



Vers un jumeau numérique de l'oiseau marin

Noémie Muquet — noemie.muquet@ird.fr

Thèse dirigée par Sophie Lanco et Jean-Daniel Zucker

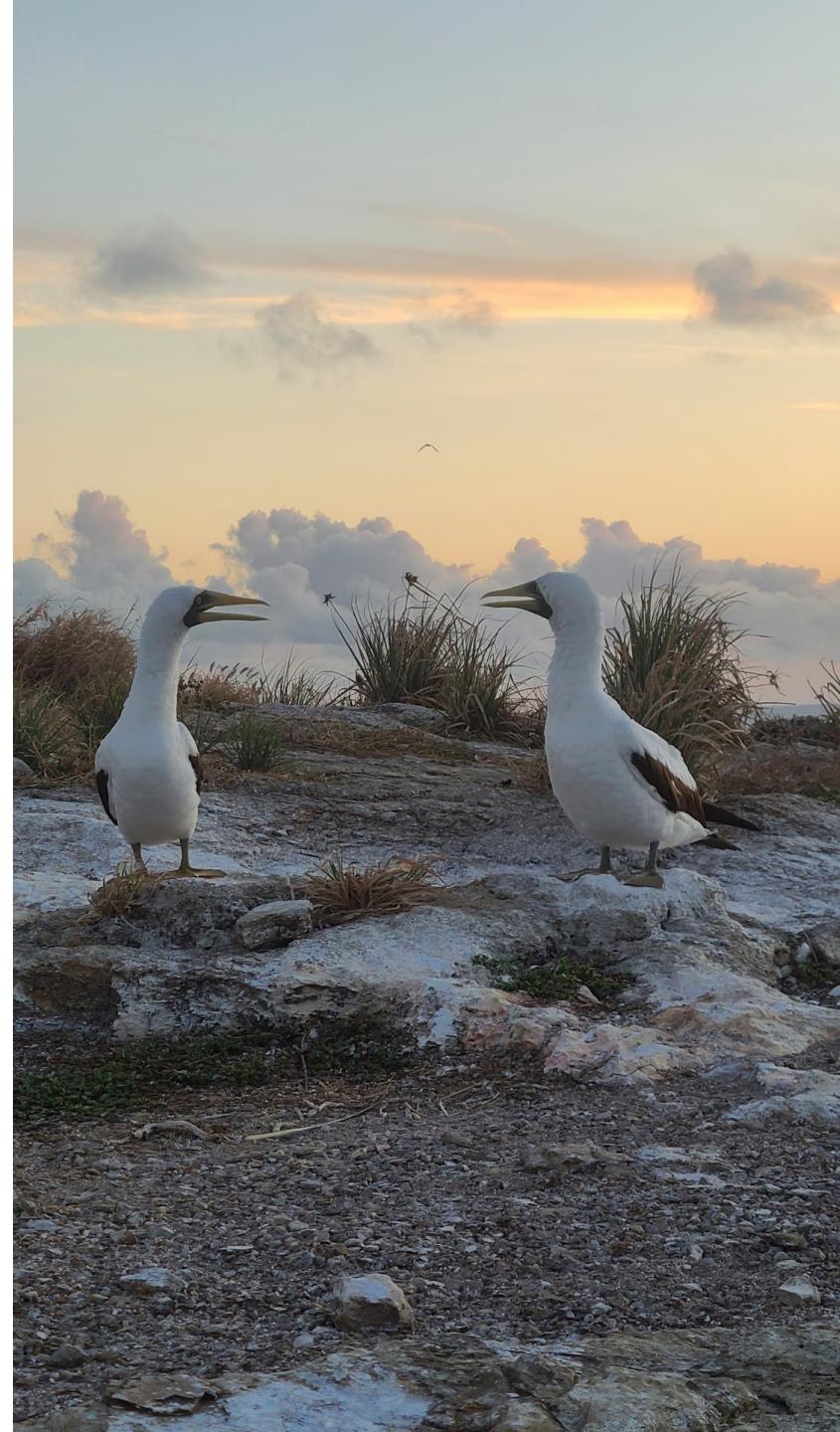
RESOM 15-17 octobre 2025



PROGRAMME
PRIORITAIRE
DE RECHERCHE
OCEAN
& CLIMAT

Problématique

- Le cadre du jumeau/avatar numérique : **modèle** virtuel d'un système réel, **créé à partir de données** collectées sur ce système, qui sert de **plateforme de simulation** et d'analyse, permettant de comprendre et prévoir le comportement du système réel, afin d'**aider à la prise de décision**
- Et les oiseaux dans tout ça ?
 - demande croissante de pouvoir **prédir le mouvement des oiseaux marins** dans un contexte de changement climatique et d'augmentation de l'activité humaine en mer
 - Travaux de l'équipe dans le développement de ce modèle, étude de cas du **Fou tropical** (+ Fou de Bassan)
 - Solutions pour les bases de données de mouvement qui ont découlées du projet



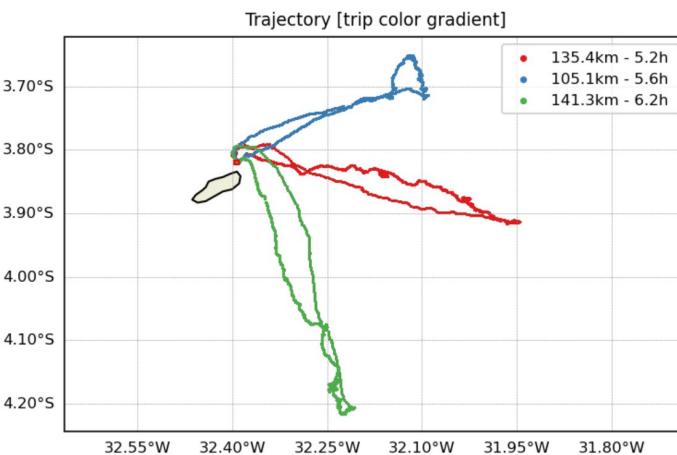
Espèces, sites, comportements



Fou brun
(*Sula leucogaster*)



Fou masqué
(*Sula dactylatra*)



- instrumentation en **période de reproduction**
- aller-retours au nid (**central-place foraging**)

Qu'est ce qu'un jumeau numérique ?



système réel



© LACMar

champs d'environnements statiques ou pas (ex : bathymétrie, vent, ...), données PO/PA, sorties de modèles de climat,



données

- données morphologiques
- contaminants
- isotopes
- personnalité



biologging :

- GPS (1 pt/30s)
- TDR (1 Hz) = plongées
- accélération 3D (50 Hz) = proxy de dépense énergétique

Traiter / réhabiliter la donnée

Beaucoup de données, très hétérogènes

→ Sous-problème : **comment exploiter au mieux les données de mouvement, le plus efficacement possible, et en gérant les données incomplètes ?**

Deux exemples développés dans l'équipe :

- **traitement systématique de grandes bases de données de mouvement**
- méthode d'inférence de la dépense énergétique



Traiter / réhabiliter la donnée



- Package python développé par **Adrien Brunel**
- Traitement systématisé de données de mouvement (central-place foraging)

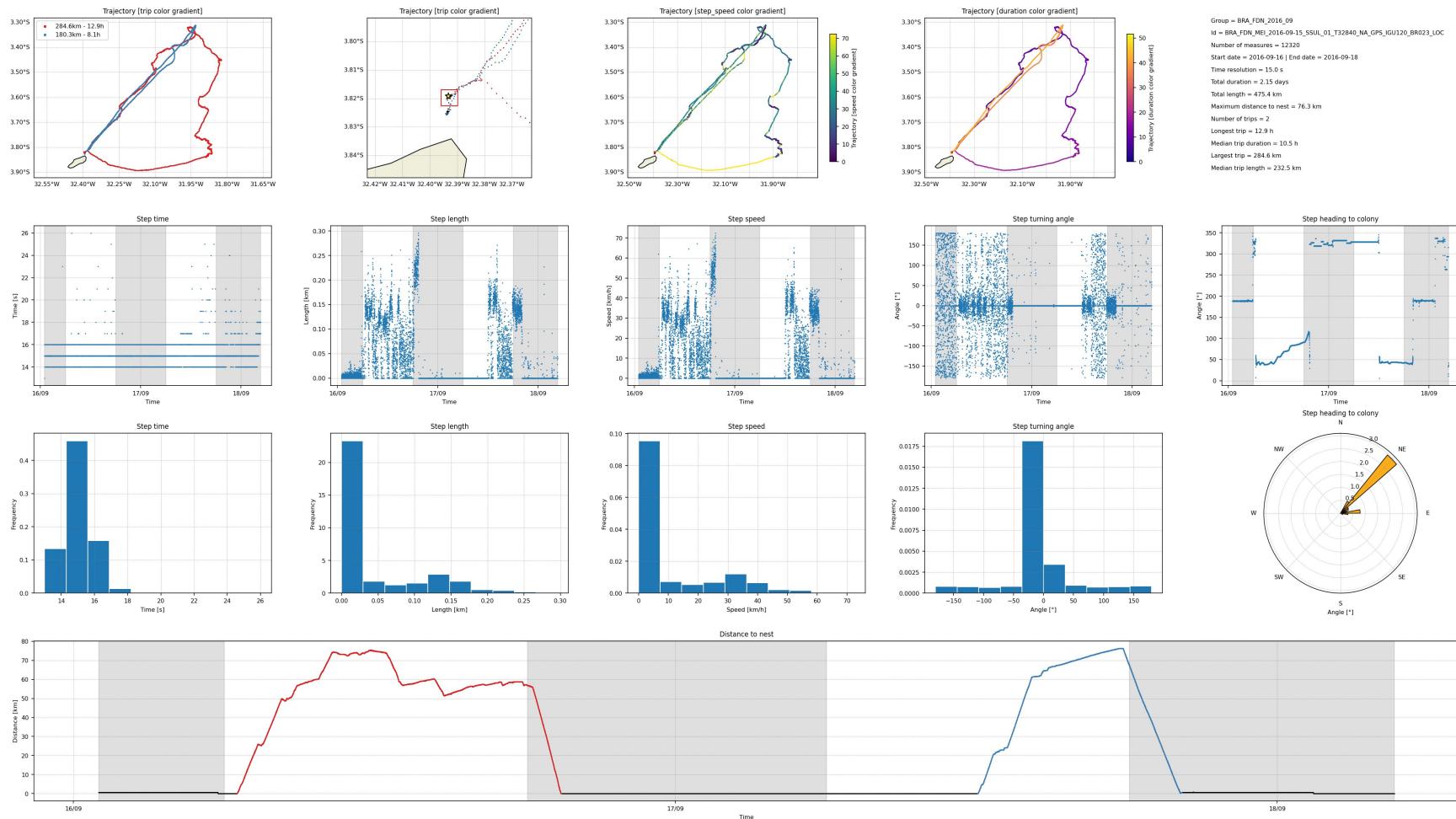
Exemples de tâches :

- aligner les données GPS, TDR et AXY à la fréquence du GPS
- régulariser ou interpoler les données GPS, TDR et AXY
- créer des plots de résumé/diagnostic pour un appareil ou une campagne entière
- calcul de métriques descriptives du mouvement automatisé à chaque étape

Gain de temps considérable par rapport à une tâche similaire en R + permet d'assurer la cohérence au sein d'une base de données + documentation exhaustive + fonction spéciale pour créer des fichiers pour Seabird Tracking Database

Traiter / réhabiliter la donnée

<https://github.com/AdrienBrunel/cpforager/>



Traiter / réhabiliter la donnée

Beaucoup de données, très hétérogènes

→ Sous-problème : **comment exploiter au mieux les données de mouvement, le plus efficacement possible, et en gérant les données incomplètes ?**

Deux exemples développés dans l'équipe :

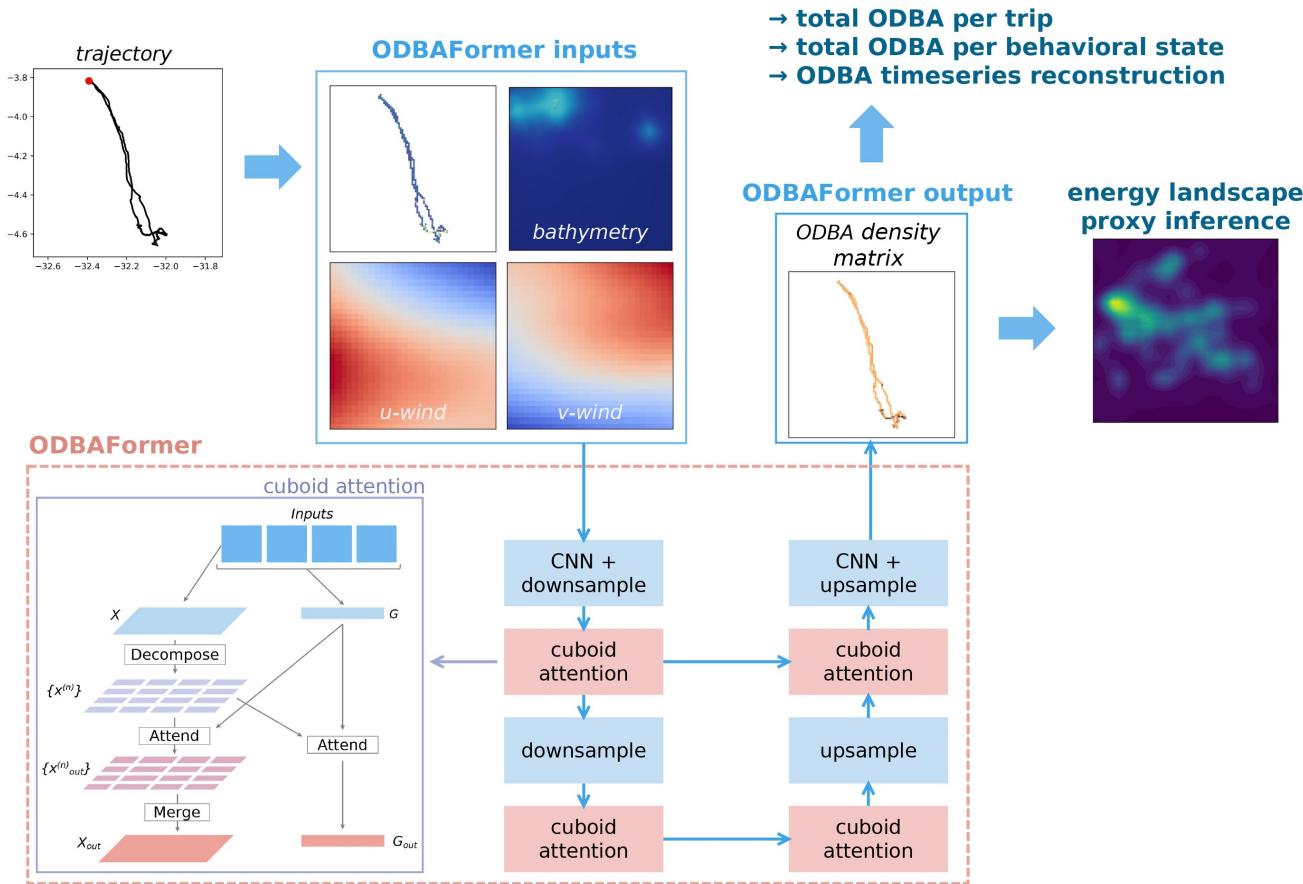
- traitement systématique de grandes bases de données de mouvement
- **méthode d'inférence de la dépense énergétique**



Traiter / réhabiliter la donnée

- données d'accélérométrie permettent de remonter à la dépense d'énergie (ODBA)
- peu de données axy en comparaison avec les données GPS
- inférence par calcul : complexe car lien mouvement \leftrightarrow dépense énergétique **pas trivial**

→ plein de données GPS + des cartes d'environnement + pas de modèle mathématique qui marche = quid d'un modèle d'IA ?



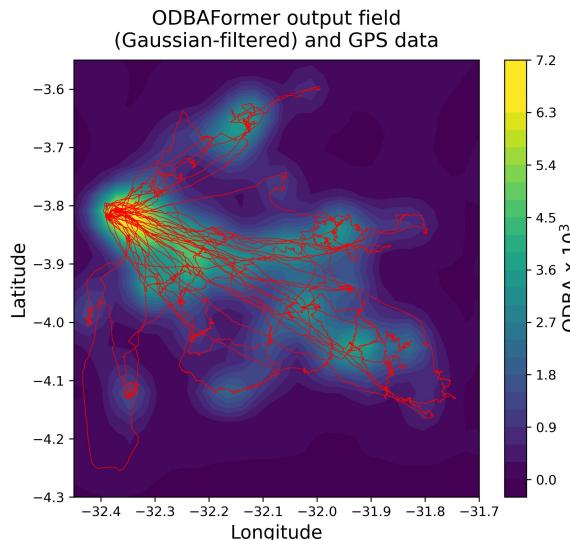
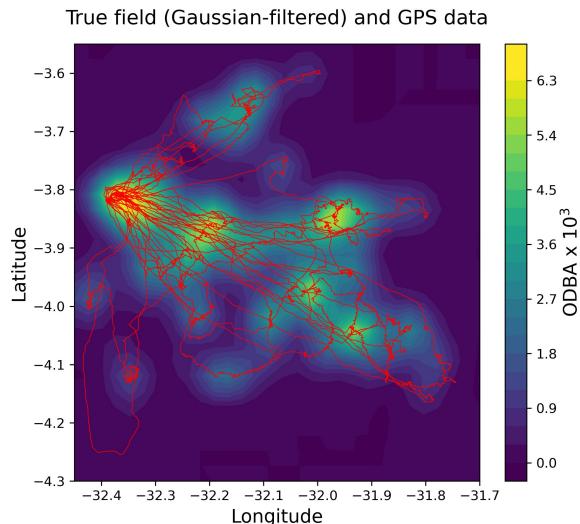
Traiter / réhabiliter la donnée

- **Simulation d'un paysage énergétique**

~ 2% d'erreur en moyenne sur la valeur spatialisée de l'ODBA*

~ 5% d'erreur sur les valeurs extrêmes*

*données jamais vues par le modèle



- **Inférence du bilan énergétique individuel**

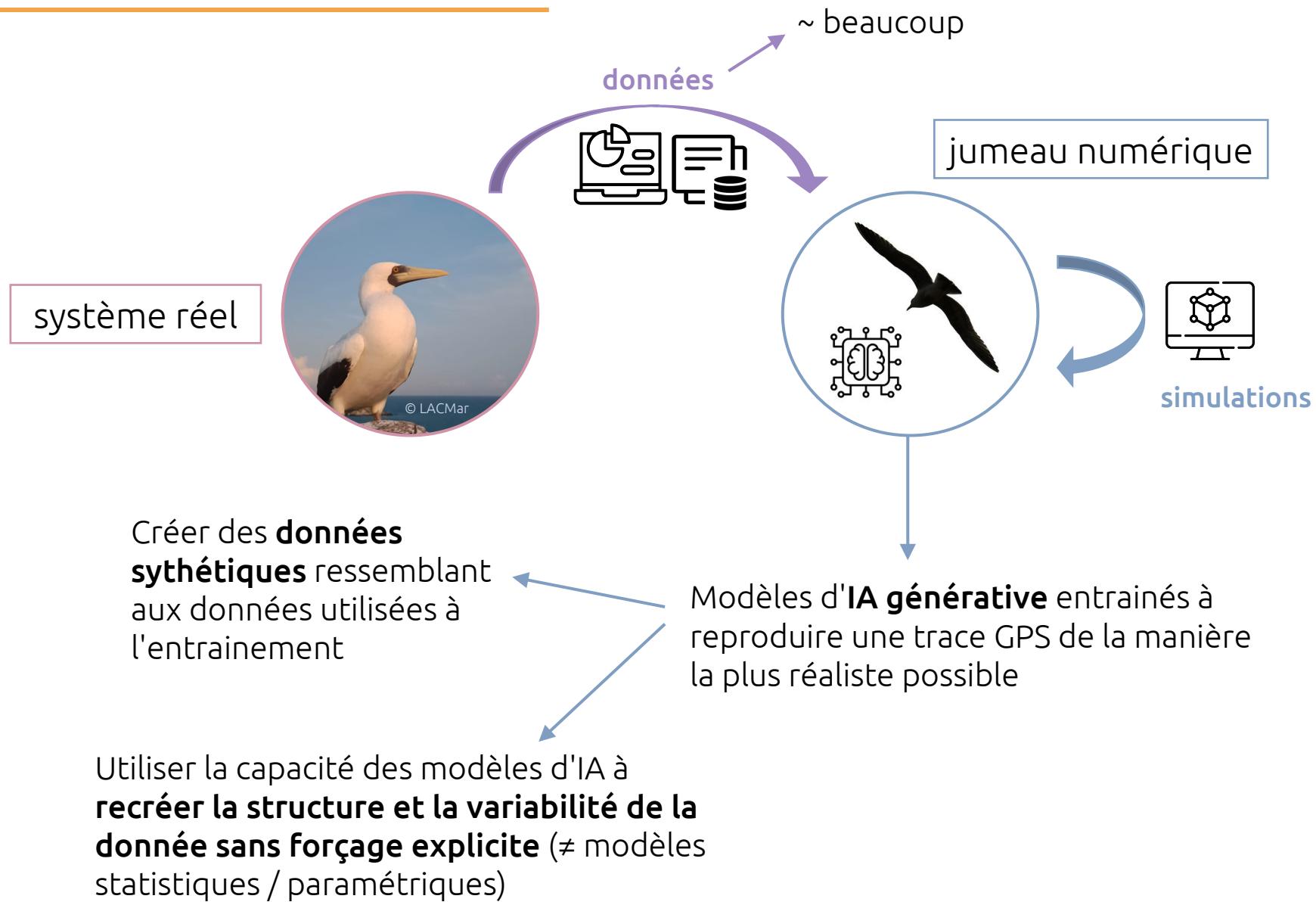
~ 3% d'erreur pour un trajet*

~ 6% d'erreur pour un état de recherche de nourriture*

~ 2% d'erreur pour un état de transit*

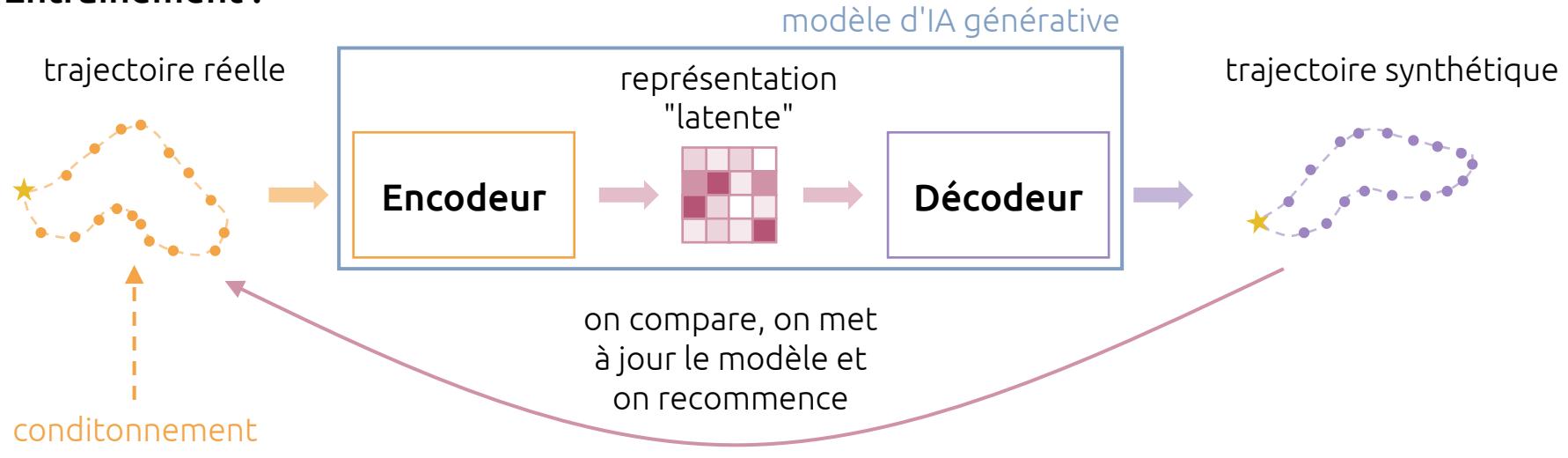
Perspectives : augmentation / réhabilitation de bases de données, métrique de contrôle pour la simulation

Qu'est ce qu'un jumeau numérique ?



Générer de la donnée

Entrainement :



Génération :

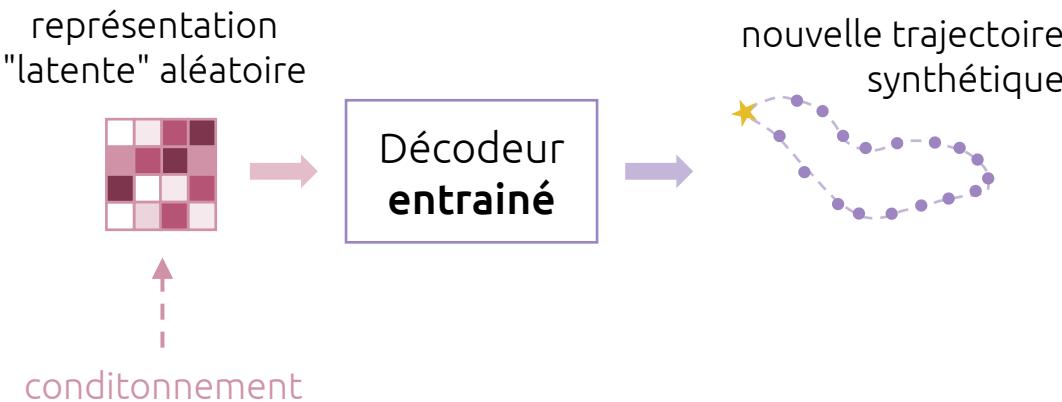


Schéma très très simplifié pour couvrir le plus de types de modèles possibles

Qu'est ce qu'un jumeau numérique ?

système réel



données

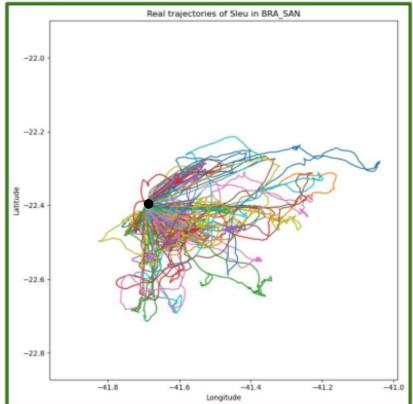


jumeau numérique

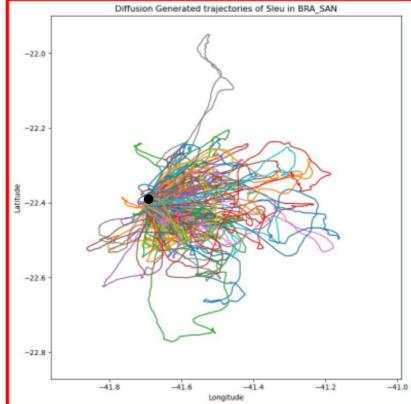


simulations

Trajectoires réelles



Trajectoires synthétiques



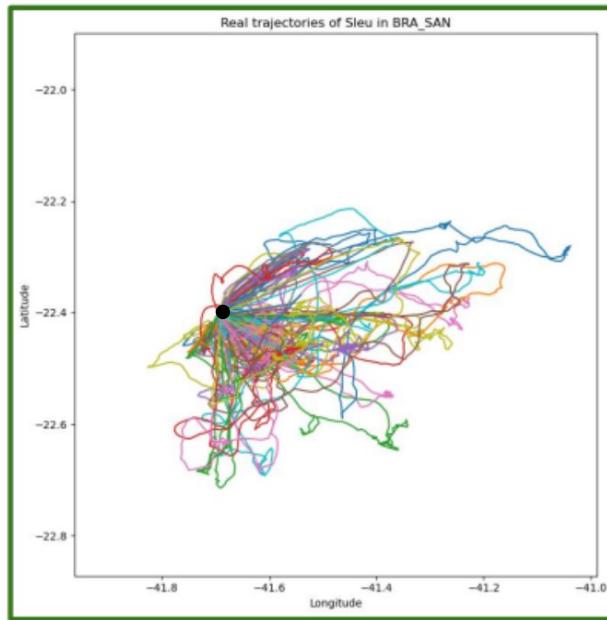
Modèles d'IA générative entraînés à
**reproduire une trace GPS de la
manière la plus réaliste possible**

diffusion model — Julien Patras (MARBECK / LIRMM)

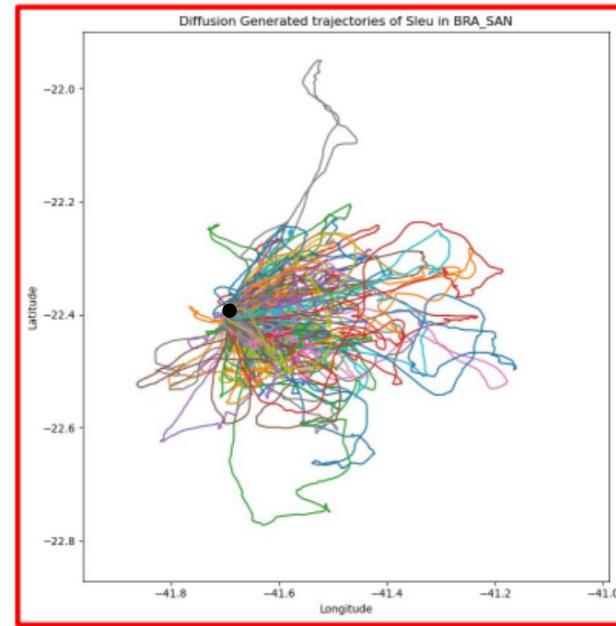
Une trace réaliste ?

→ Modèle entraîné sur des données de plusieurs espèces de Fous sur plusieurs colonies/années, appliqué sur une espèce sur une colonie

Trajectoires réelles



Trajectoires synthétiques



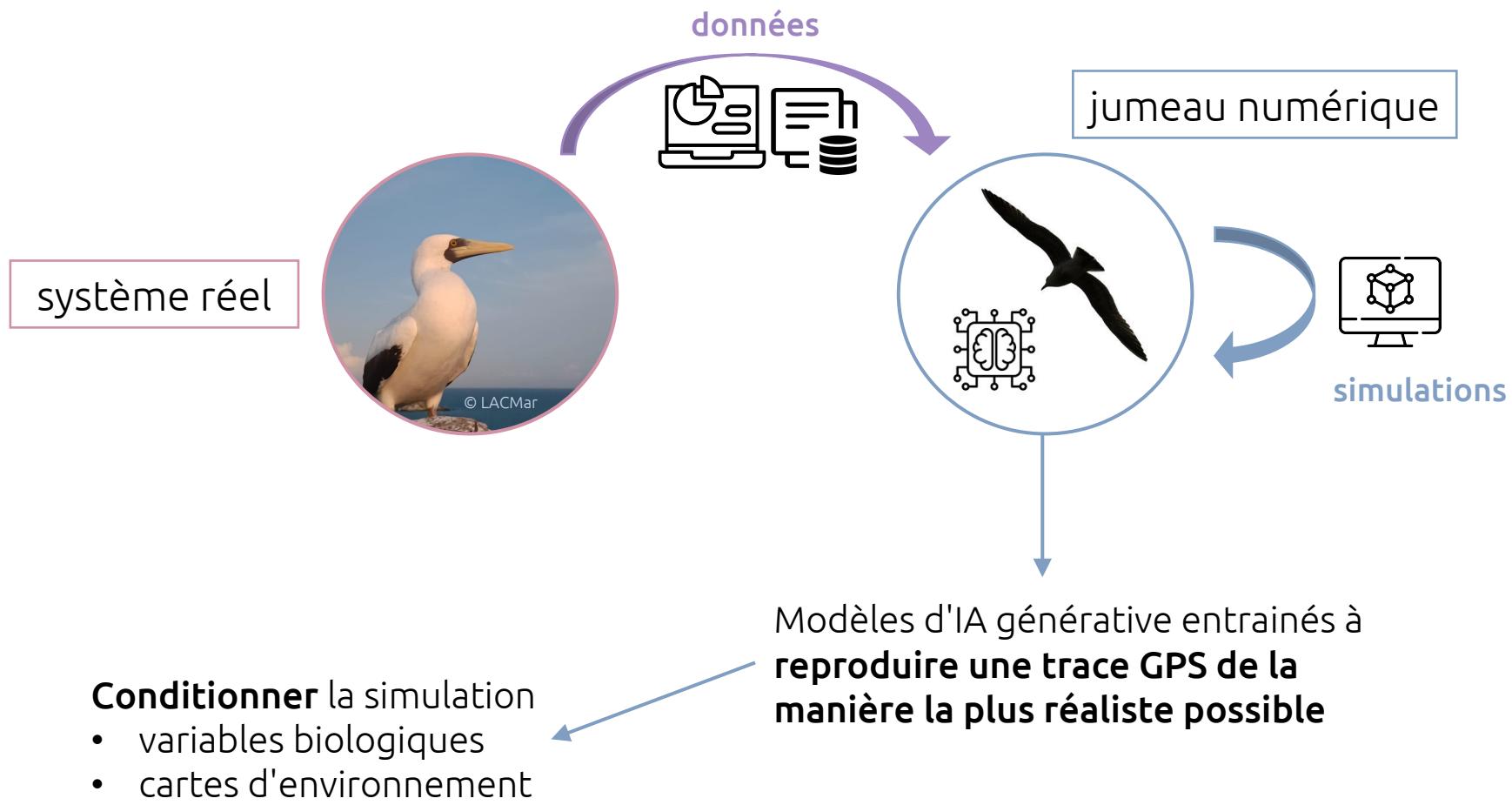
Statistique :

- distribution des descripteurs globaux (distance, sinuosité, ...)
- distribution des descripteurs locaux (vitesse, cap, ...)
- utilisation de l'espace (zone de recherche de nourriture, ...)
- énergie dépensée

IA générative :

- métriques de similarité globale (FID)
- et locales (DTW)
- mesures de corrélation

Qu'est ce qu'un jumeau numérique ?



Conditionnement environnemental

Travail de Sophie Benboudjema (MARBEC / EDF Renouvelables)

- Fou de Bassan
- Simulation informée par la bathmétrie = est-ce que le modèle peut **apprendre une règle implicite** : "pas de survol de la terre"

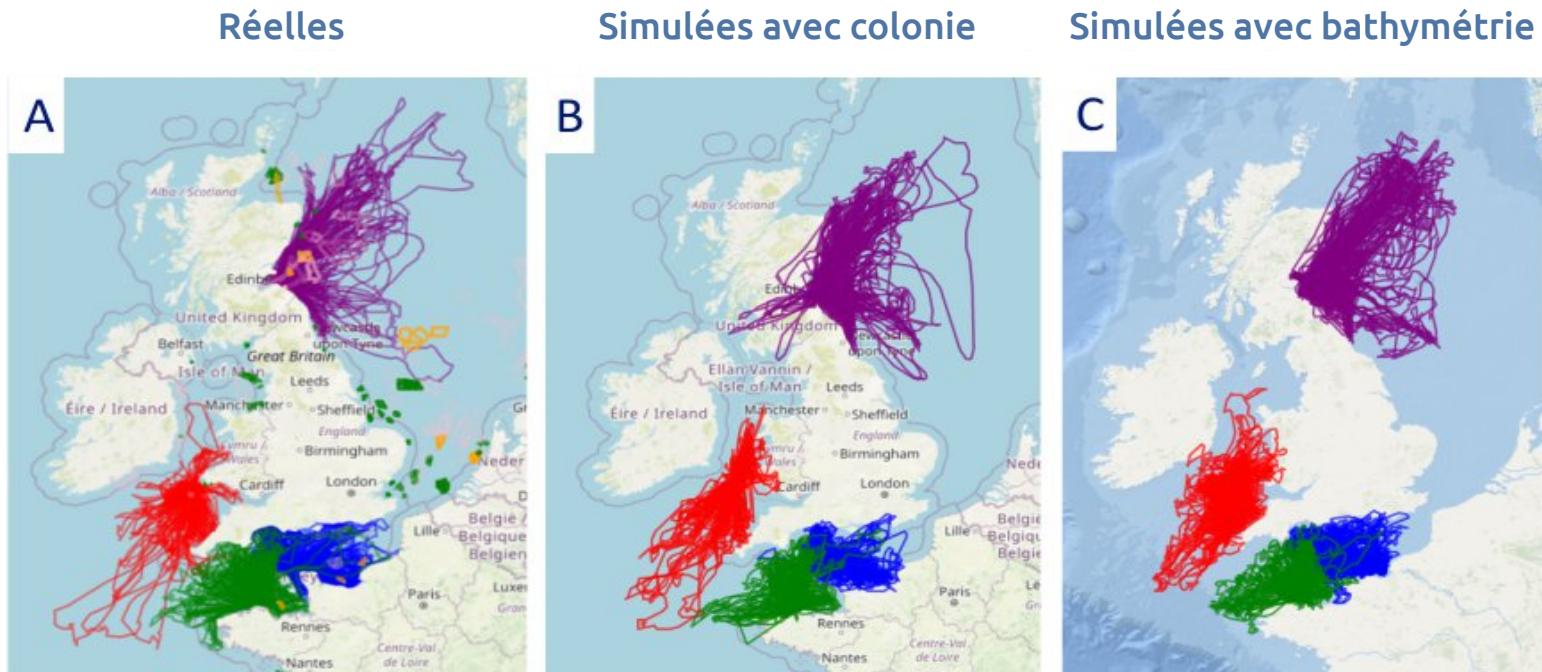


Figure 8: (A) Real Gannet tracks and OWFs (green = operating, orange = in construction, pink = in development), (B) 150 simulated tracks with colonies as additional input, (C) 150 simulated tracks with bathymetry maps as additional input, for four colonies (blue = Alderney, purple = Bass Rock, red = Grassholm, green = Rouzic)

Perspectives

- + de résultats :)
 - **conditionnement environnemental**
 - simulation sur **temps long**
 - transfert à des espèces rares
 - ajout de variations individuelles
 - intégration de données de migration
 - validation systématique des modèles
 - passage à l'échelle de la population
 - continuer les efforts côté données
 - explicabilité des modèles ("boîte noire")
- } thèse NM
(+ JP)
- } thèse TBG



Merci !!

Encore des questions ?

Me contacter : noemie.muquet@ird.fr

Merci à l'équipe et aux collaborateurs :

- JUNOM Sète : Sophie Lanco, Sophie Benboudjema, Julien Patras, Thomas Barbedette-Gérard
- Adrien Brunel (MARBECK Montpellier)
- Jean-Daniel Zucker (UMMISCO)
- LACMar UFRGS (Brésil) : Guilheme Tavares Nunès, Júlia Jacoby et tous les autres
- Amédée Roy (France Energies Marines)
- Ronan Fablet, Christophe Barbraud, Karnie Delord, Leandro Bugoni, ...

