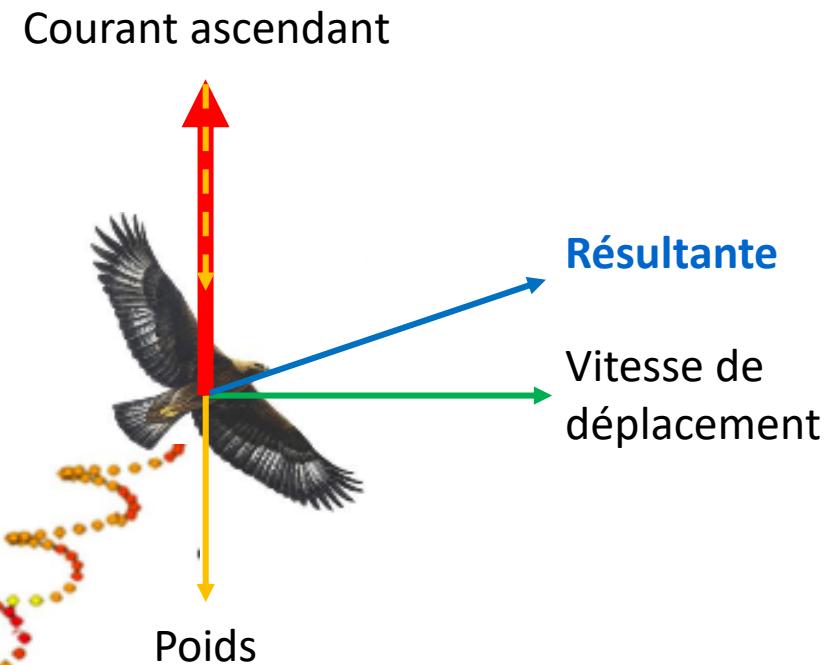
- Vol plané ascendant



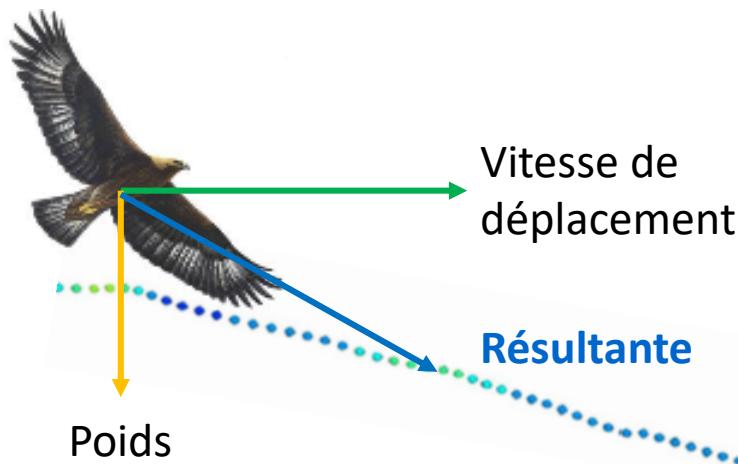
- Vol plané descendant



- Vol plané ascendant

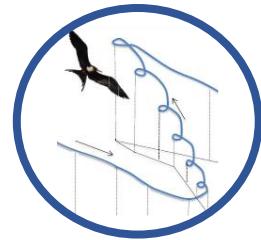
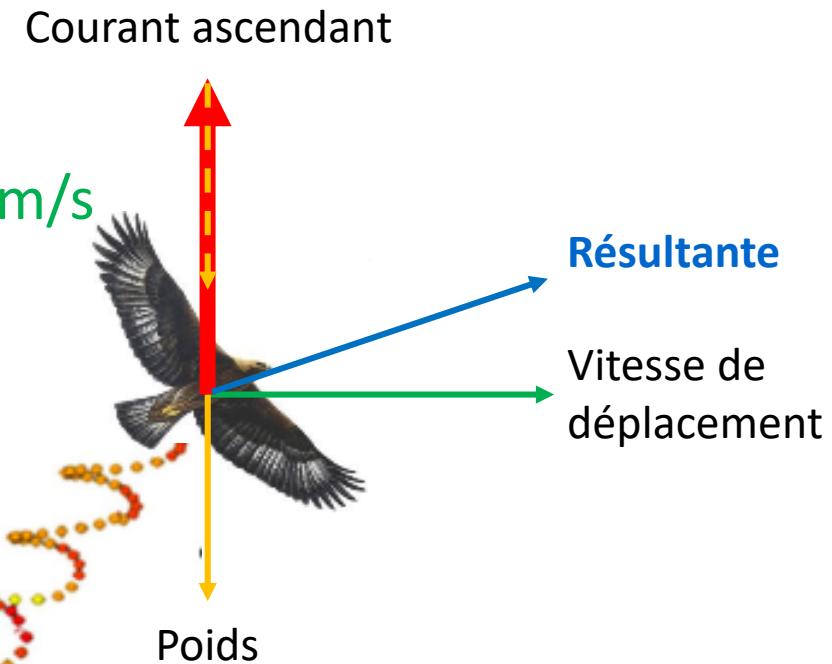


- Vol plané descendant

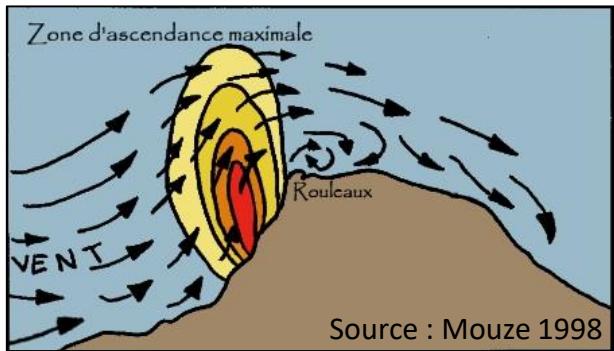


Aigle royal : 0.73 m/s

- Vol plané ascendant



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

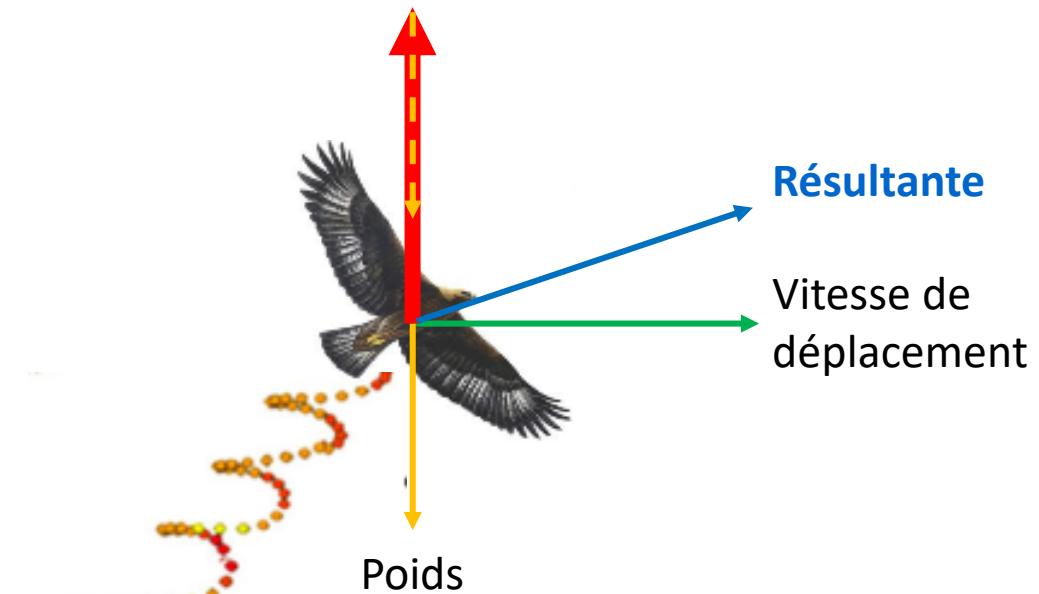


Thermique  
 $\geq 0.8 \text{ m/s}$

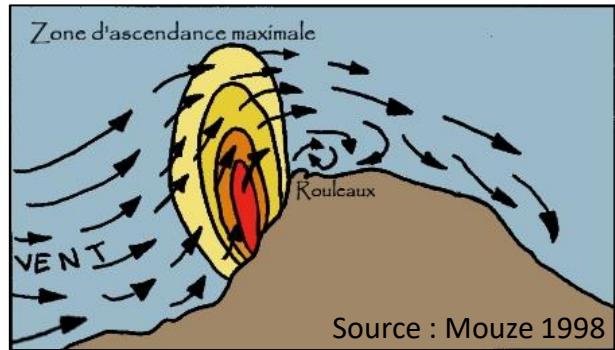


○ Vol plané ascendant

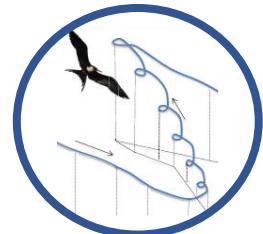
Courant ascendant



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



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

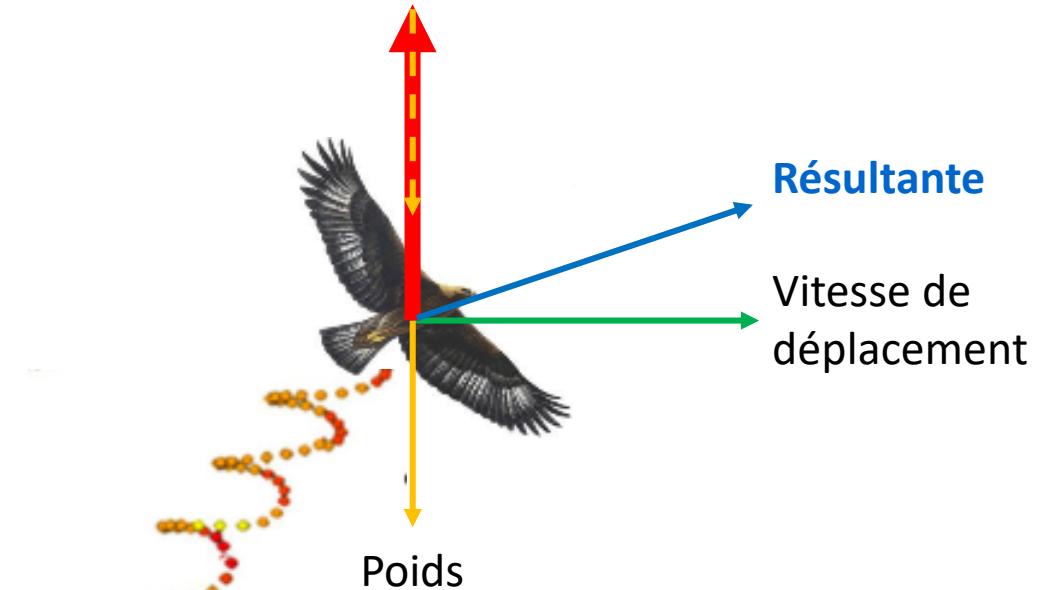


Thermique  
 $\geq 0.8 \text{ m/s}$

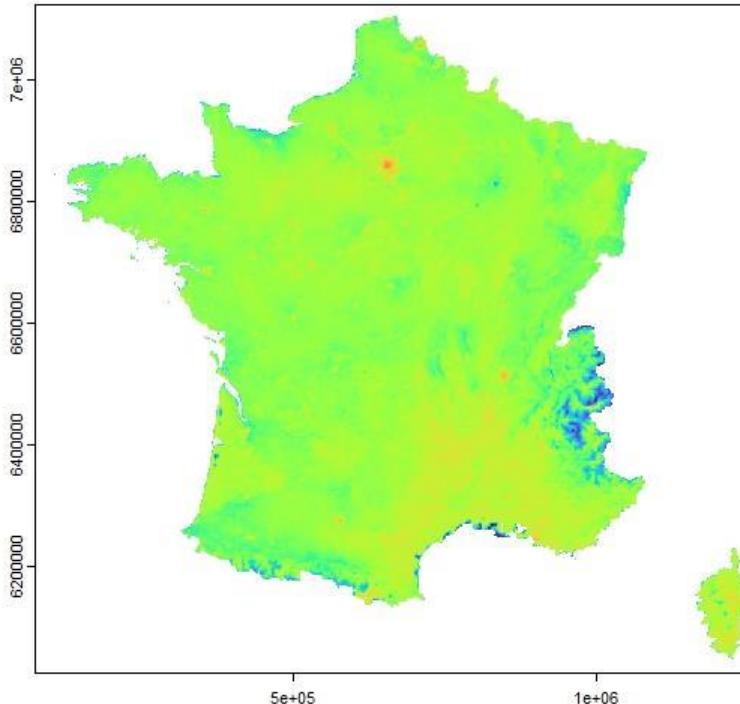


○ Vol plané ascendant

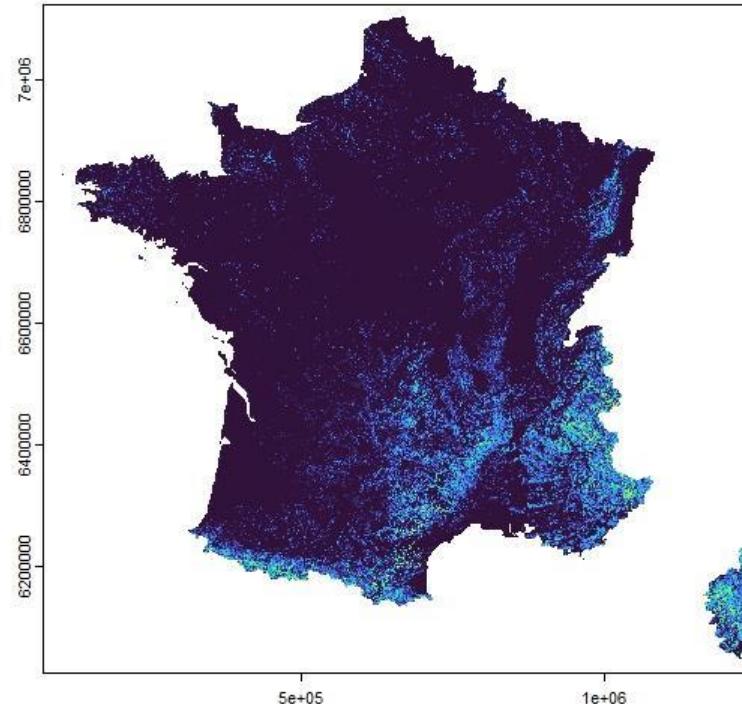
Courant ascendant



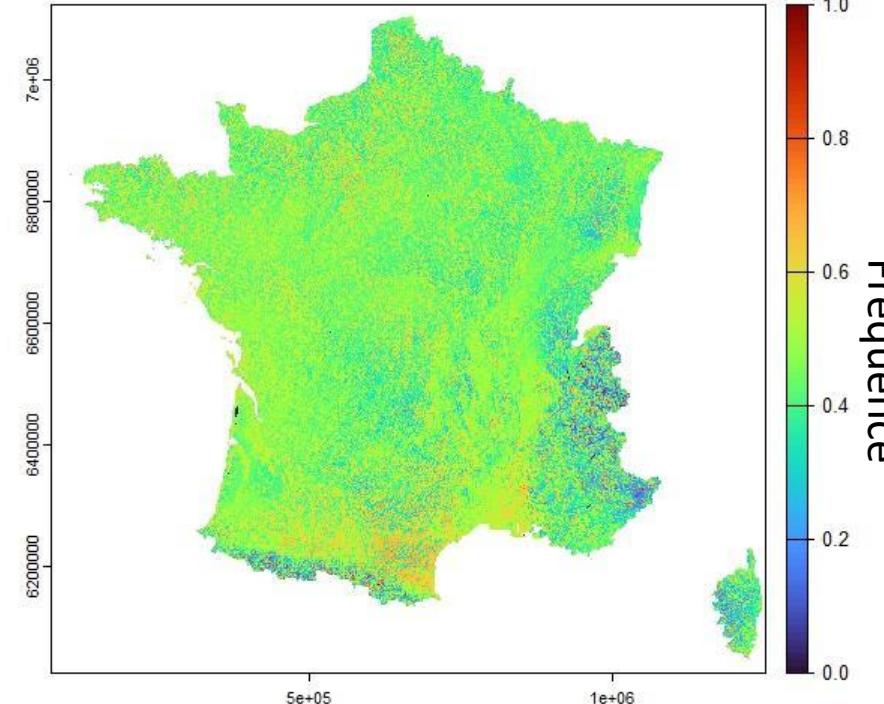
Thermiques  $\geq 0.8$  m/s



Orographiques  $\geq 0.8$  m/s



Orographiques descendants



1.0

Fréquence

0.8

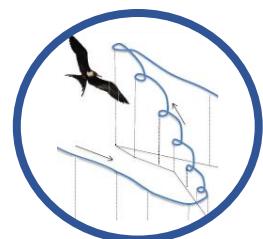
0.6

0.4

0.2

0.0

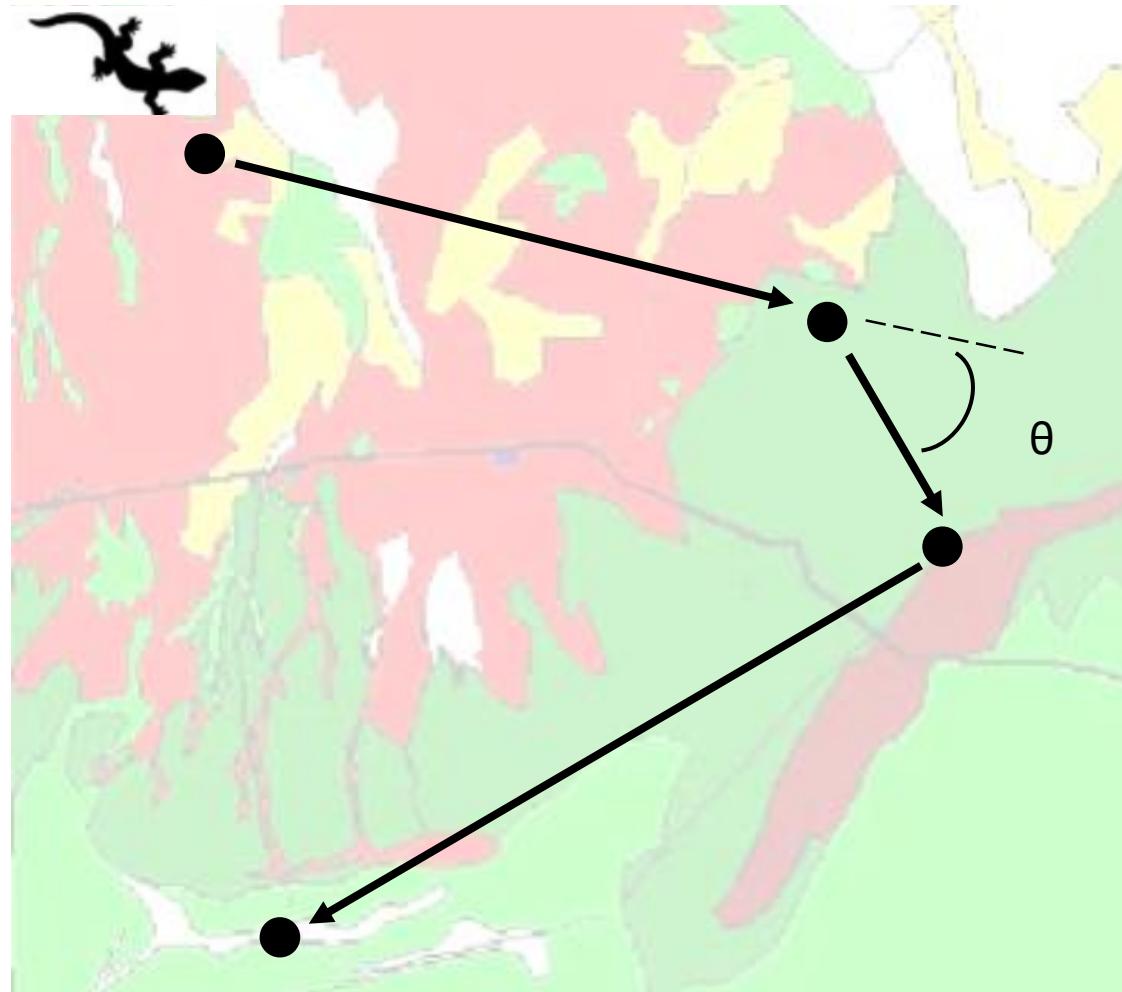
→ Hétérogénéité spatiale



### Méthode intégrée de sélection par étapes

(*integrated Step Selection Function* – iSSF)

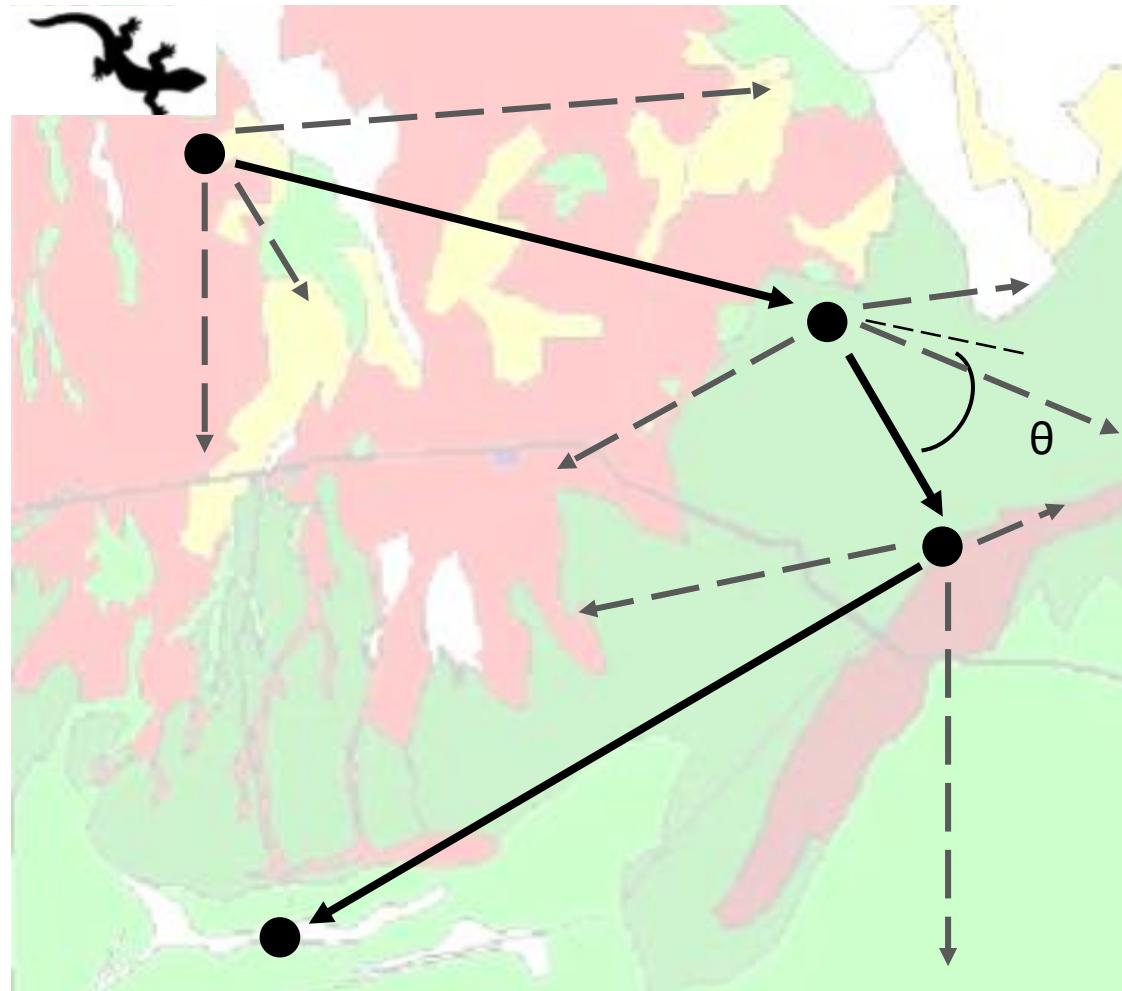
- Localisations GPS
- Longueurs de pas
- θ Angles de rotation



### Méthode intégrée de sélection par étapes

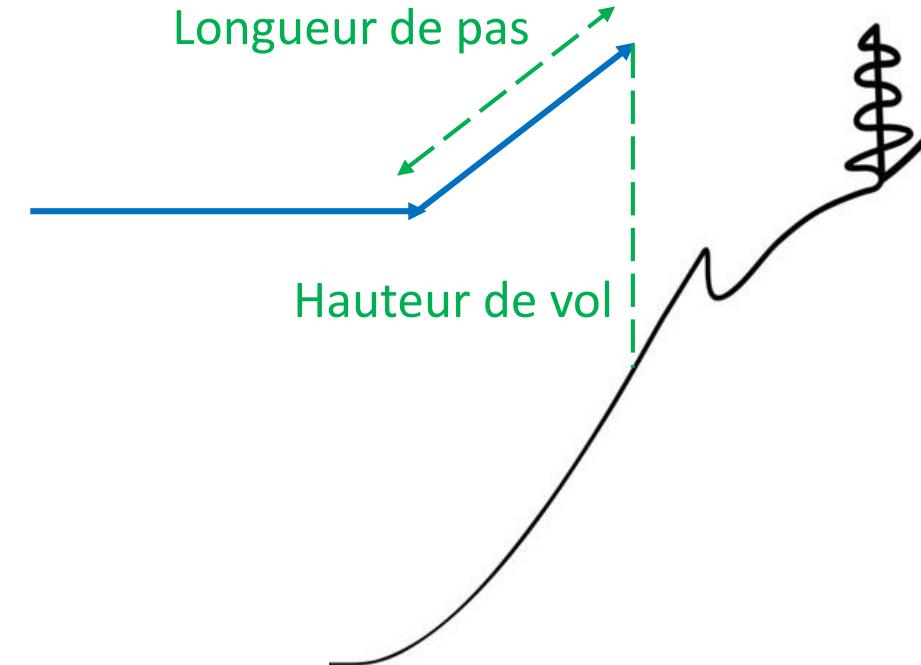
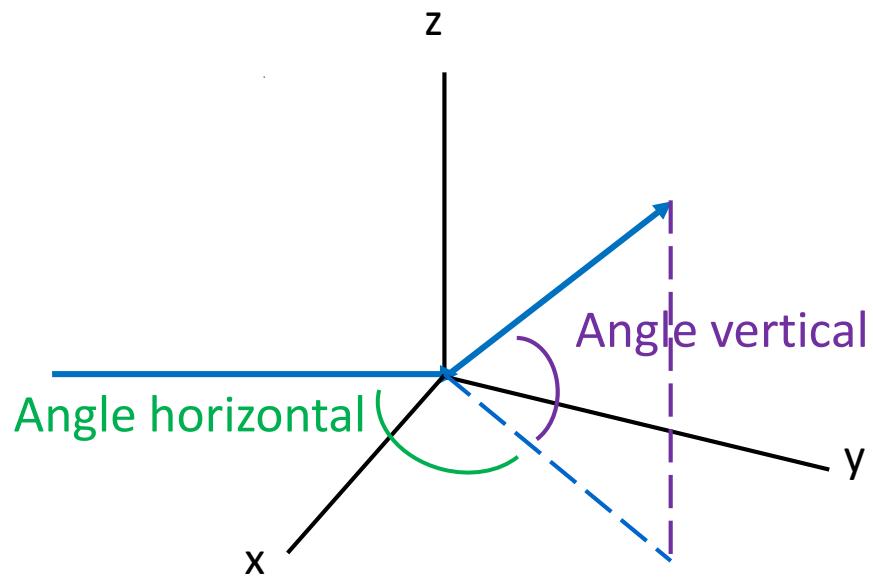
(*integrated Step Selection Function* – iSSF)

- Localisations GPS
- Longueurs de pas
- $\theta$  Angles de rotation
- > Pas disponibles



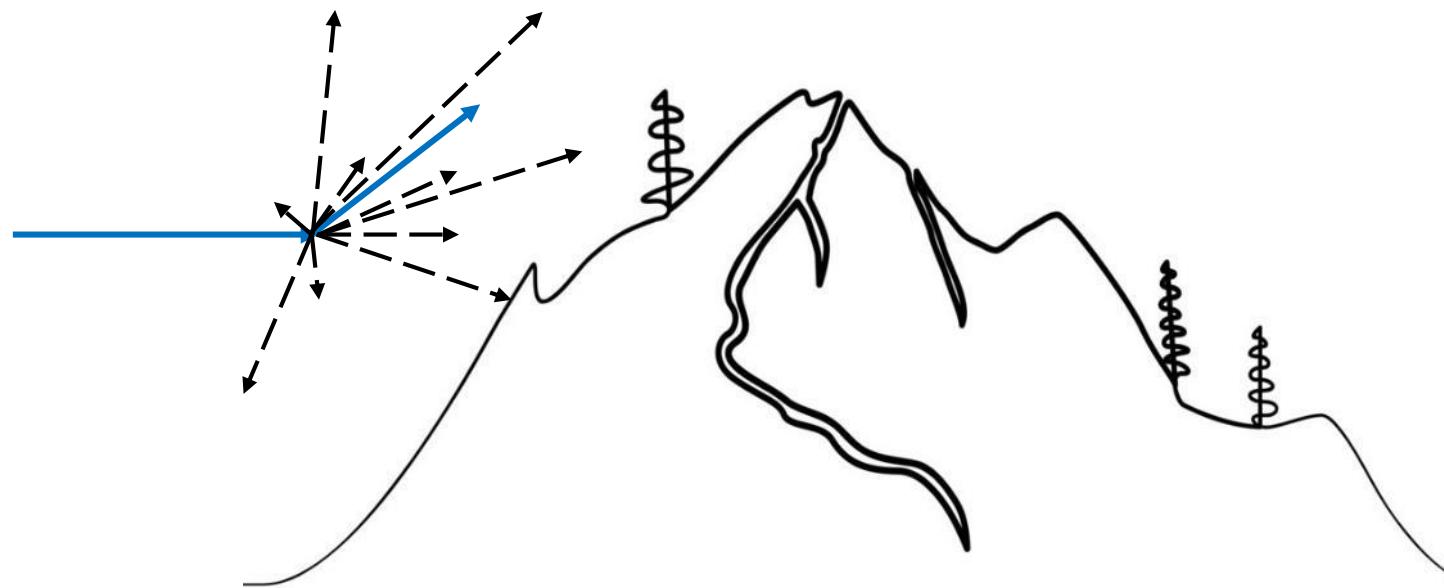
### Extension en trois dimensions

- 1<sup>e</sup> étape : la décomposition des trajectoires en 3D



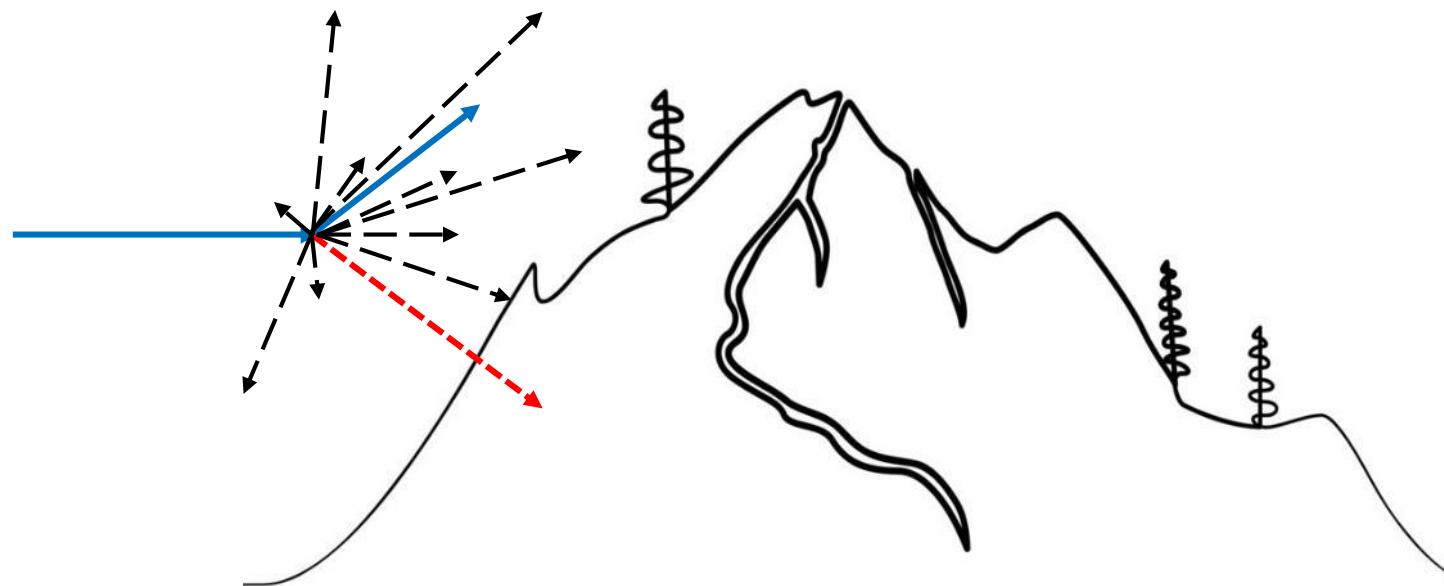
### Extension en trois dimensions

- 2<sup>e</sup> étape : générer les pas disponibles en 3D



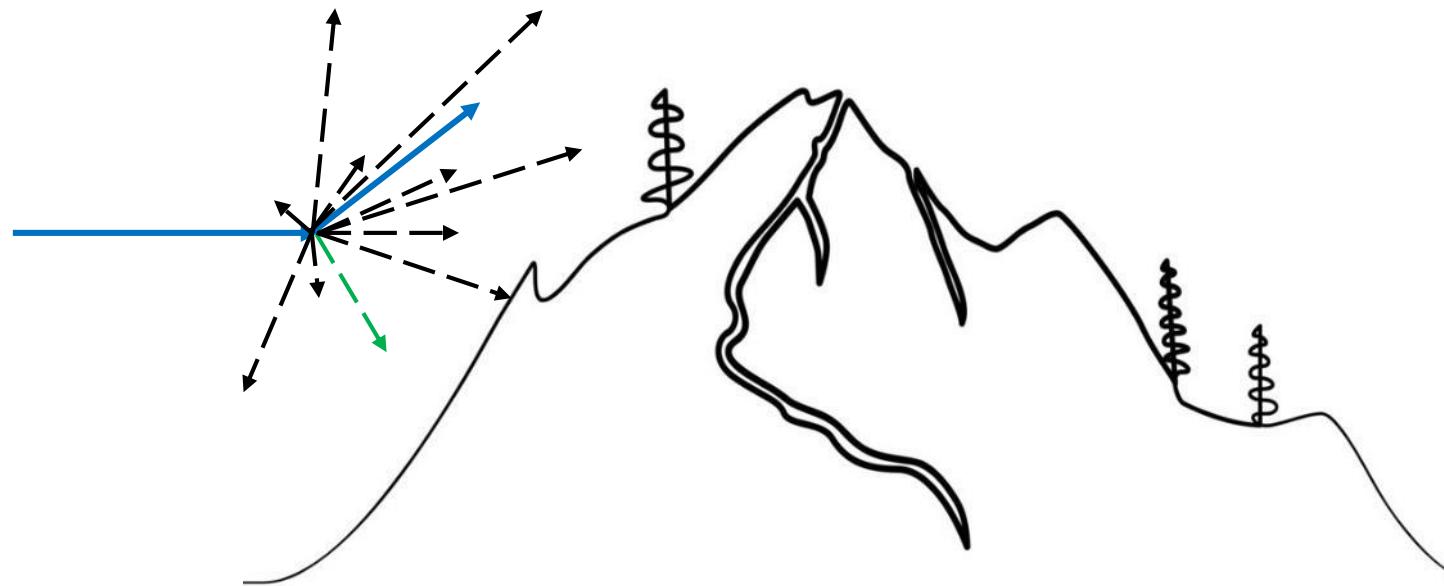
### Extension en trois dimensions

- 2<sup>e</sup> étape : générer les pas disponibles en 3D

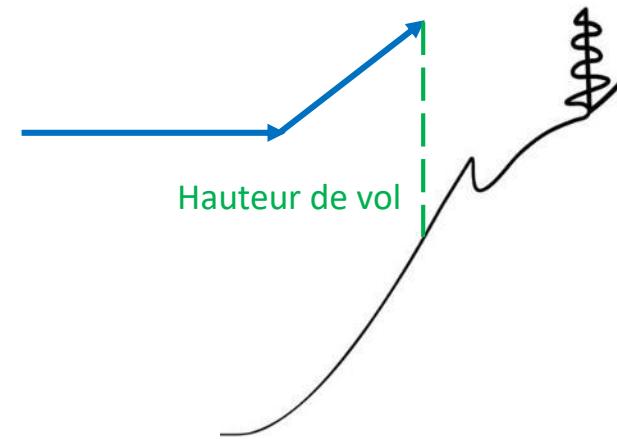
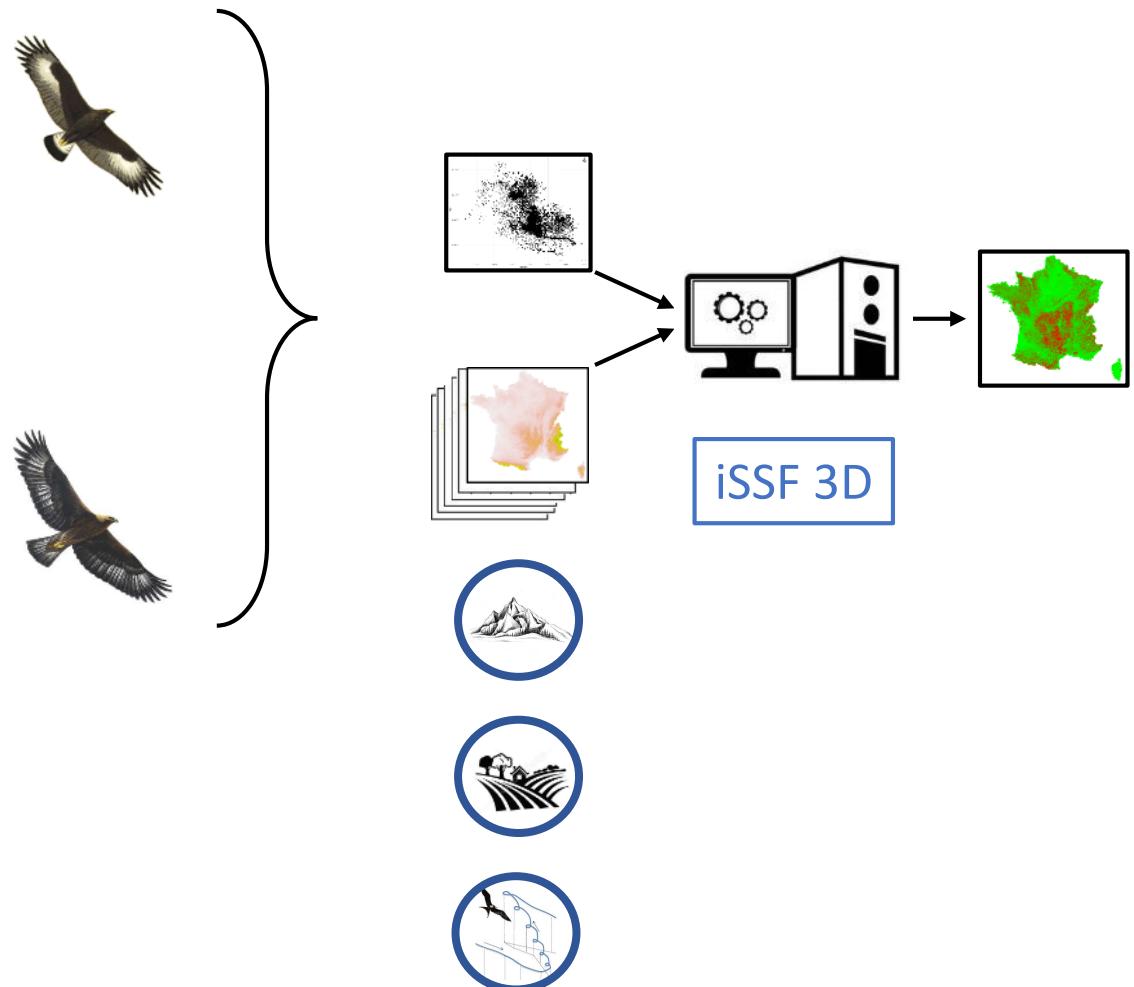


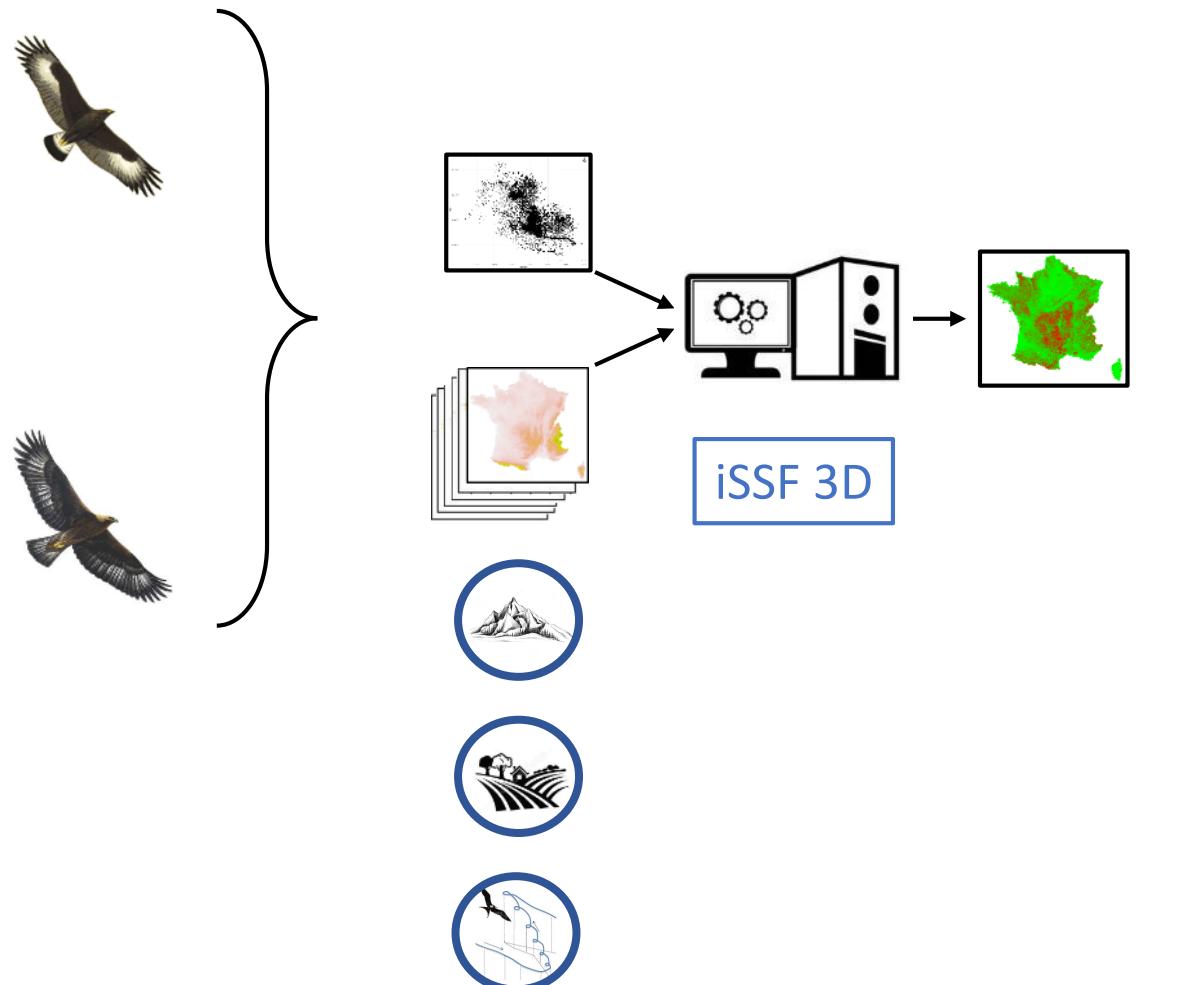
### Extension en trois dimensions

- 2<sup>e</sup> étape : générer les pas disponibles en 3D



## Partie II – La sélection d'habitats en 3D



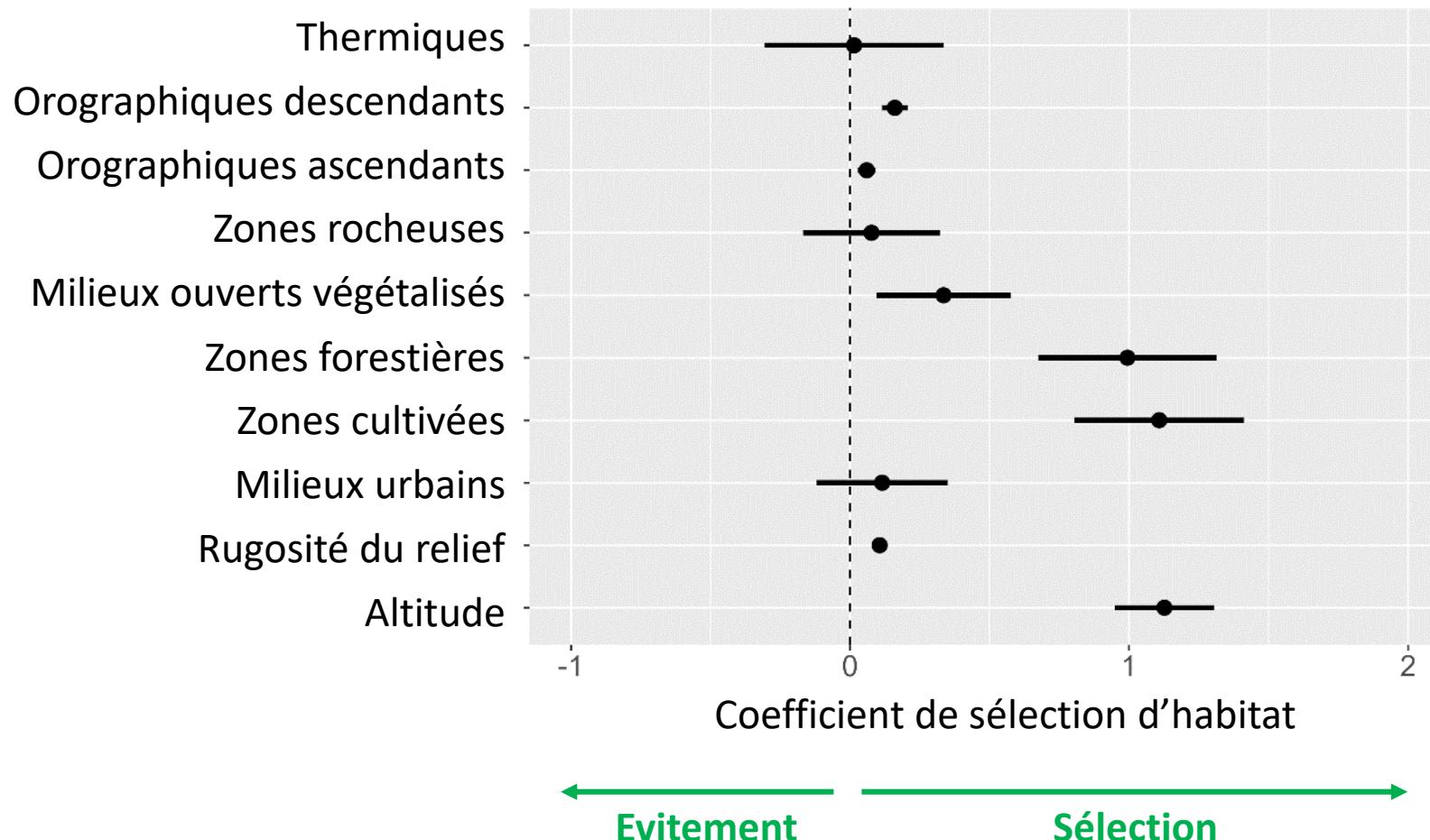


- o Cartes de prédition :

- Des zones favorables au vol sous une hauteur déterminée
- Exprimée en **risque relatif**

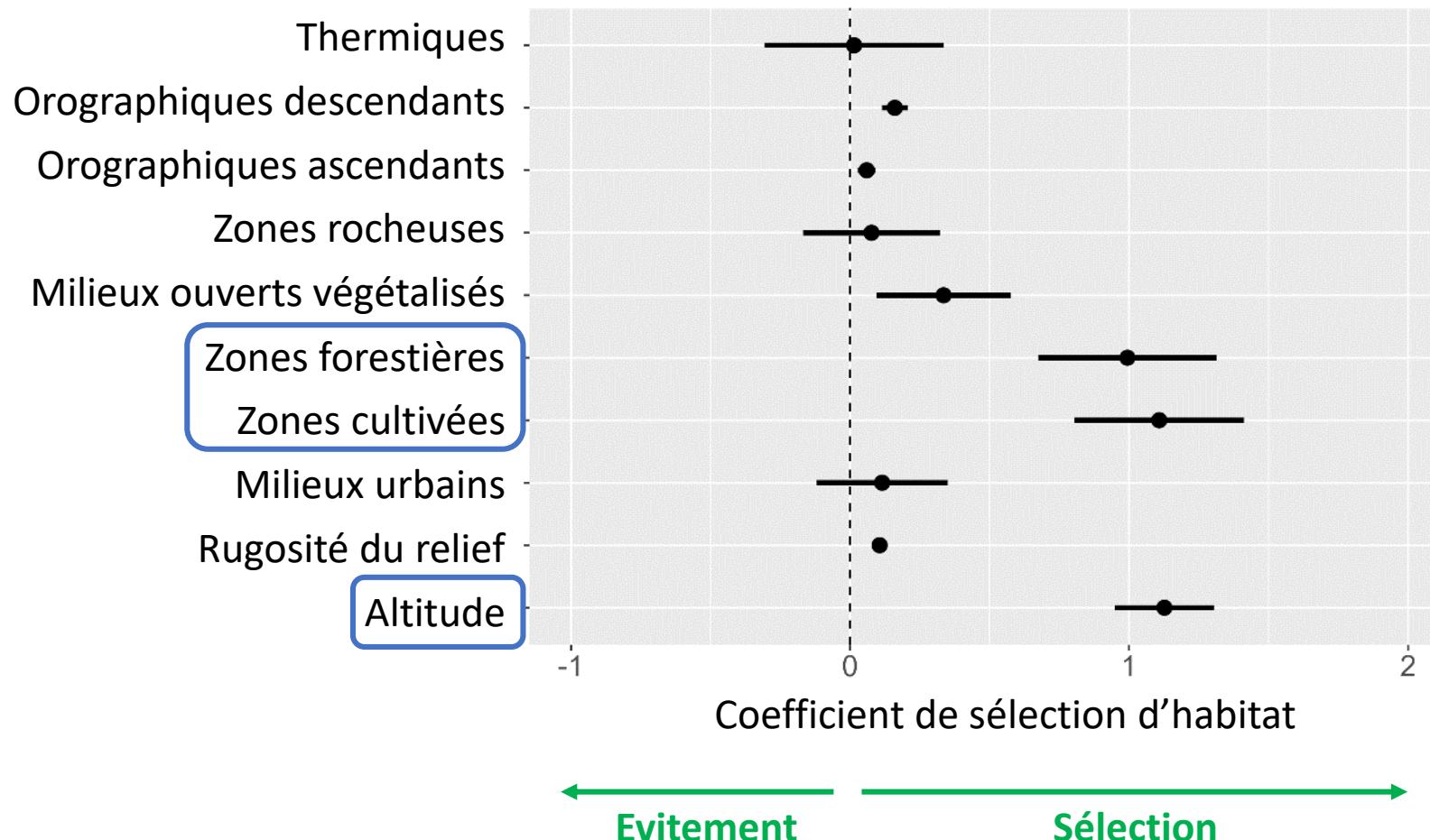
### Résultats

#### Individus territoriaux



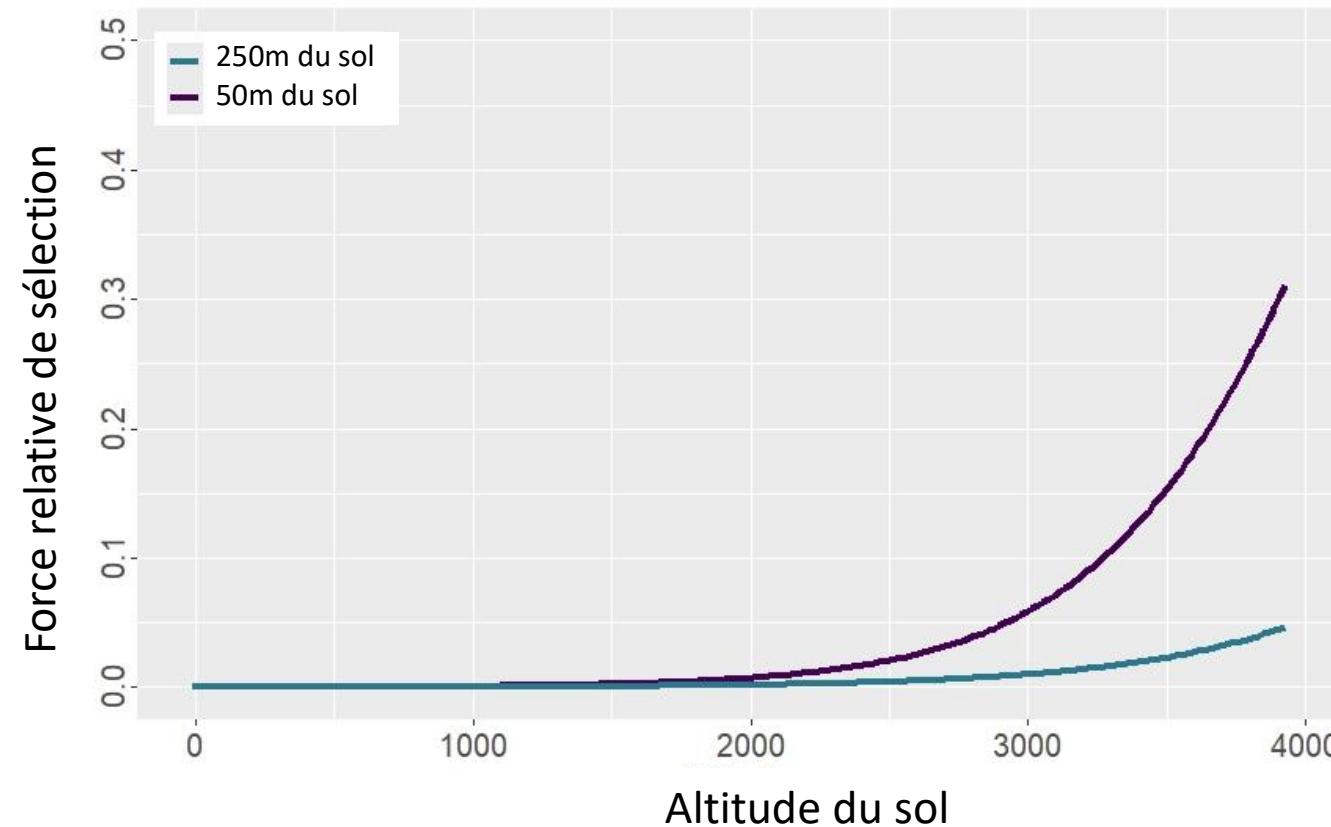
### Résultats

#### Individus territoriaux



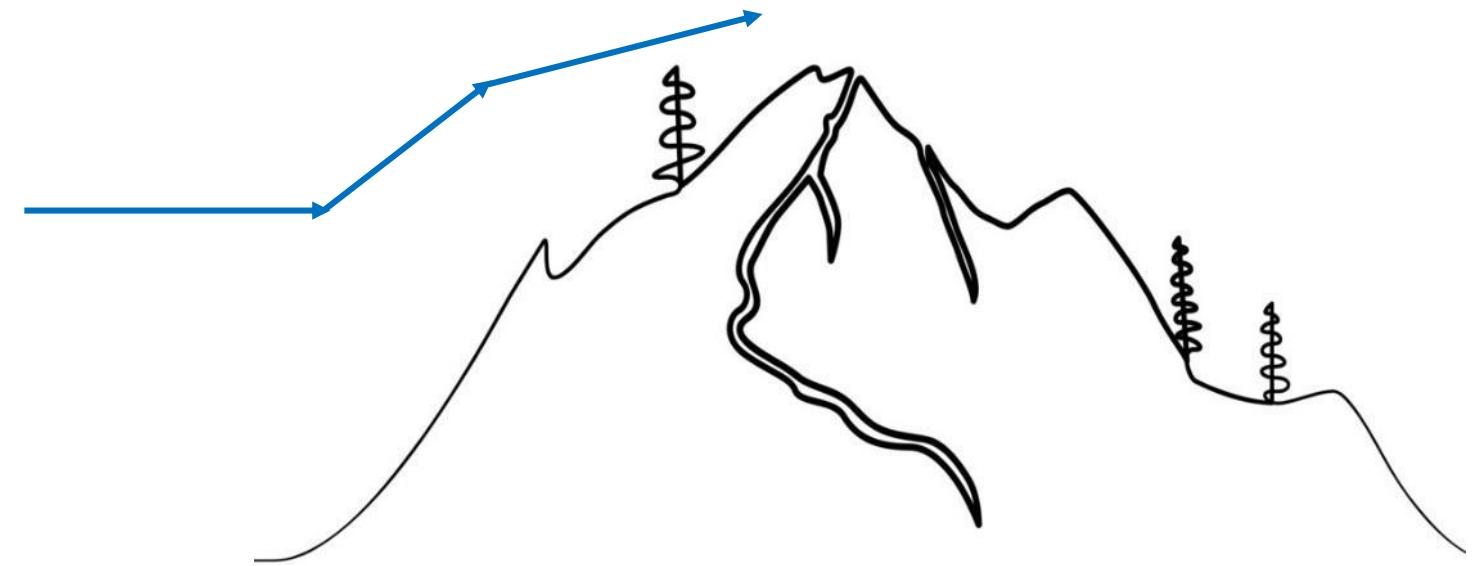
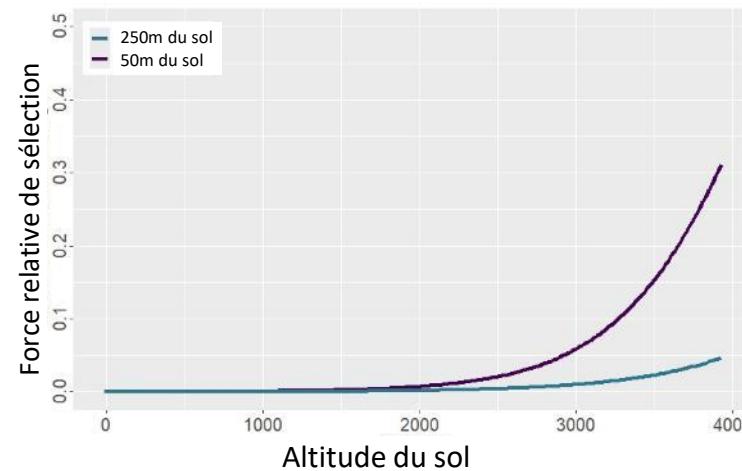
### Résultats

#### Individus territoriaux



### Résultats

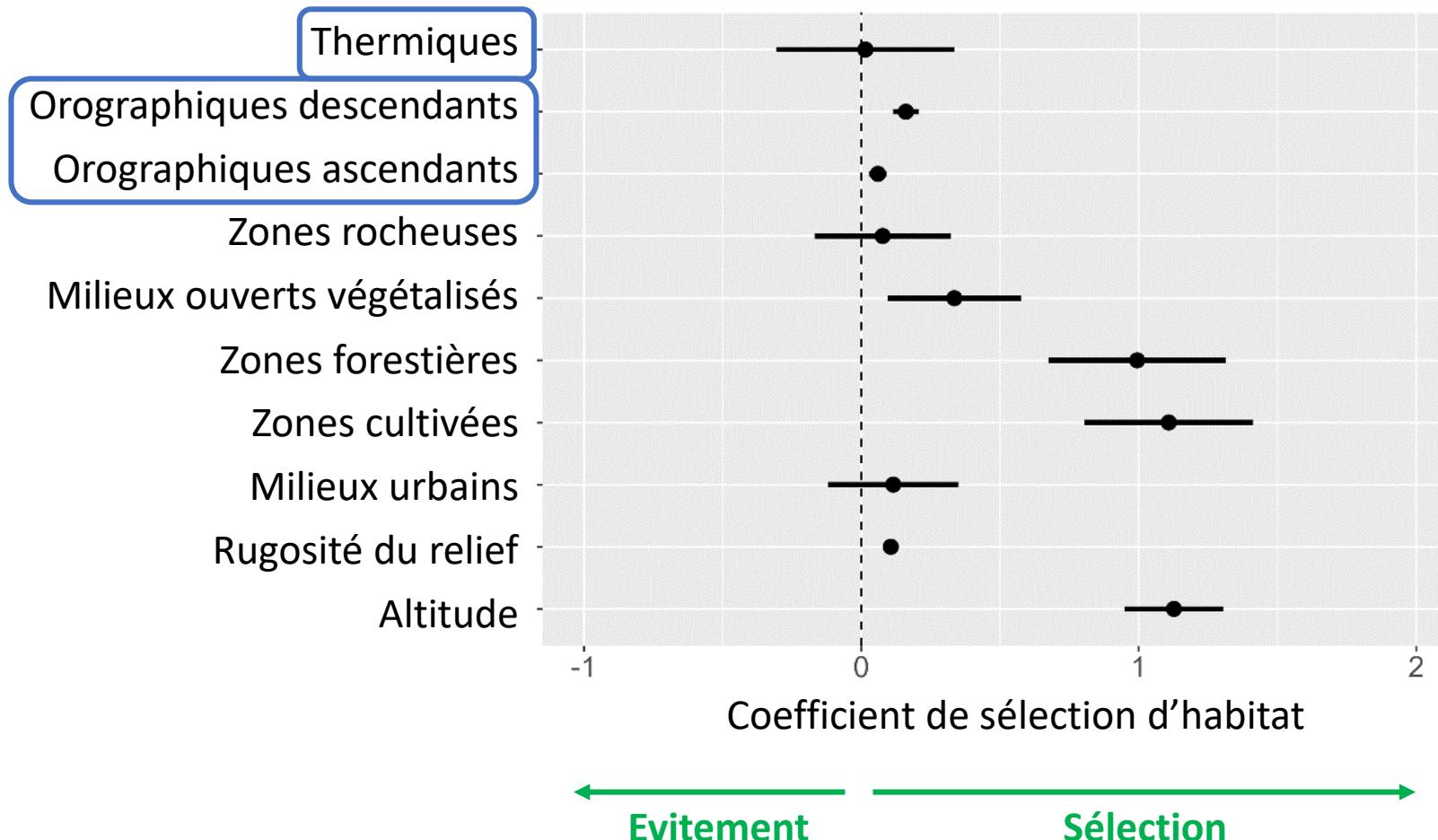
#### Individus territoriaux



Câbles aériens en zones de montagne

### Résultats

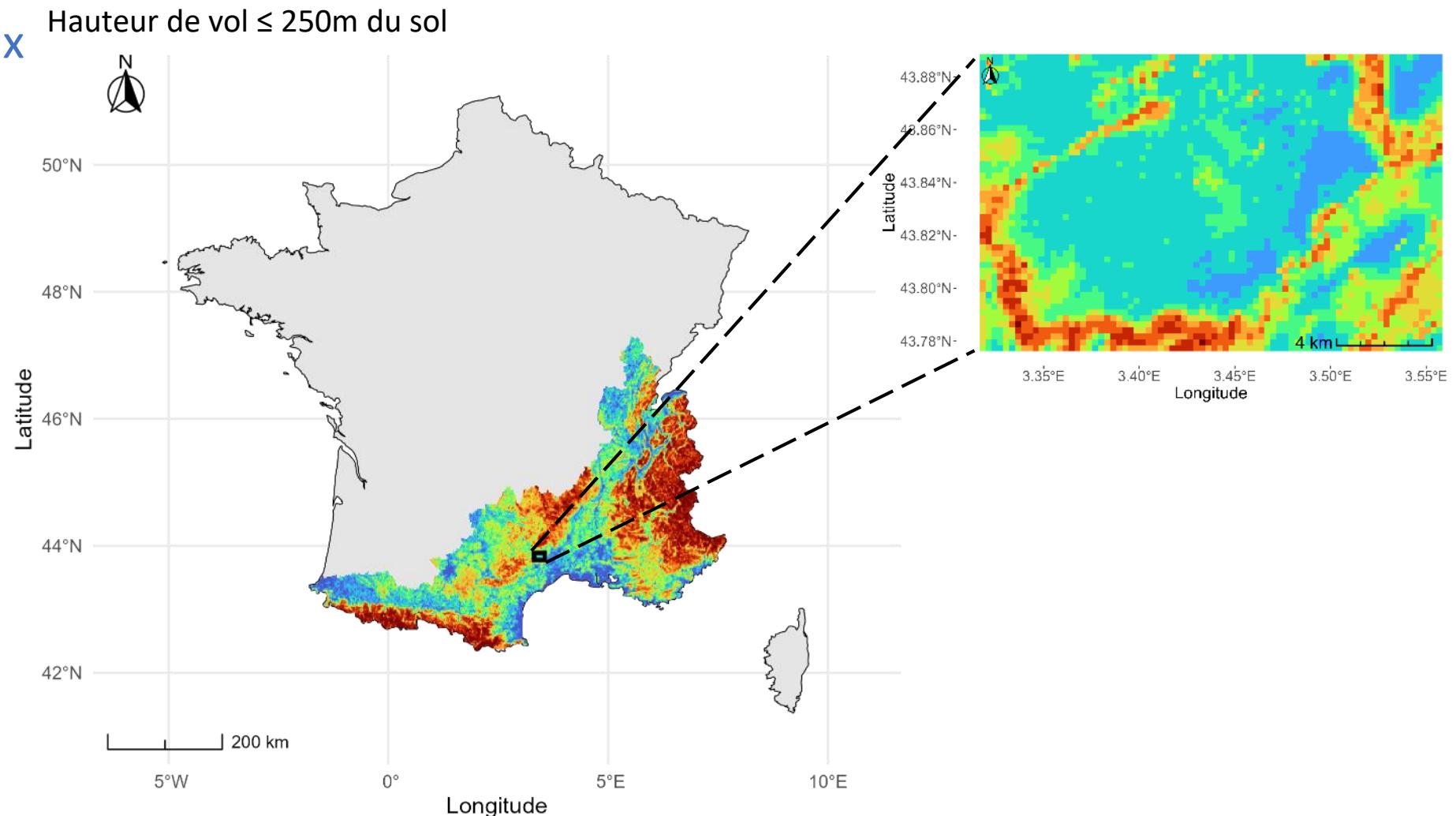
#### Individus territoriaux



## Résultats

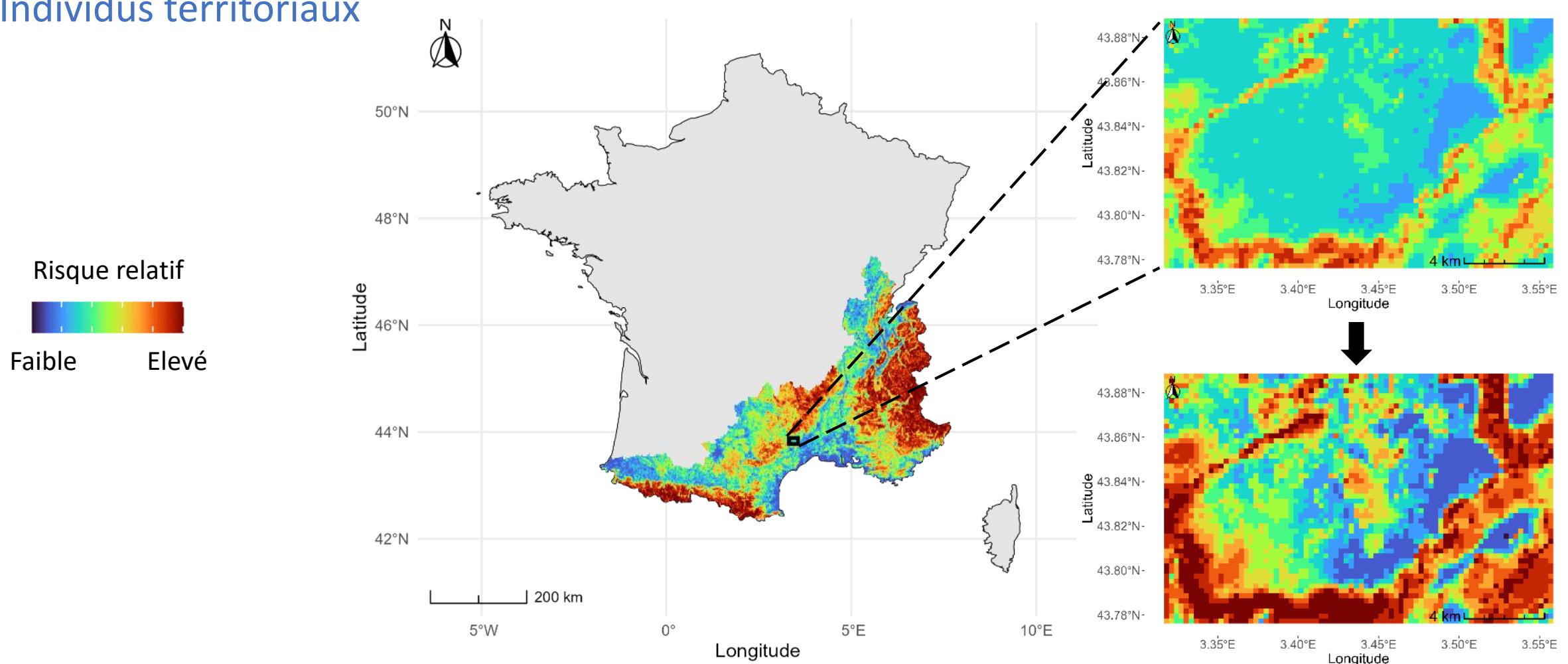
### Individus territoriaux

Risque relatif  
Faible      Elevé



## Résultats

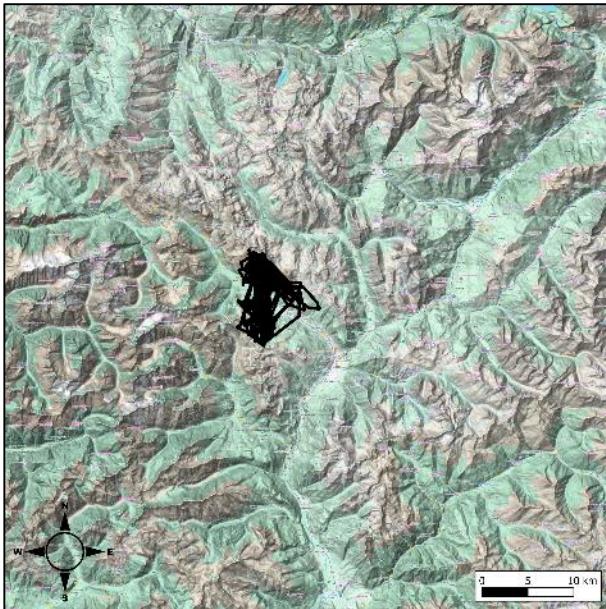
### Individus territoriaux



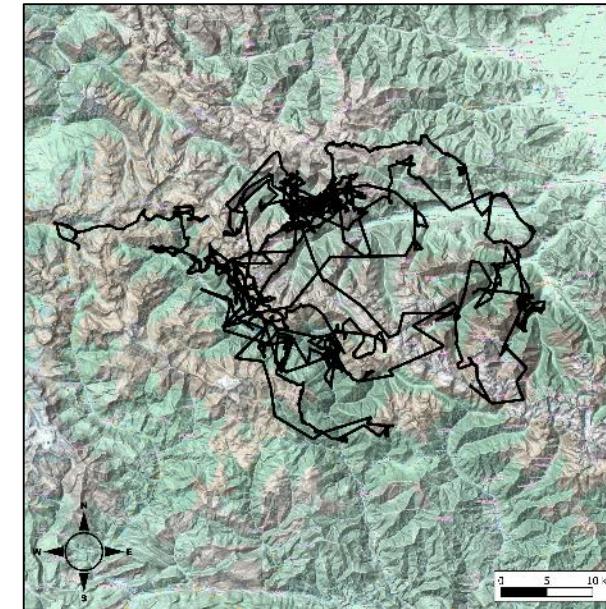
## Partie II – Comparaison avec les aigles royaux erratiques

---

Aigle territorial

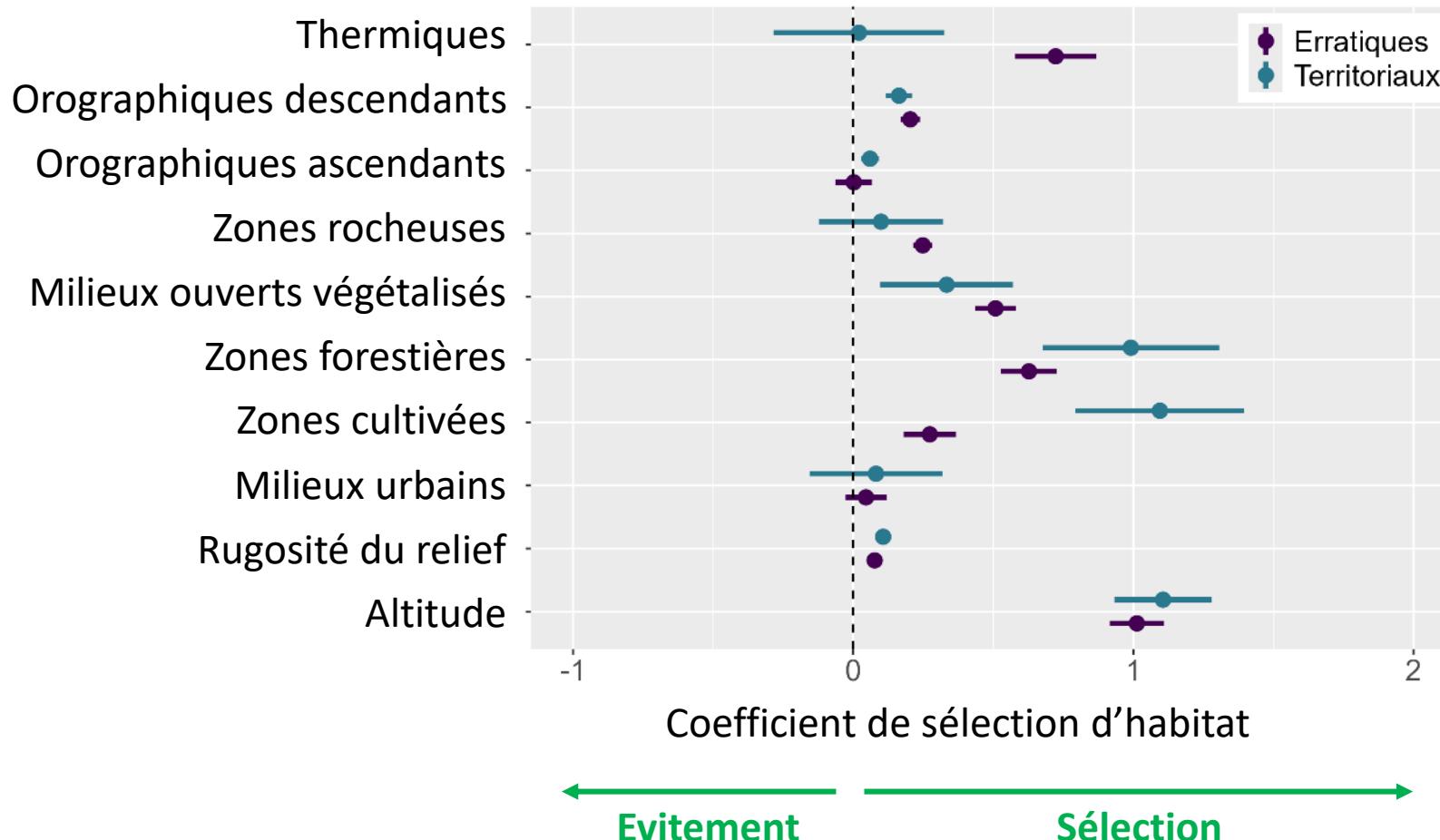


Individu en erratisme



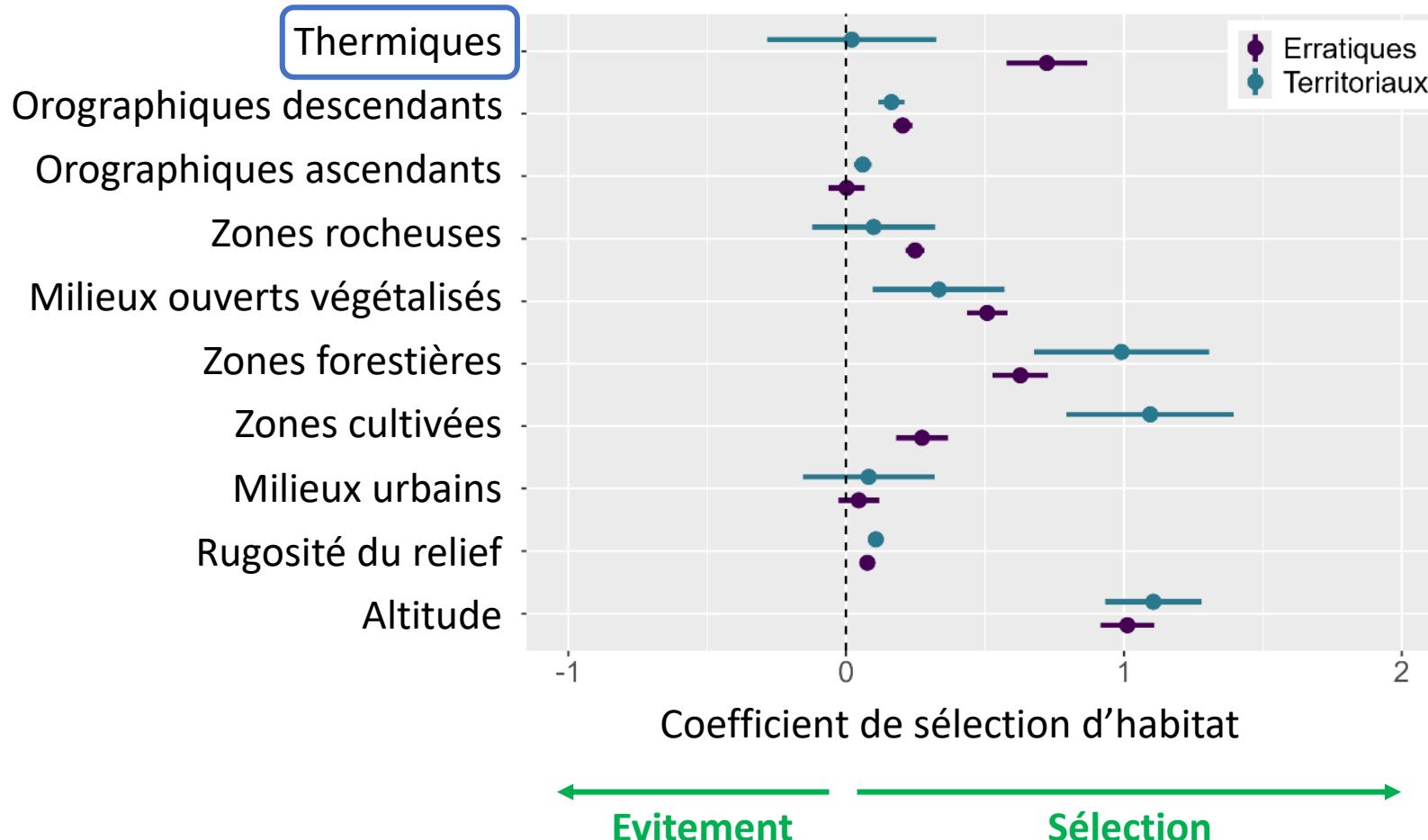
### Résultats

#### Individus erratiques



### Résultats

#### Individus erratiques

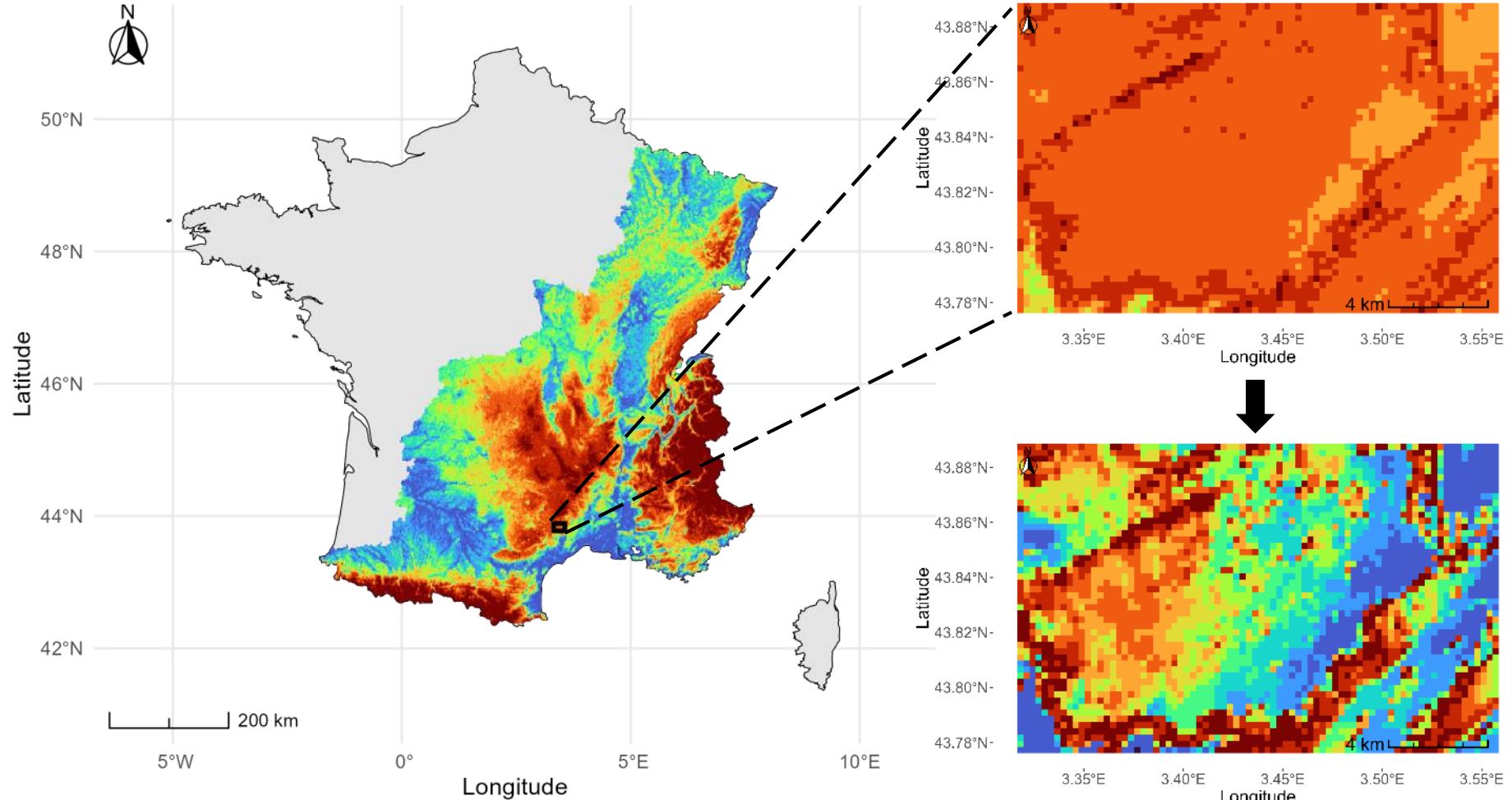


### Résultats

#### Individus erratiques

Risque relatif  
Faible      Elevé

Hauteur de vol  $\leq 250$ m du sol



## Partie II – Comparaison avec les aigles royaux erratiques

### Résultats

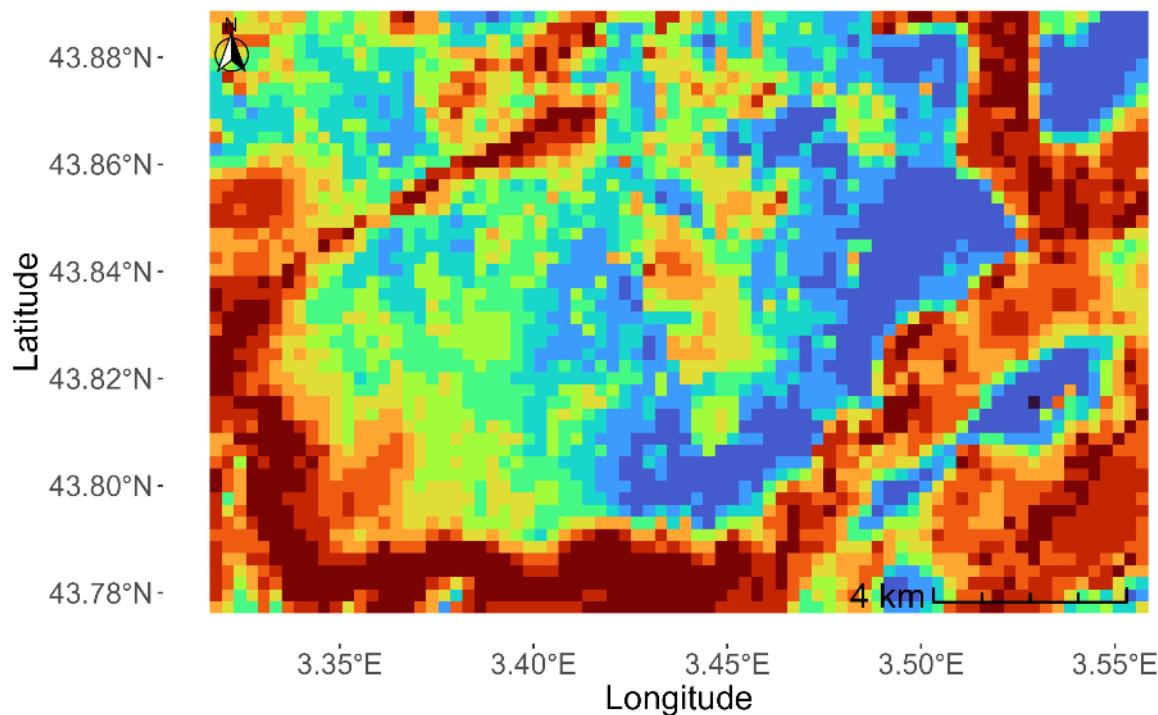
#### Individus territoriaux vs. erratiques

Risque relatif

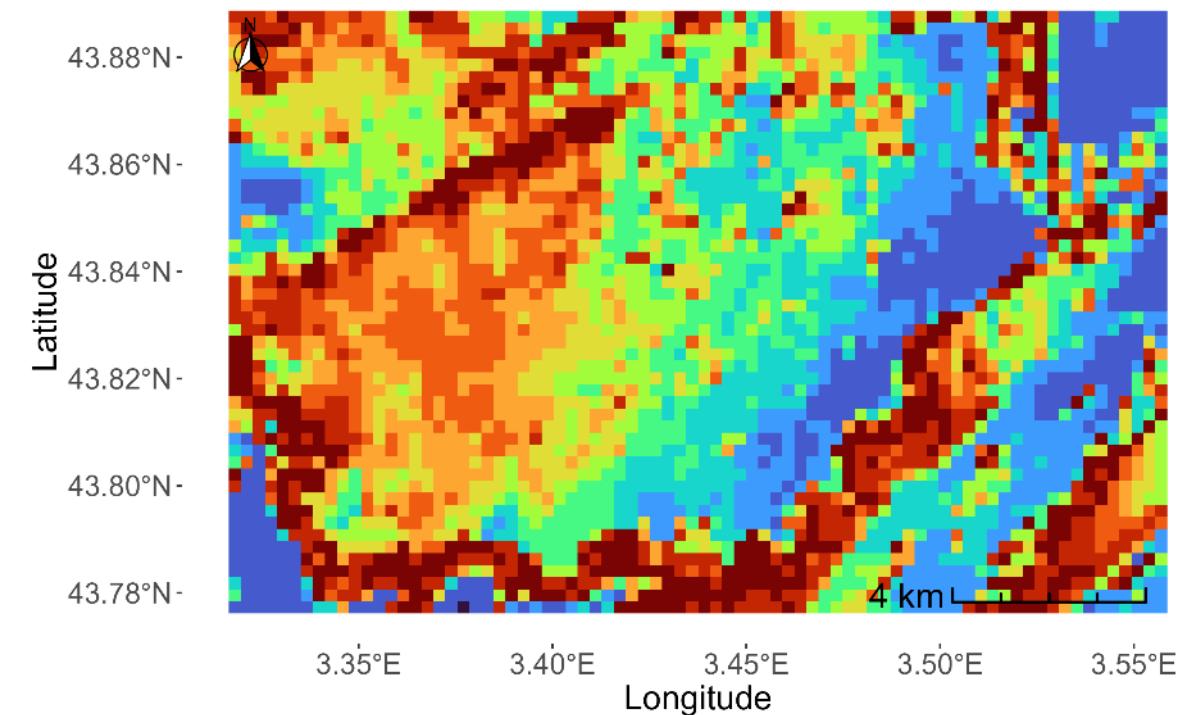


Faible      Elevé

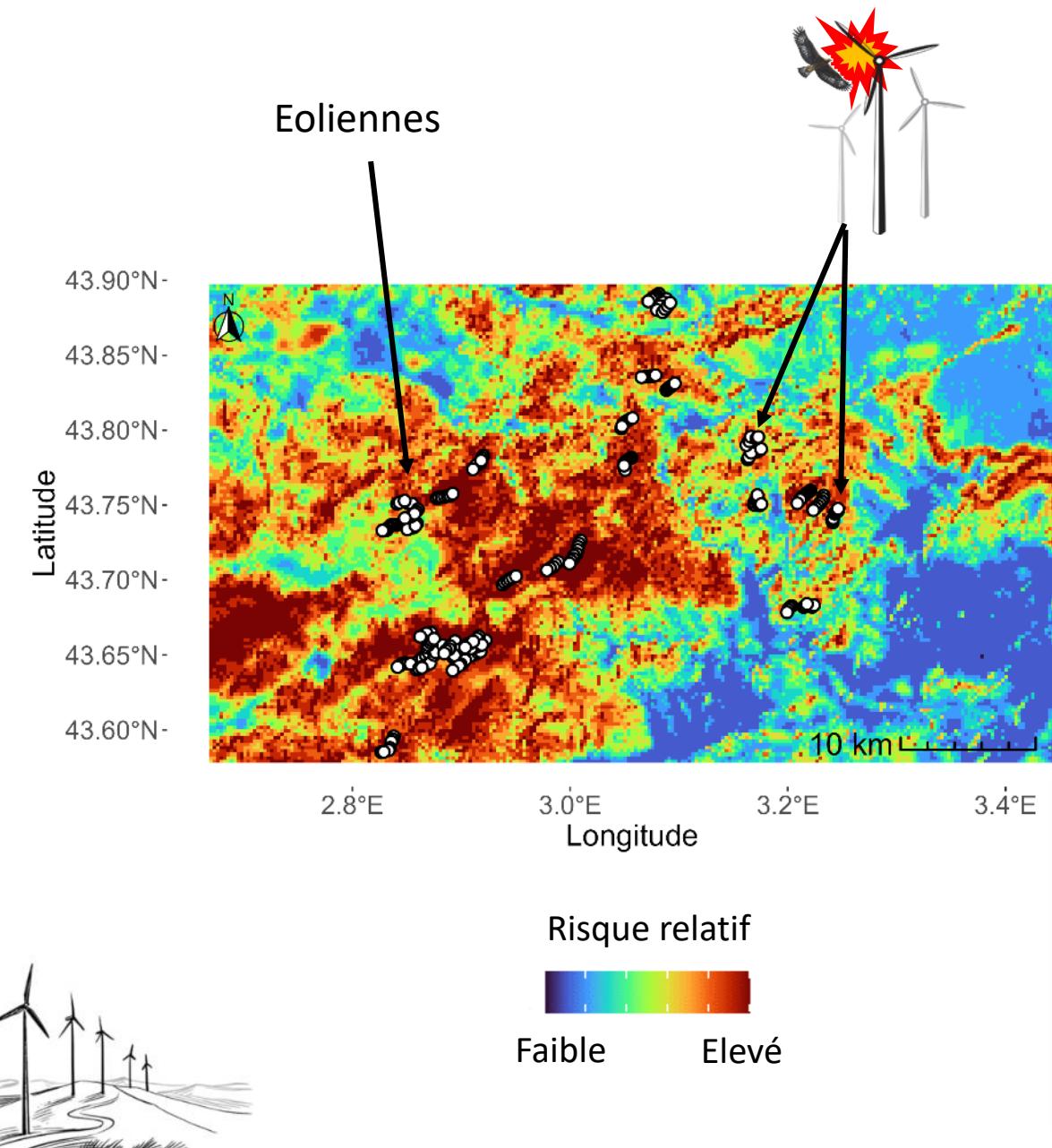
Aigles royaux territoriaux



Aigles royaux erratiques



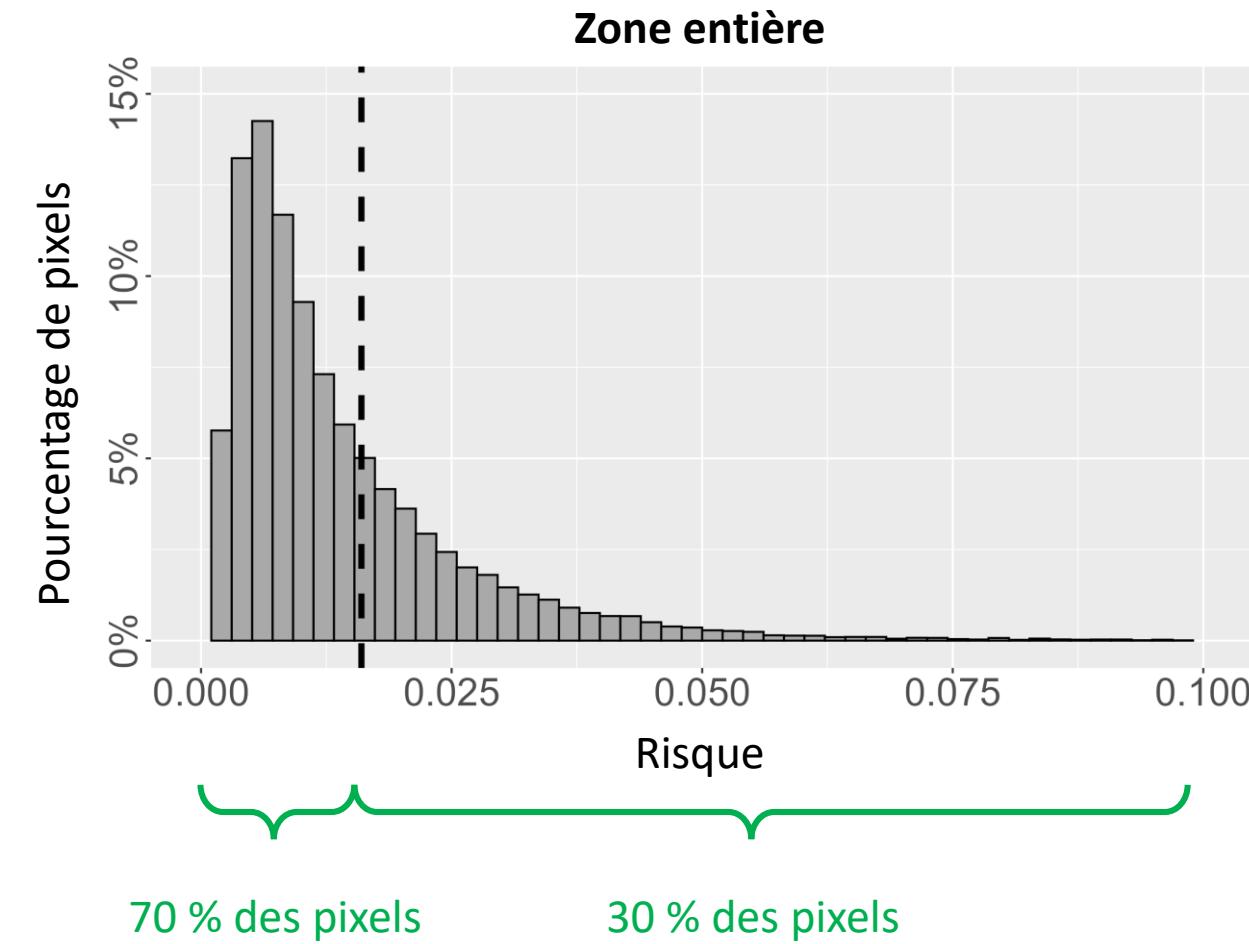
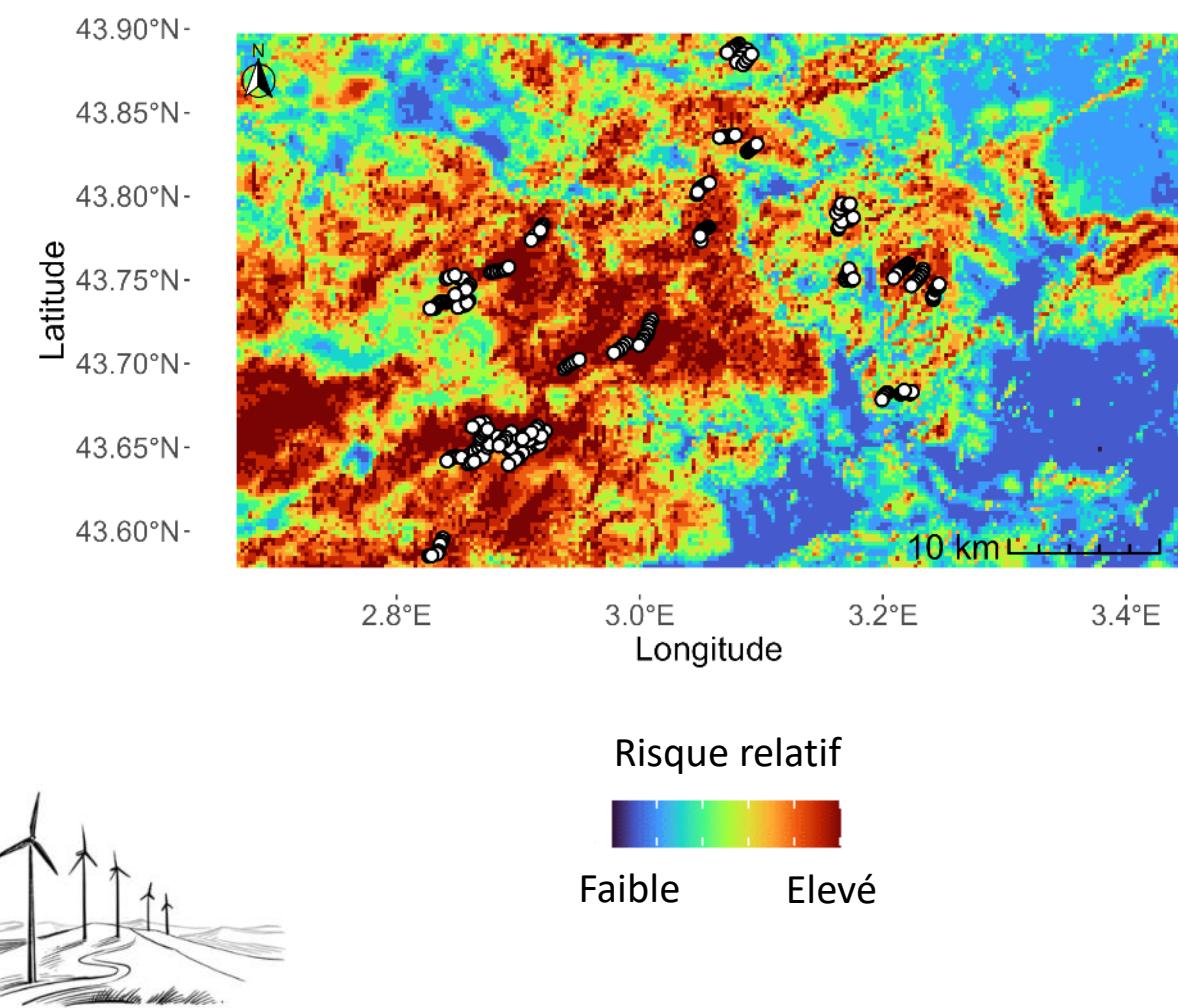
## Partie II – Mise en application



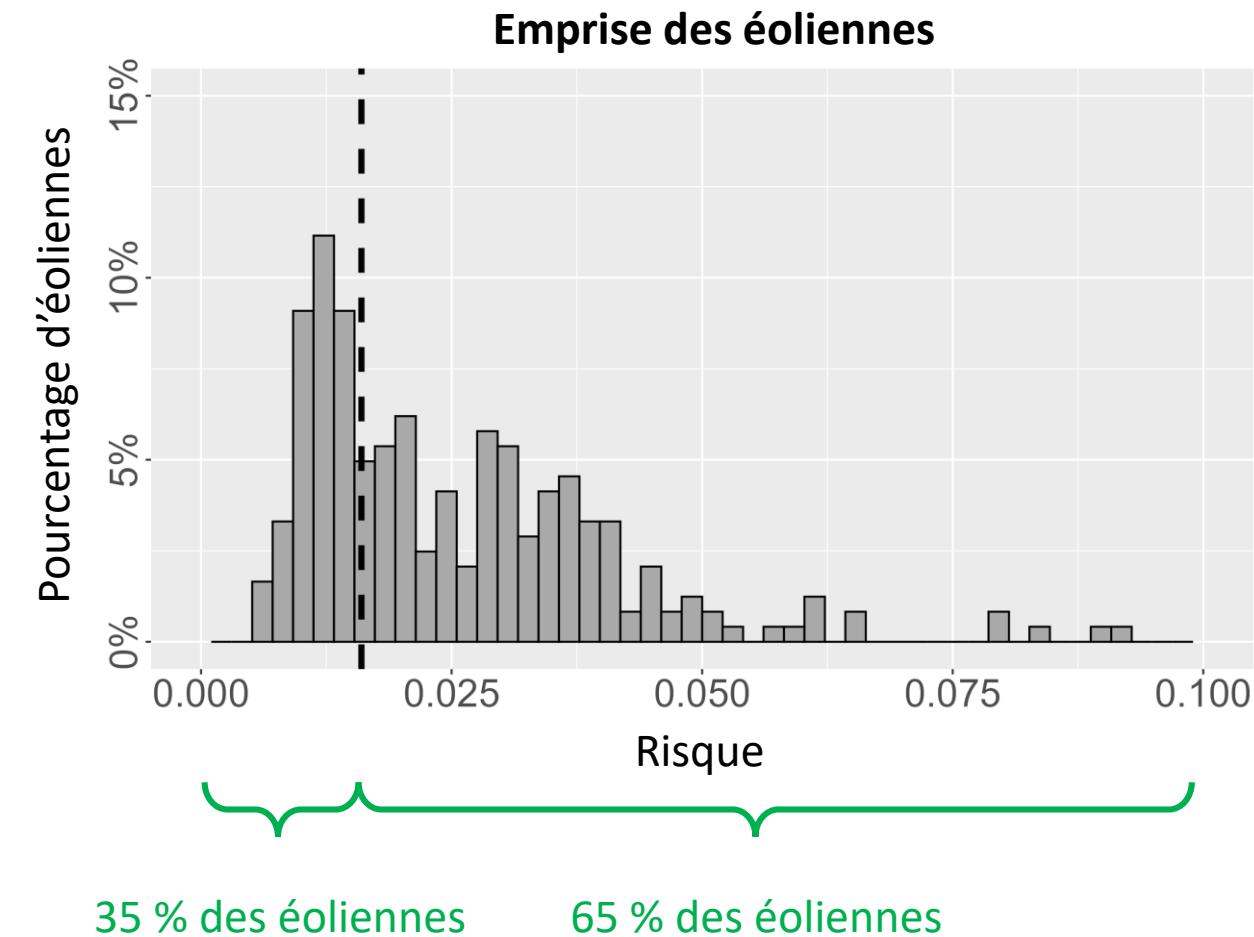
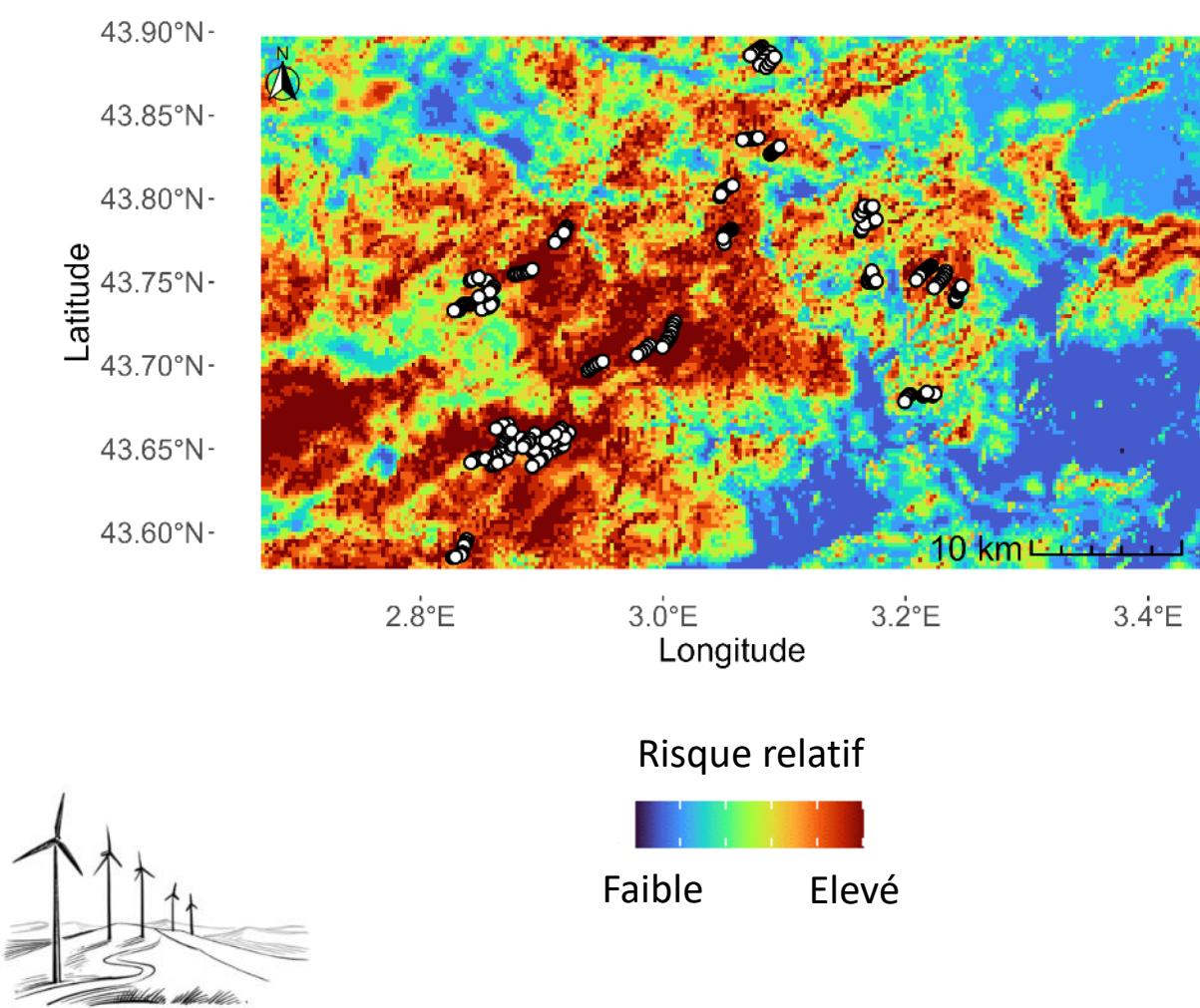
- Massif du Haut Languedoc :
  - 243 éoliennes
  - 10 territoires d'aigles royaux
  - 2 collisions documentées (GPS)



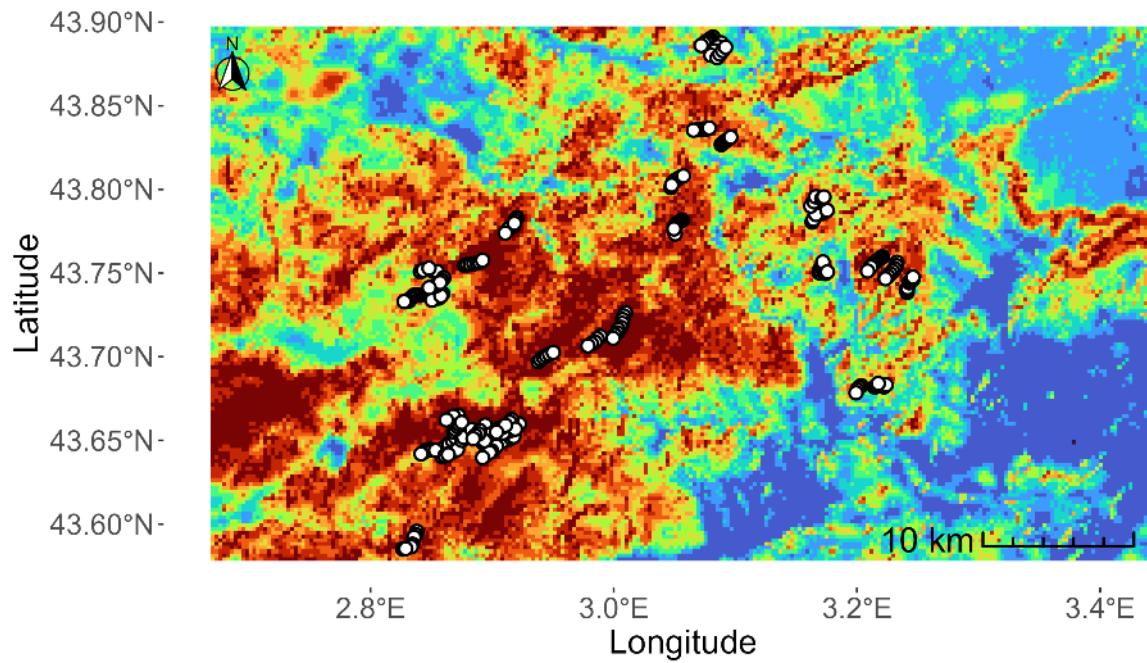
## Partie II – Mise en application



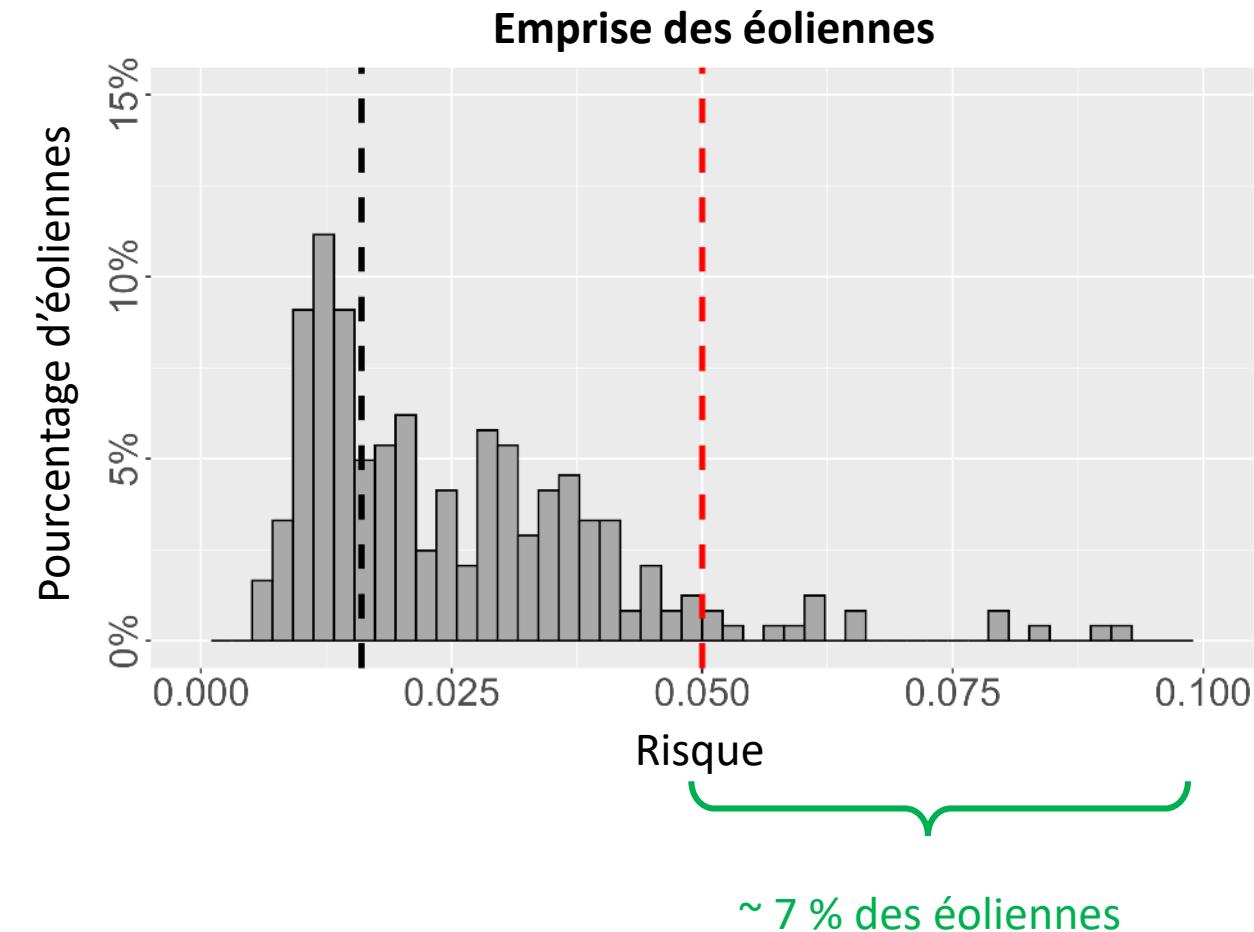
## Partie II – Mise en application



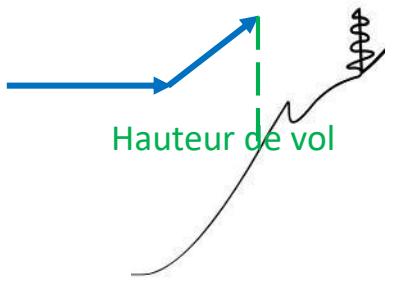
## Partie II – Mise en application



Risque relatif  
Faible      Elevé



## 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



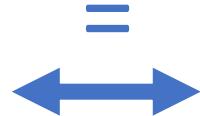
## Juvénile en apprentissages

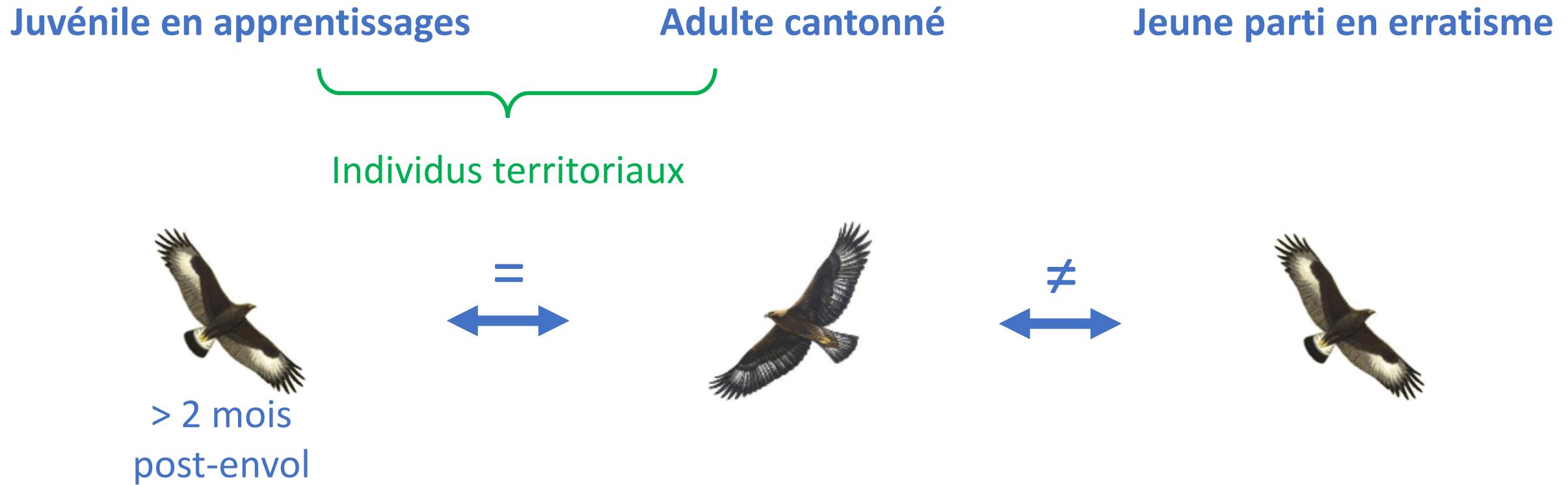
## Adulte cantonné

## Individus territoriaux



> 2 mois  
post-envol





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

**Juvénile en apprentissages**



> 2 mois  
post-envol

Survie +

**Adulte cantonné**



Survie +++

**Jeune parti en erratisme**



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 ?



Crédit : Yann Serreau



Crédit : Yann Serreau

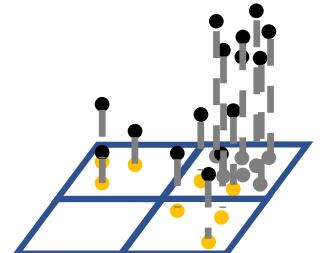
o Développement méthodologique



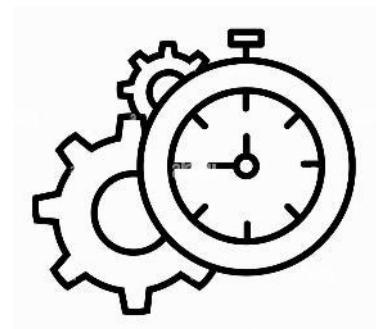
Extension en 3D des iSSF



DATA CENTER



Chronophage  
&  
Besoin de puissance de calcul



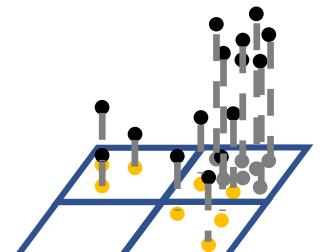
o Développement méthodologique



Extension en 3D des iSSF



DATA CENTER

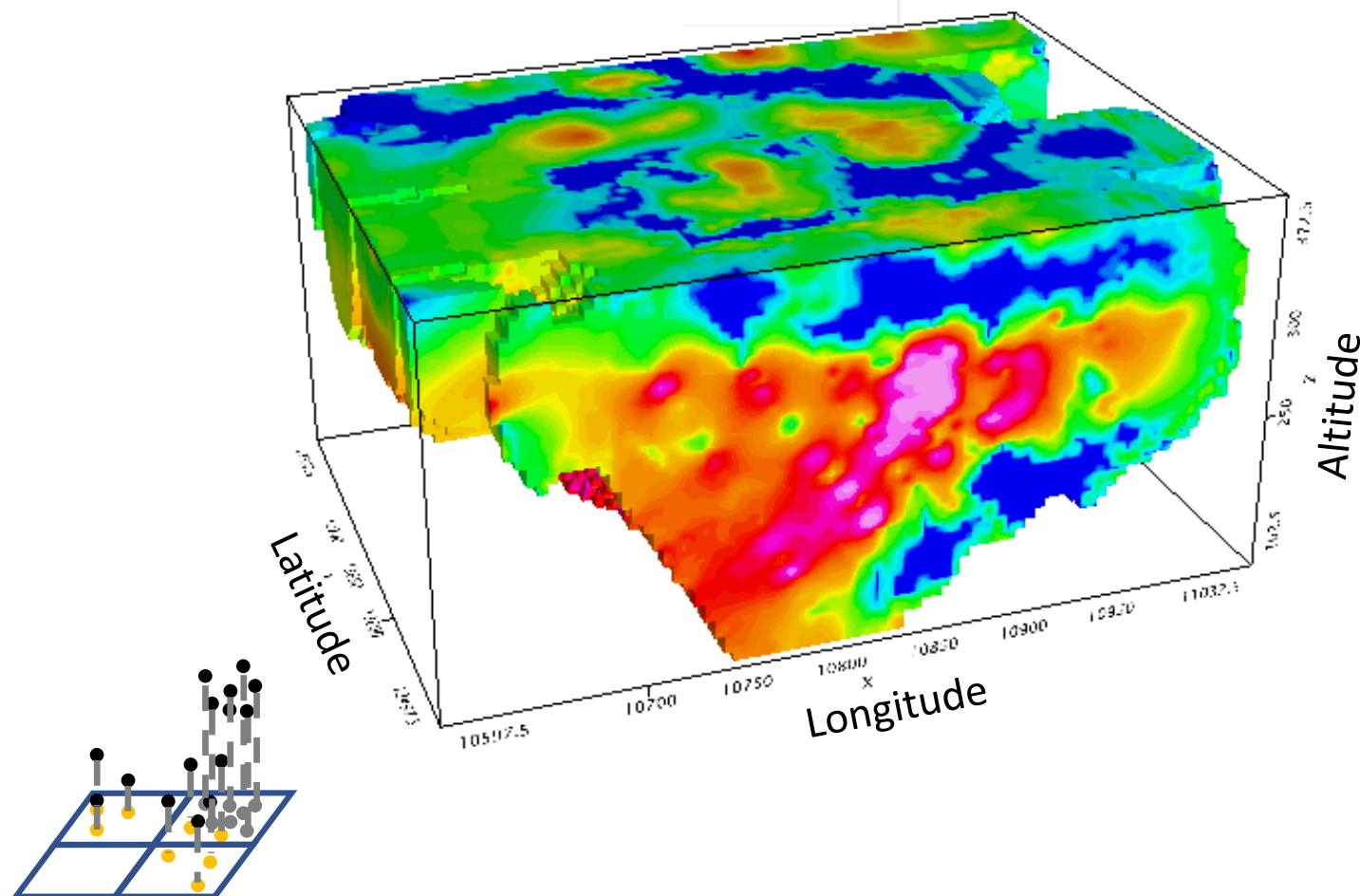


Des améliorations possible :  
cartes d'incertitude

- 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



Aurélien Besnard



Olivier Duriez

- Ecologie appliquée



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

- En accès libre sur internet :

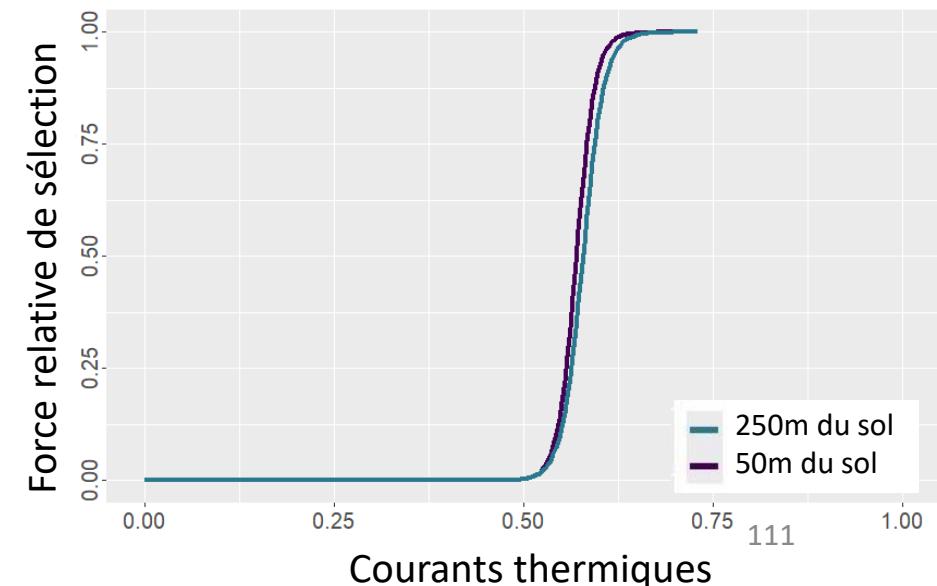
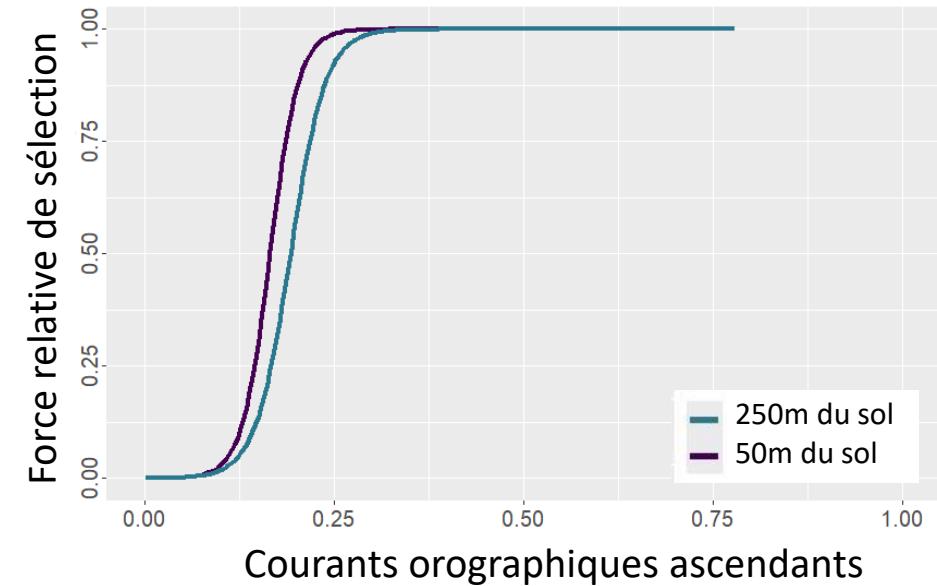
- Cartes en LizMap, associées à des aides
- Courants aériens, aigles royaux et vautours fauves



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

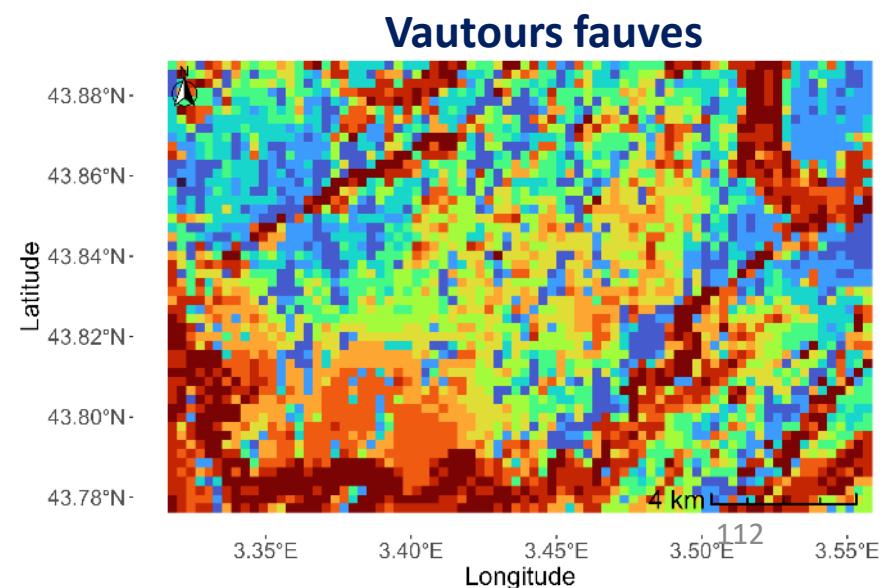
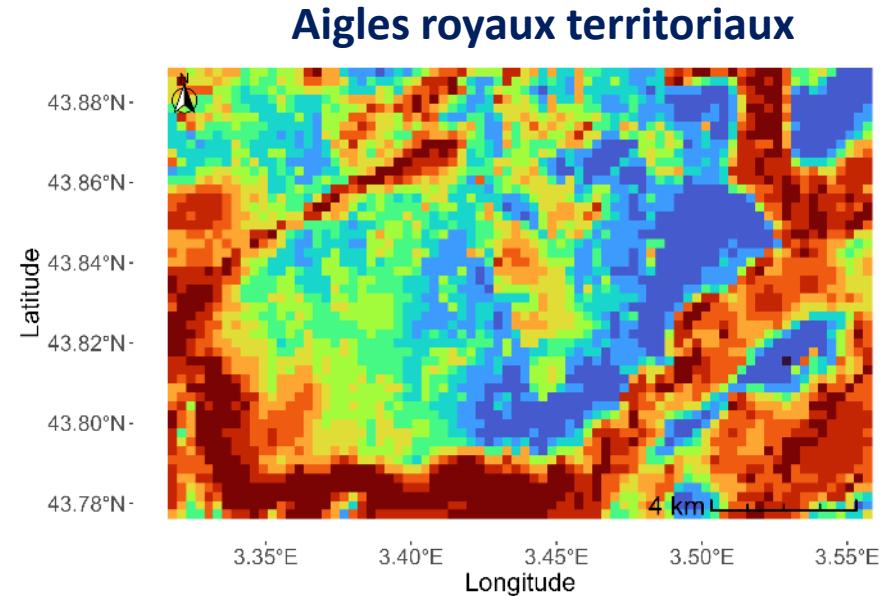
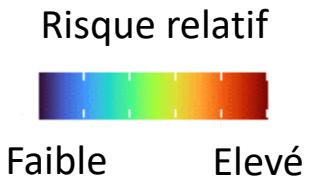


## Démarche reproductible à d'autres espèces

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



Comment choisir ?



## 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

