



Fréquentations maritimes et impacts socio-écosystémiques : un cadre méthodologique intégré pour étudier les effets cumulés dans les Aires Marines Protégées

Kimberley Cloirec^{1,2}, **Antoine Le Doeuff**^{1,2}, Frédéric Audard^{1,2}, Cyril Tissot^{2,3}, Gauthier Schaal^{1,4}, Caroline Bontet⁵

1 : Université de Bretagne Occidentale

2 : UMR 6454 LETG Brest – Littoral, Environnement, Télédétection et Géomatique

3 : CNRS – Centre National de la Recherche Scientifique

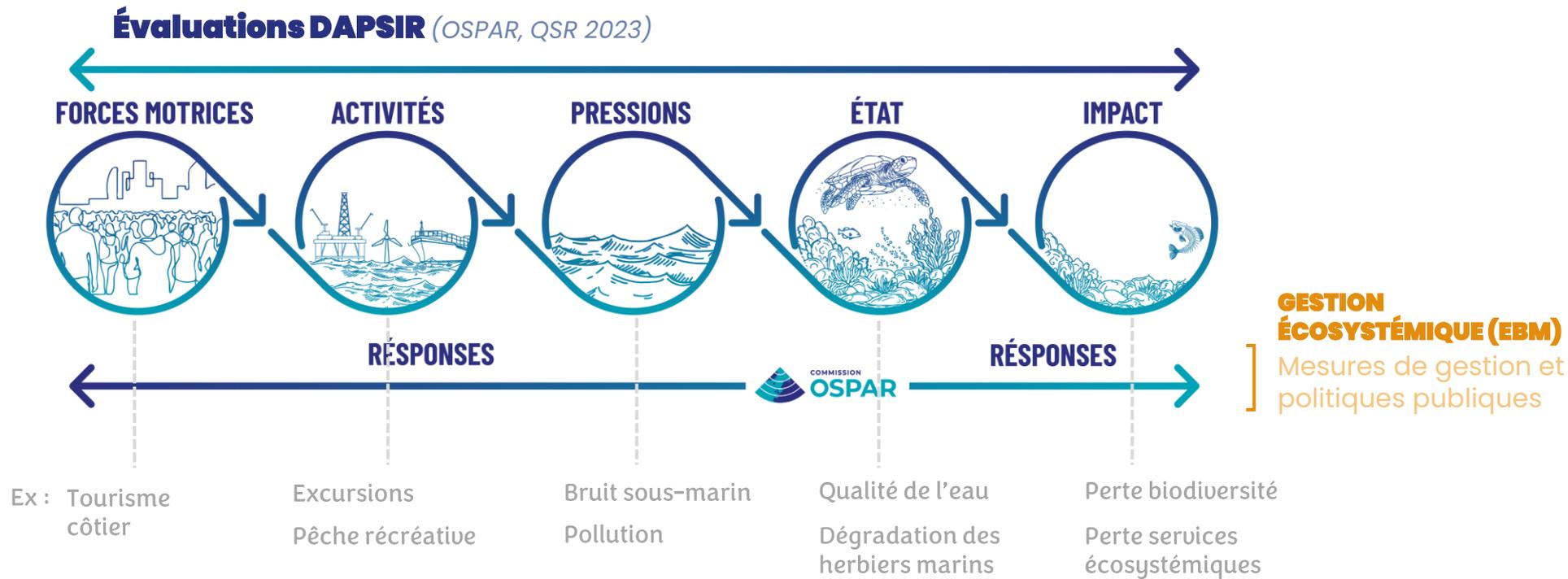
4 : UMR 6539 LEMAR – Laboratoire des sciences de l'Environnement MARin

5 : Office Français de la Biodiversité – Parc Naturel Marin du Bassin d'Arcachon

kimberley.cloirec@univ-brest.fr
antoine.ledoeuff@univ-brest.fr
frederic.audard@univ-brest.fr

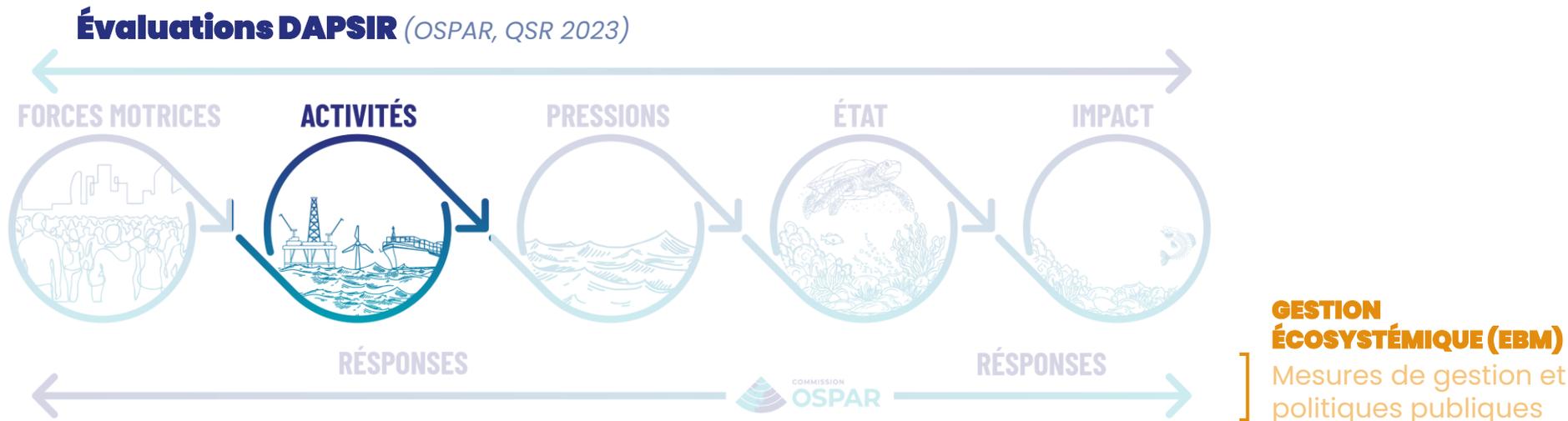
CADRES RÉGLEMENTAIRES * : SUIVI DES IMPACTS ET INTÉRACTIONS

*Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (MSFD, 2008/56/CE), Planification de l'espace maritime (MSP, 2014/89/UE)



CADRES RÉGLEMENTAIRES * : SUIVI DES IMPACTS ET INTÉRACTIONS

*Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (MSFD, 2008/56/CE), Planification de l'espace maritime (MSP, 2014/89/UE)



Absence de cadre méthodologique généraliste à l'échelle locale (AMP)

+

Données fragmentaires /hétérogènes



Quantifier & anticiper effets cumulés des usages



0 2,5 5 kilomètres

0 1 2 milles marins

— Périètre du Parc naturel marin

- - - Périètre Natura 2000

limite de la mer territoriale (12 milles marins)

GOLFE DE GASCogne

435 km²

3 milles marins

20 m

Cap Ferret

banc d'Arguin

Dune du Pilat

Canal des Landes

Île aux oiseaux

Arcachon

La-Teste-de-Buch

Canal des Ètes

GIRONDE

Delta de l'Eyre

La Leyre

LANDES

RICHESSE NATURELLE



70 000
bernaches /an



48% herbier
national



13 esp.

ACTIVITES HUMAINES



3600
parcelles



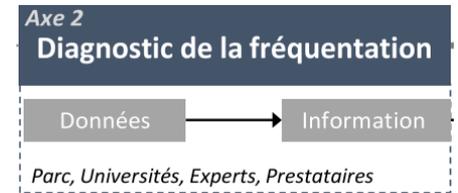
5% mouillage
national



1800 t.
(2018)

PLAN DE GESTION

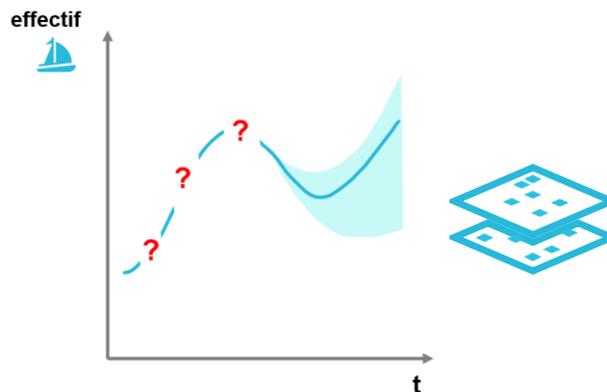
Programme de suivi
et de connaissance de
la fréquentation



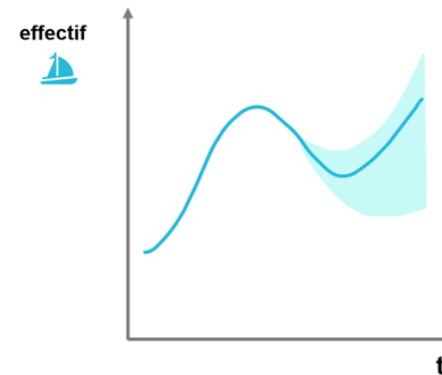
1 - COMPRENDRE



2 - EXTRAPOLER

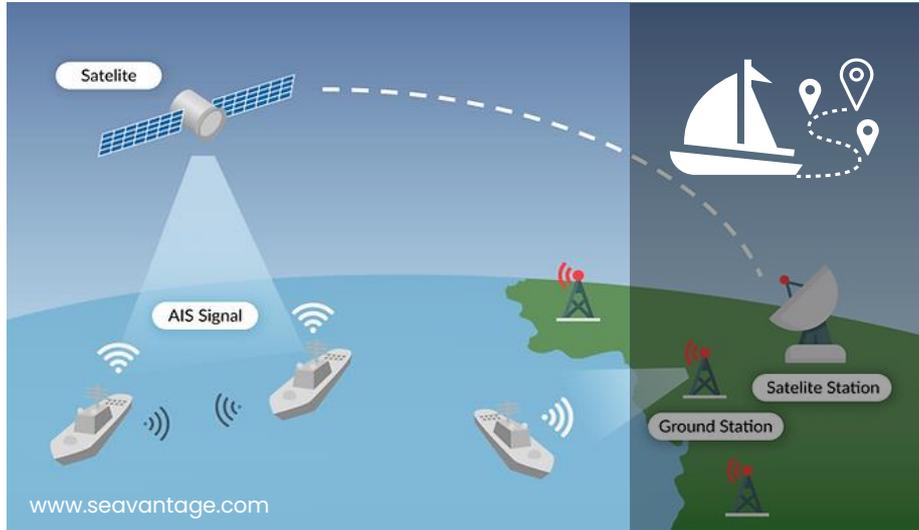


3 - PREDIRE



RECENSER LA FRÉQUENTATION

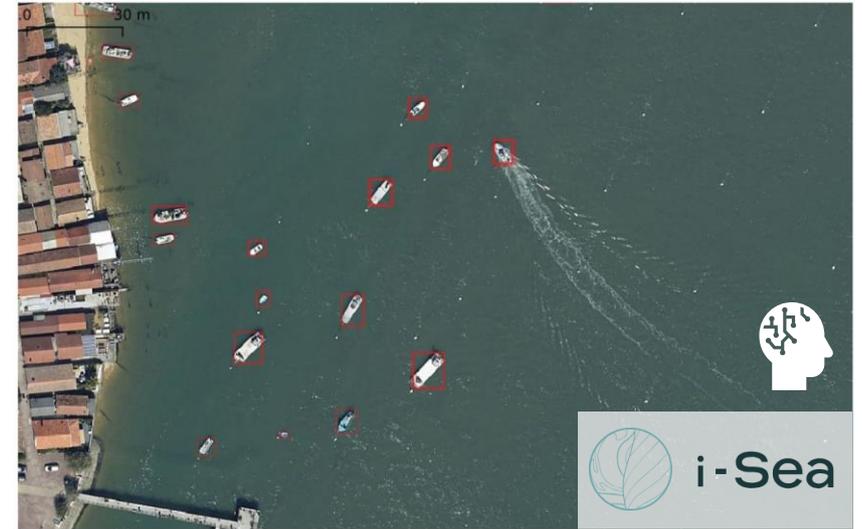
Données AIS*



Période : **2021 – 2023**

*Automatic Identification System

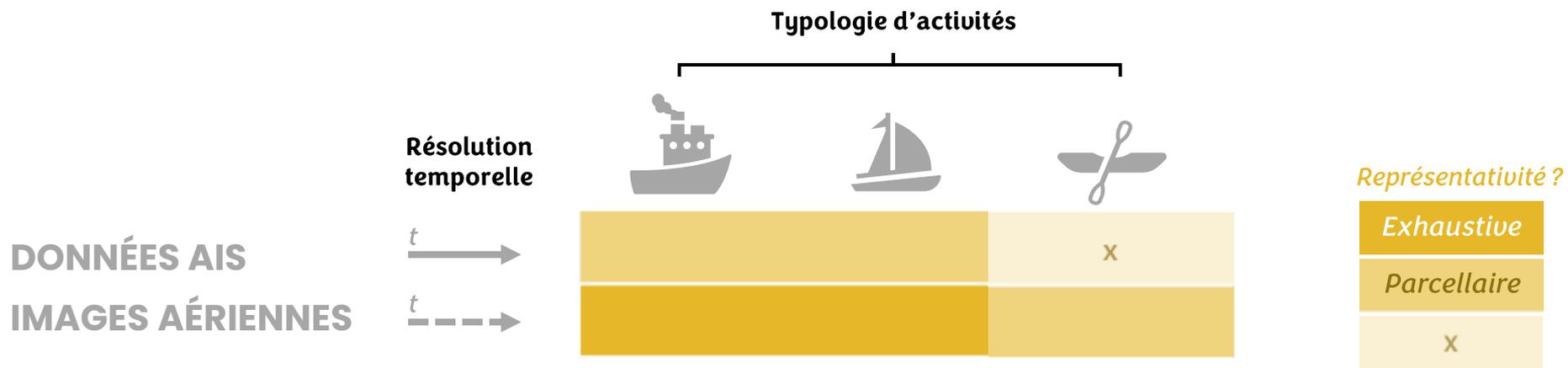
Imageries aériennes



Période : **2023** (saisons, diversité de coef., WE)

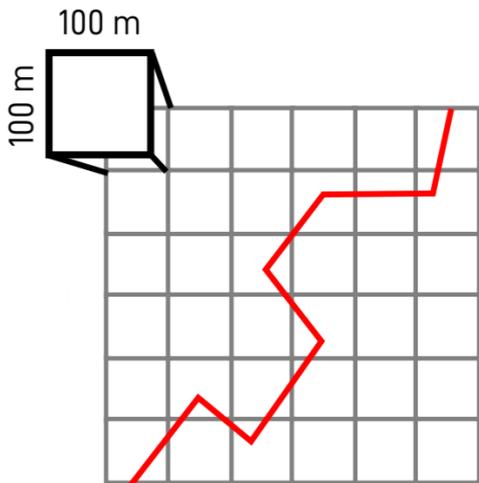
19 images (orthophotos et images satellites pléiades)

REPRÉSENTATIVITÉ DE LA DONNÉE



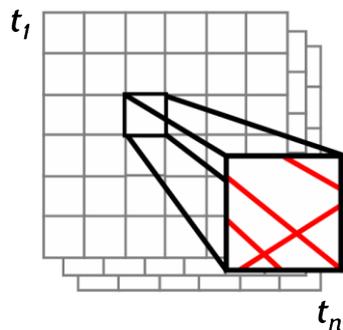
INDICATEURS DE FRÉQUENTATION JOURNALIÈRE

MAILLE RÉGULIÈRE JOURNALIÈRE



Données AIS

Indicateurs spatiaux

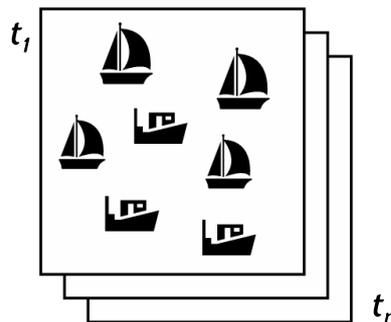


\longleftrightarrow Σ (Passages) / jour

 Σ (Distance) / jour

 Σ (Temps) / jour

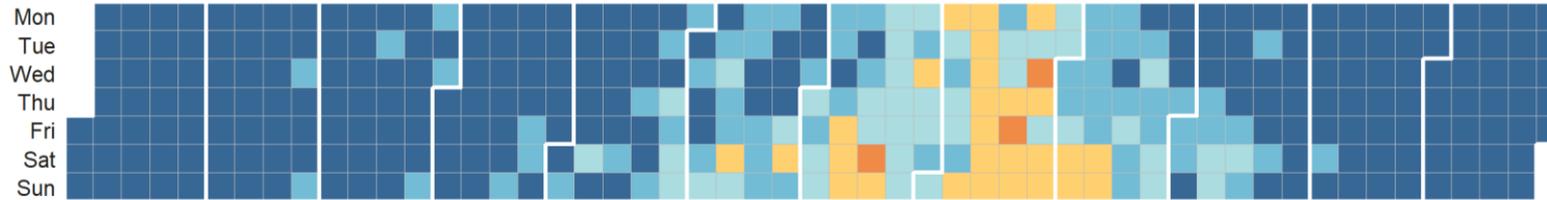
Indicateur a-spatial



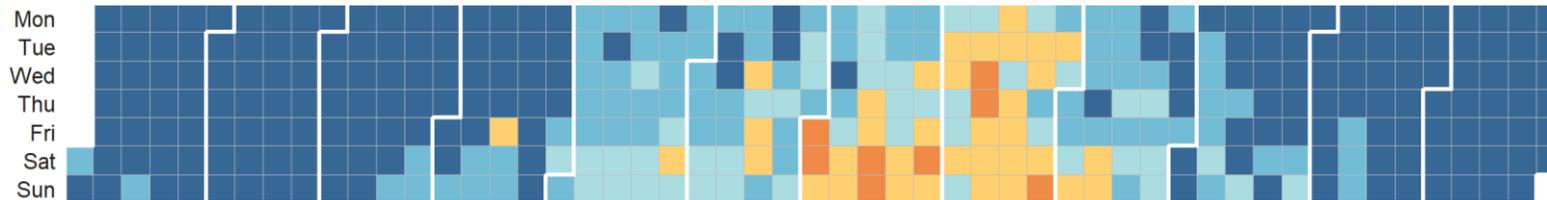
$N_{tot.}$ Navires / jour

N_{tot.} Navires / jour dans le Bassin d'Arcachon

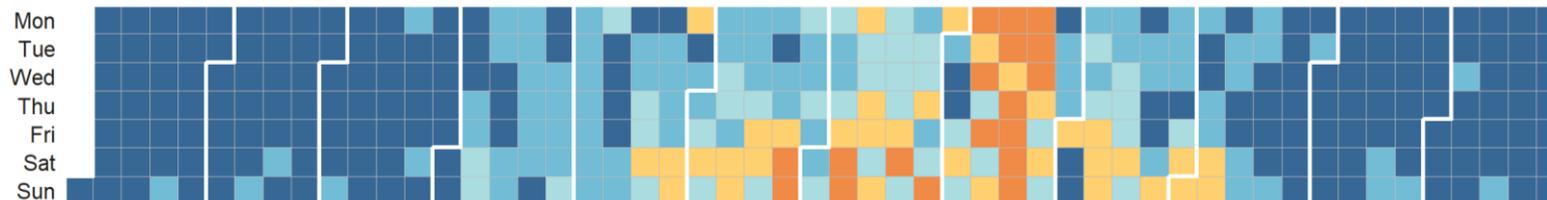
2021



2022



2023



 Données parcellaires
Sur la base de données AIS

Sources : Marine Traffic (2021) | CEREMA (2022 - 2023)
Traitement : Discrétisation selon ruptures naturelles (Jenks) et transformation logarithmique

Nombre de bateaux par jour
■ 0-3 ■ 4-10 ■ 11-20 ■ 19-28 ■ 29-47

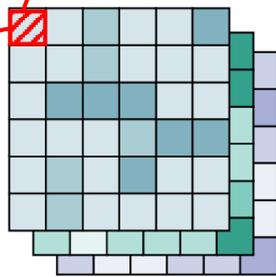
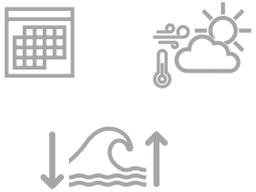
BASE DE DONNÉES SIG RELATIONNELLE



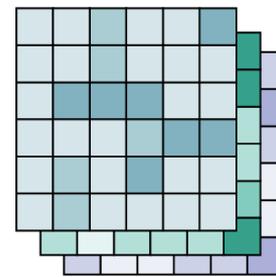
Indicateurs



Prédicteurs potentiels

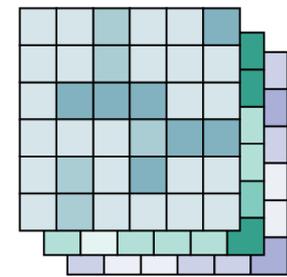


$$R_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$



$$R_2 = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

...



$$R_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

id_cell	date	x_1	x_2	...	x_n
1	2021-01-01	0.5	68	...	-9
2	2021-01-01	0.9	50	...	1
...

Covariable

- Nébulosité
- Hauteur des vagues
- etc.

CADRE DE MODÉLISATIONS

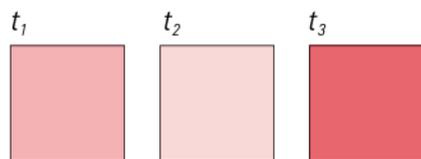


COMPRENDRE

PRÉDIRE

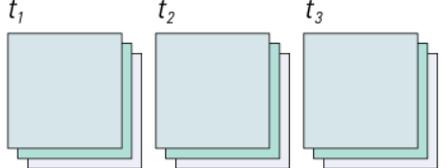
EXTRAPOLER/REDRESSER

$N_{tot. Navires / jour}$



2021-2023

Covariables a-spatiales

$= f($  $)$

$n = 34$
Prédicteurs potentiels

APPROCHE STATITISTIQUE

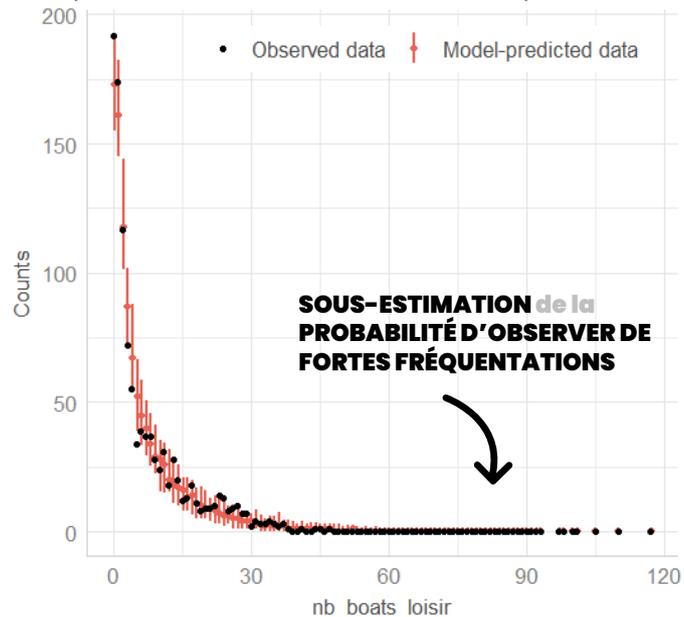
Modèle Linéaire Généralisé (GLM)

$$\log(\mu_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j X_{ij}$$

DIAGNOSTIQUES DHARMA

Posterior Predictive Check

Model-predicted intervals should include observed data points



QUALITÉ D'AJUSTEMENT

$$R^2_{\text{Déviance}} = 1 - \frac{\text{Déviance modèle}}{\text{Déviance nulle}} = 0.822$$

DIAGNOSTIC (2021-2023)



+ 34.8 % Jours fériés

- 42.6 % Basse saison touristique



+1°C + 17.7 %



> 3h - 27 %



+1m -15.2 %

Entraînement



2021, 2022, 2023

Indicateur $N_{bat.}$

+ Cov. a-spatiales

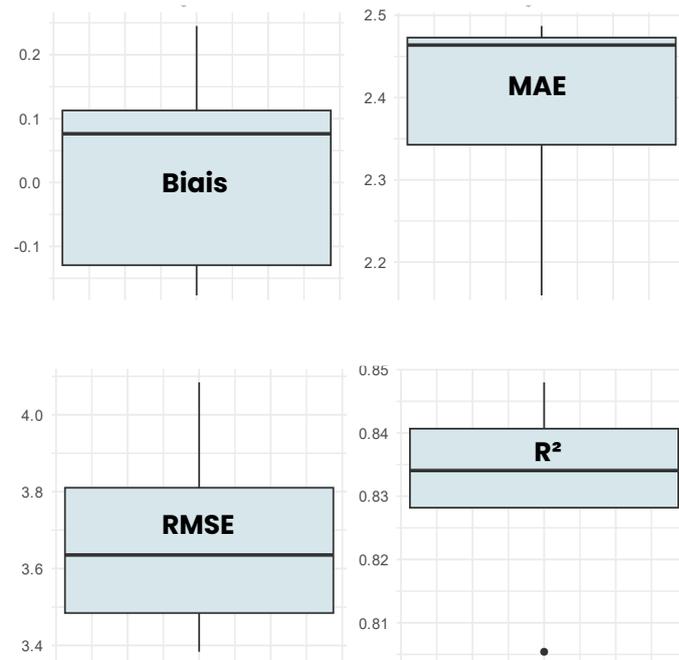
→ Algo = {Random Forest, LightGBM, XGBoost, **CatBoost**}

1. Prédiction



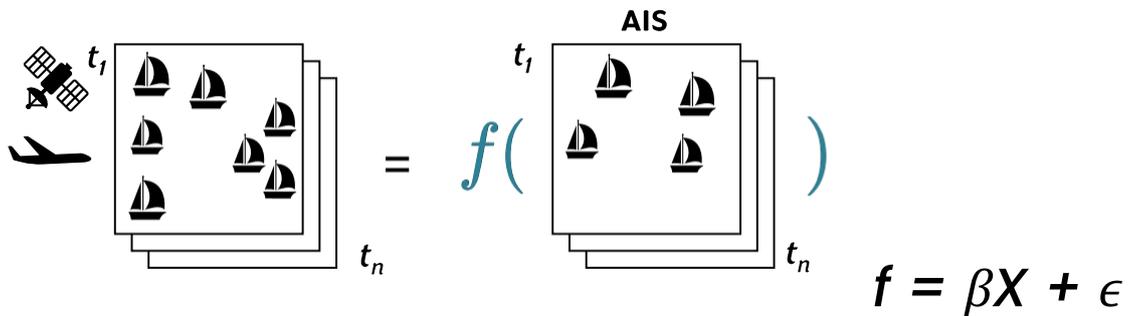
Validation CatBoost

(CV 5 folds)

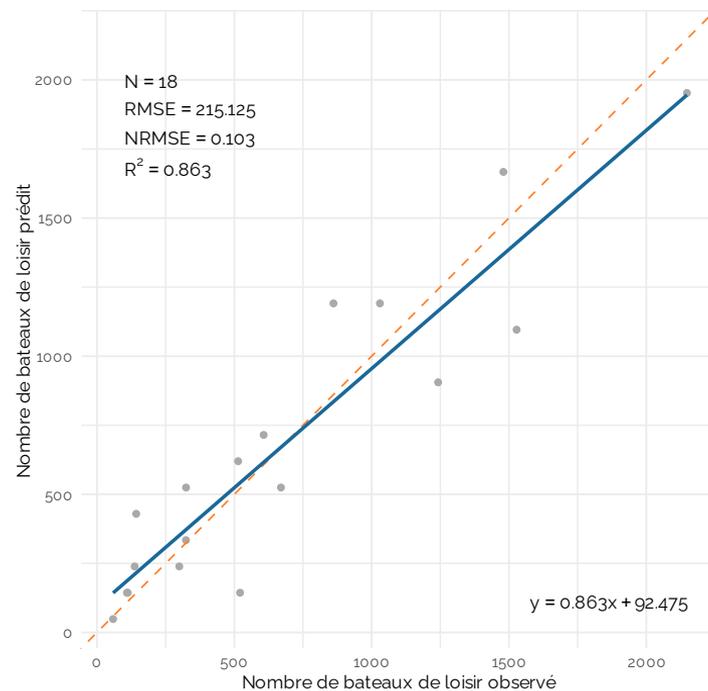


REDRESSEMENT DES DONNÉES

Ajustement

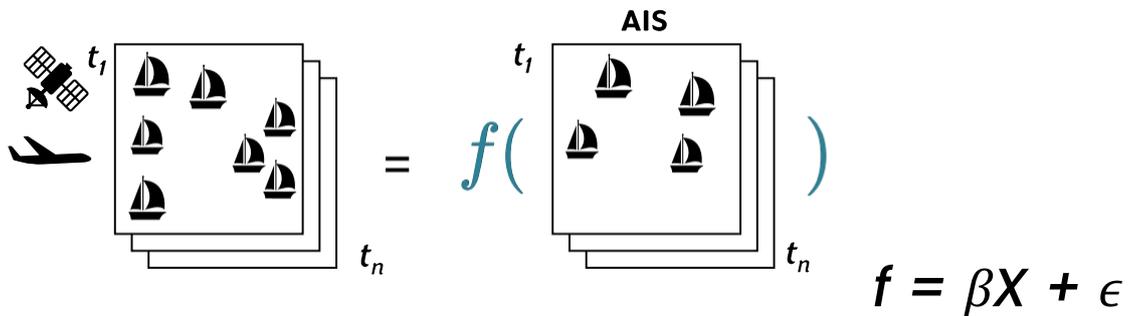


Validation



REDRESSEMENT DES DONNÉES

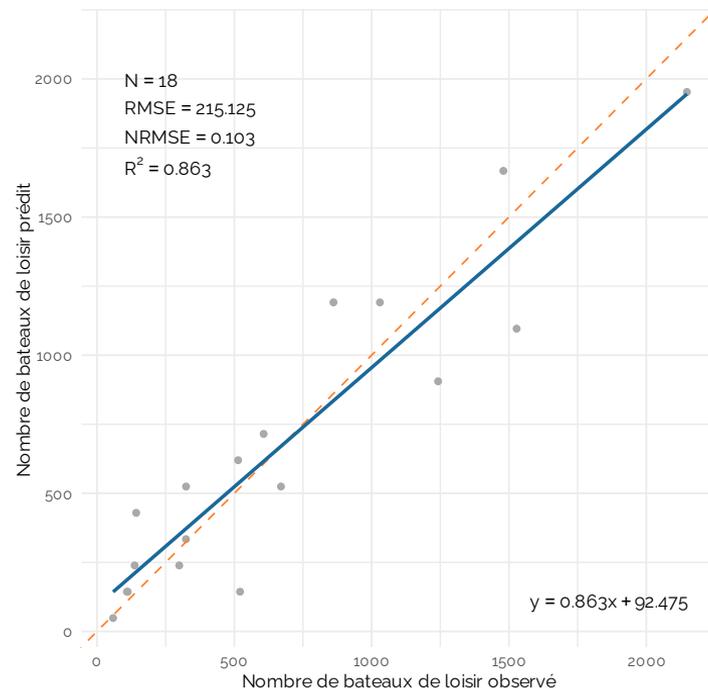
Ajustement



2. Redressement du nombre de bateaux

$$N_{\text{bat.R}} = \beta_0 + \beta_1 N_{\text{bat.}}$$

Validation



SPATIALISATION DES INDICATEURS

Calcul de patterns globaux P_i

Pour chaque indicateur



$$P_1 = \sum \text{[stack of 5x5 grids with cyan cells]} \quad \text{🕒}$$

$$P_2 = \sum \text{[stack of 5x5 grids with grey cells]} \quad \text{↔}$$

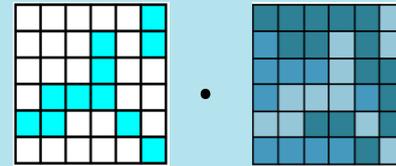
$$P_3 = \sum \text{[stack of 5x5 grids with grey cells]} \quad \text{📏}$$

3. Répartition spatiale

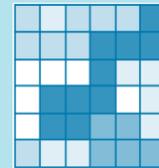
1. Correction du pattern

 indicateur de marée
prédit pour la journée i

Pattern corrigé =



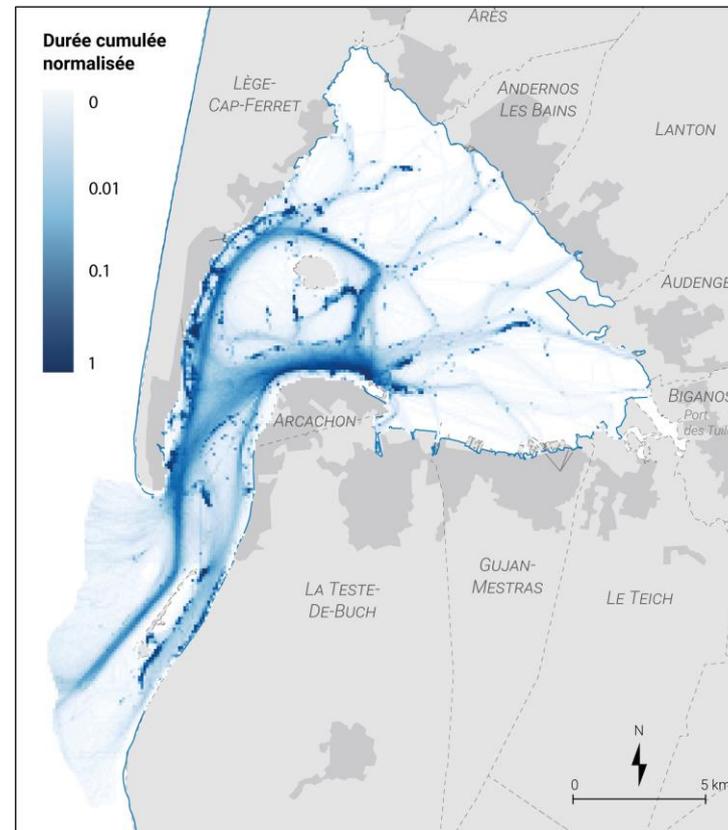
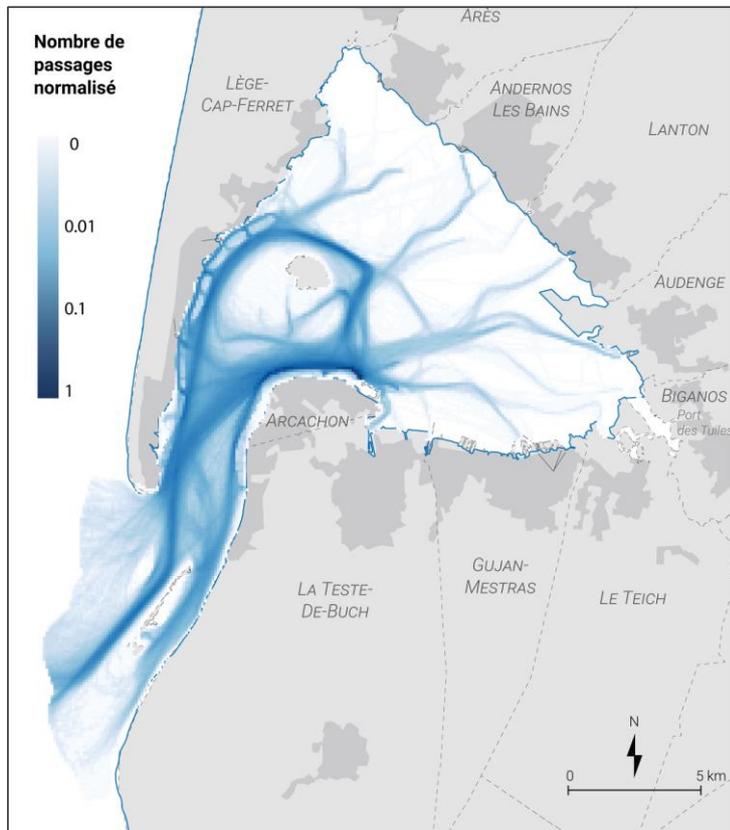
2. Répartition du stock de l'indicateur spatial pondérée par le pattern corrigé



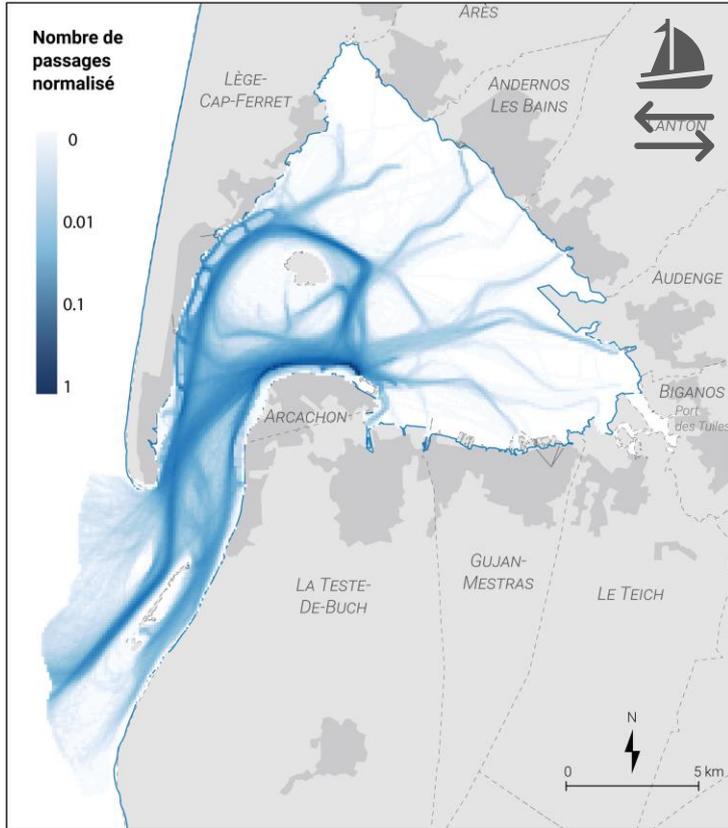
$$= \frac{\text{Pattern corrigé}}{\sum \text{Pattern corrigé}} \cdot \text{I}_{\text{stock}}$$



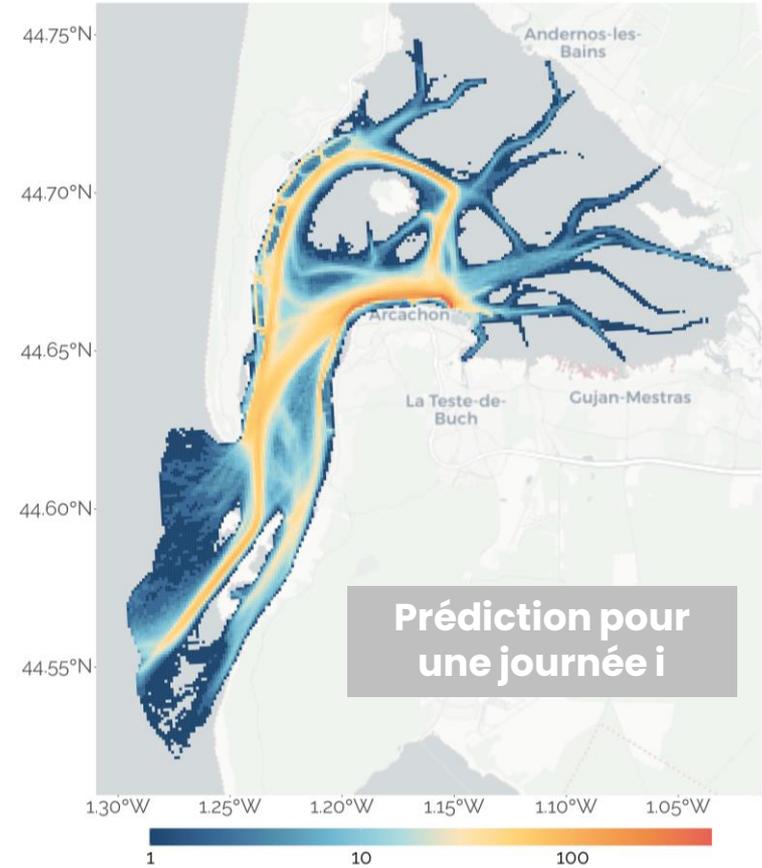
PATTERN GLOBAL À PARTIR DES DONNÉES AIS (2021-2023)



DU PATTERN GLOBAL À LA SPATIALISATION D'INDICATEUR PRÉDIT



$$X \times I_{\text{stock}} = t_i$$



OUTILS D'AIDE À LA GESTION



**Une application à destination
des gestionnaires d'AMP**

Indicateur ⓘ Nombre de passages

Date ⓘ 01/07/2025

Paramètres atmosphériques

Regarder les prévisions

Durée des précipitations ⓘ 0.0 h

Température maximale ⓘ 26.3 °C

Température minimale ⓘ 16.0 °C

Vitesse max. du vent ⓘ 22.3 km/h

Paramètres océaniques

Regarder les prévisions de vagues et de marée

Hauteur des vagues ⓘ 1.3 m

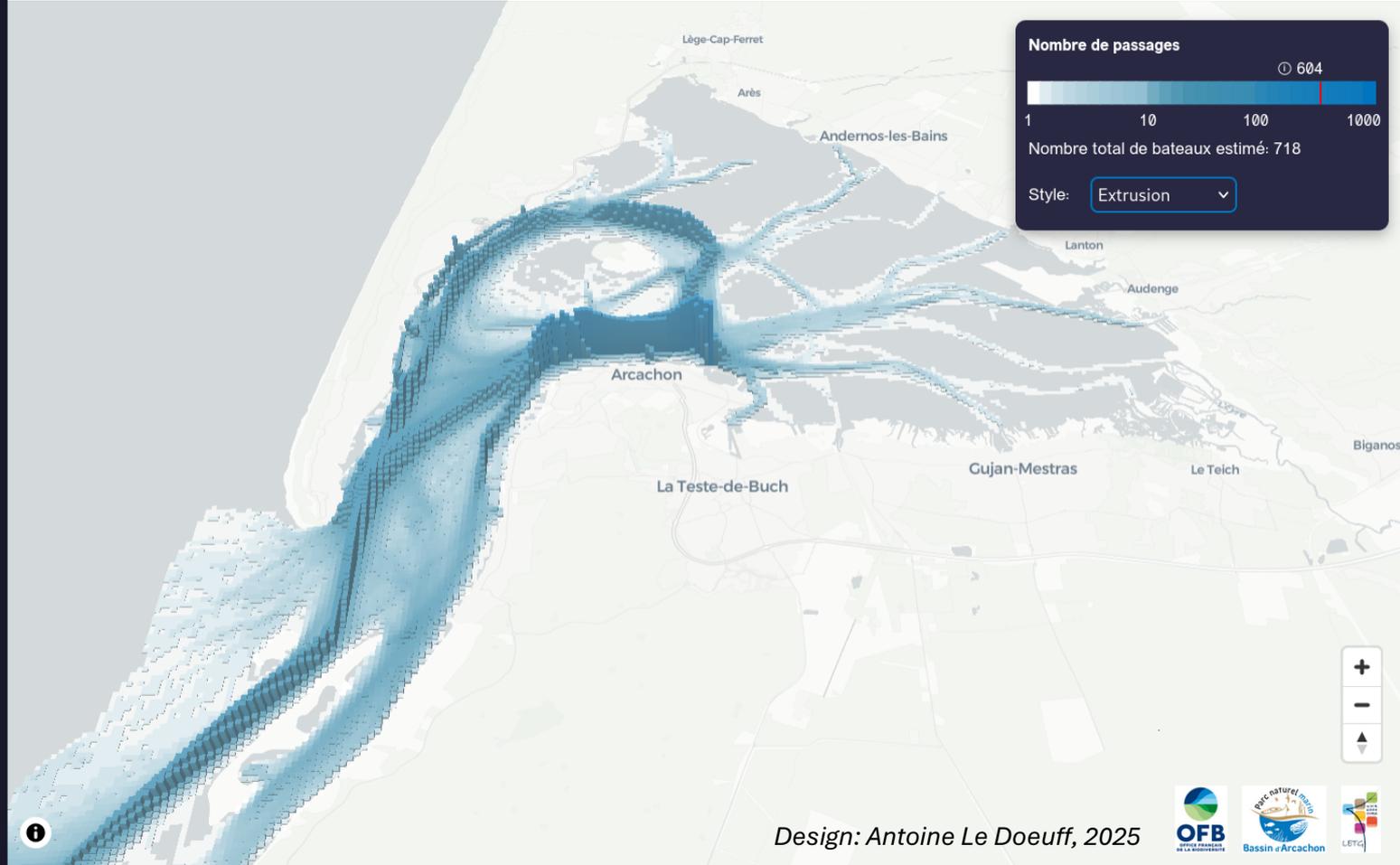
Direction moyenne des vagues ⓘ 250 °

Direction de pic des vagues ⓘ 260 °

Période de pic des vagues ⓘ 5.0 s

Coefficient de marée ⓘ 70

Faire tourner le modèle



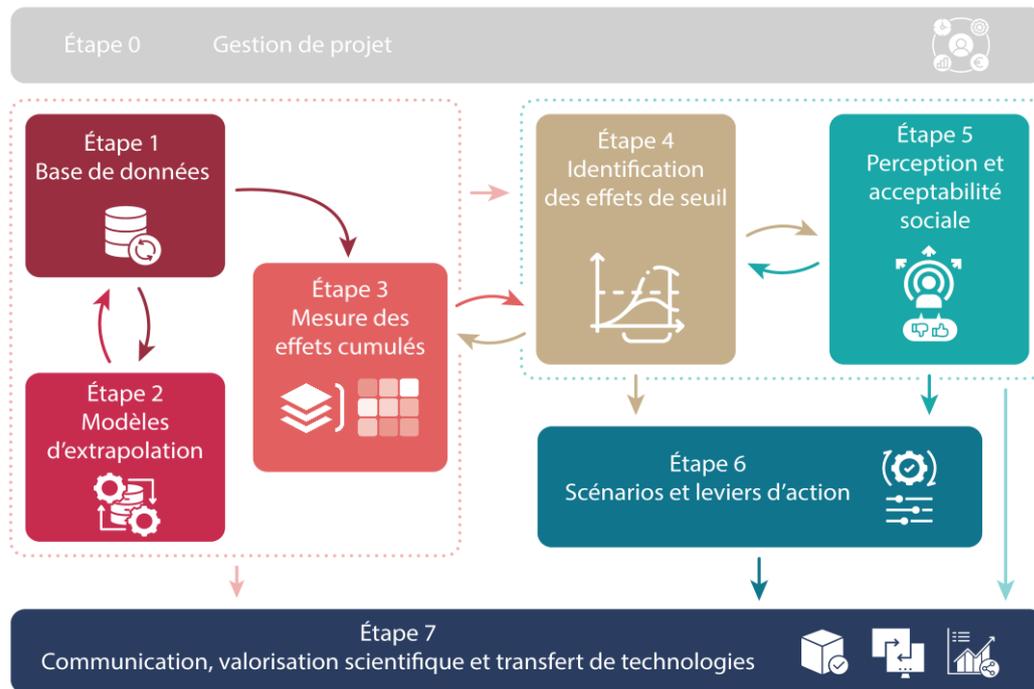
VERS UNE GESTION INTÉGRÉE



Consortium de chercheur.e.s et gestionnaires

- 5 laboratoires de recherche
- 7 Aires Marines Protégées
- 3 projets doctoraux (1 en cours)

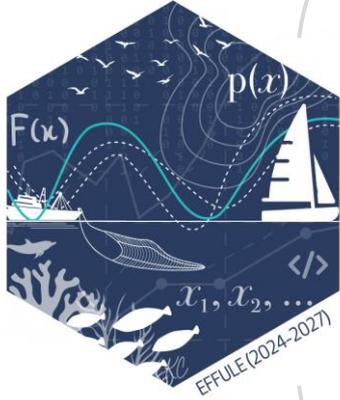
CADRE MÉTHODOLOGIQUE & OUTILS CO-CONSTRUIT, PÉRENNE, INTER-OPÉRABLE



↔ Echanges et transferts (connaissances, données, méthodes)

Étape 3
Mesure des
effets cumulés

Laboratoires



EFFETS CUMULÉS
DES FRÉQUENTATIONS HUMAINES
LITTORALES SUR DES ÉCOSYSTÈMES
ÉCOLOGIQUEMENT ET ÉCONOMIQUEMENT
SENSIBLES

Aires Marines Protégées



MÉTHODES PLURI- INTERDISCIPLINAIRES

Cumulative Impact Assessment

(*Quemmerais-Amice et al., 2020*)

+ Effets Additifs, Antagonistes, Synergiques

Ecological Quality Assessment

Trajectoires d'écosystèmes / enveloppes de références
(*Sturbois et al., 2023*)

RECHERCHE APPLIQUÉE GESTION

Interopérabilité, transférabilité

Enjeux opérationnels

CONCLUSION

**COMPRÉHENSION DU PHÉNOMÈNE DE
FRÉQUENTATION (PLAISANCE)**

**REPRÉSENTATIVITÉ DE LA DONNÉE ?
(DONNÉES IN-SITU À ACQUÉRIR)**

**QUANTIFICATION ET SUIVI DE LA
PROPAGATION DES INCERTITUDES ET
ERREURS**



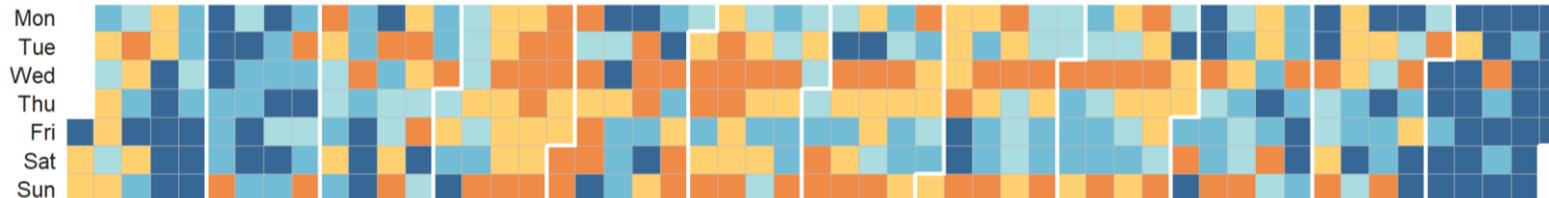
**MERCI DE VOTRE
ATTENTION**



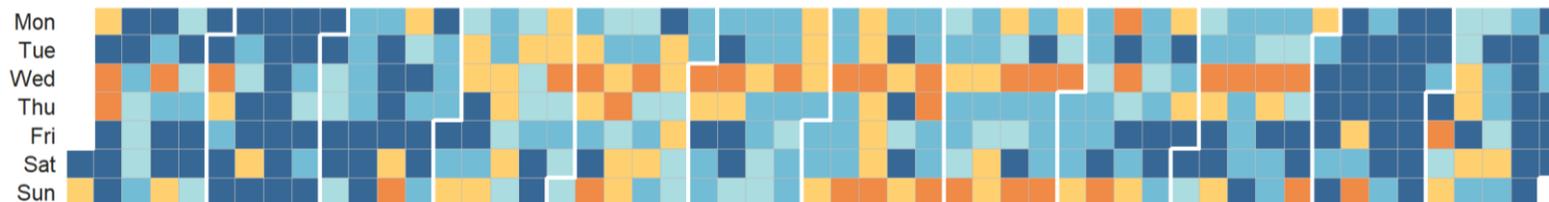
kimberley.cloirec@univ-brest.fr
antoine.ledoeuff@univ-brest.fr
frederic.audard@univ-brest.fr

N_{tot}. Navires / jour dans le Bassin d'Arcachon

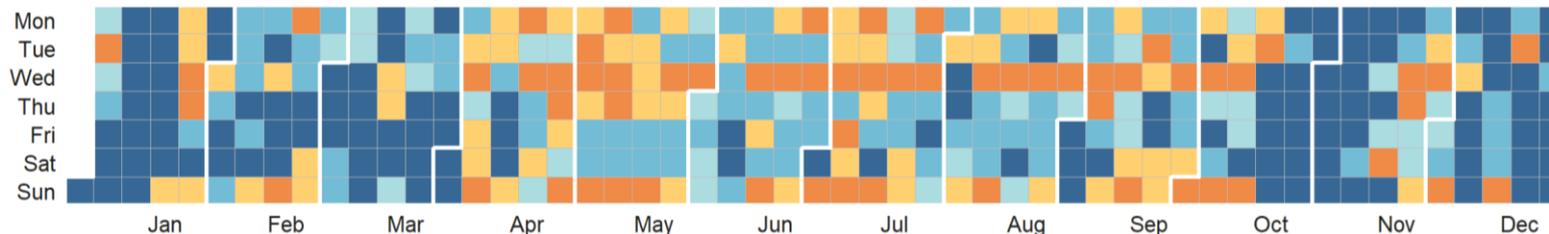
2021



2022



2023



 Données parcellaires
Sur la base de données AIS

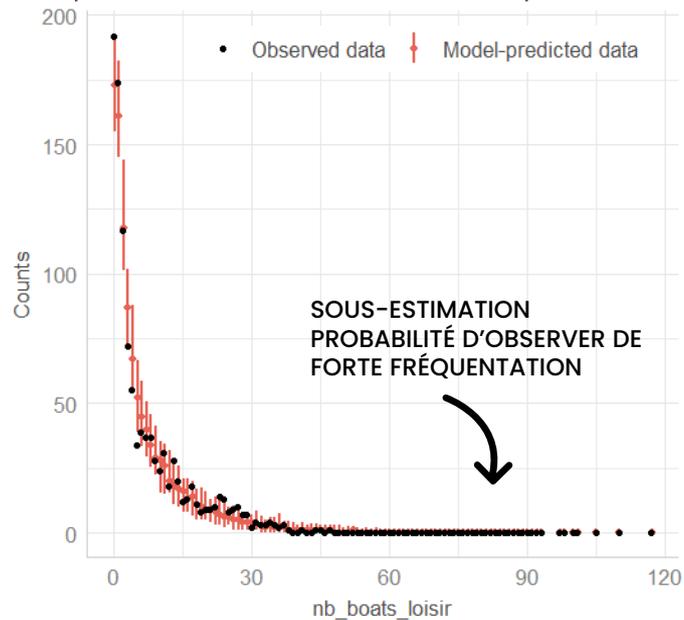
Sources : Marine Traffic (2021) | CEREMA (2022 - 2023)
Traitement : Discretisation aux quantiles et transformation logarithmique

Nombre de bateaux par jour
■ 0 ■ 1-2 ■ 3-4 ■ 5-7 ■ +8

DIAGNOSTIQUES DHARMA POST-AJUSTEMENT

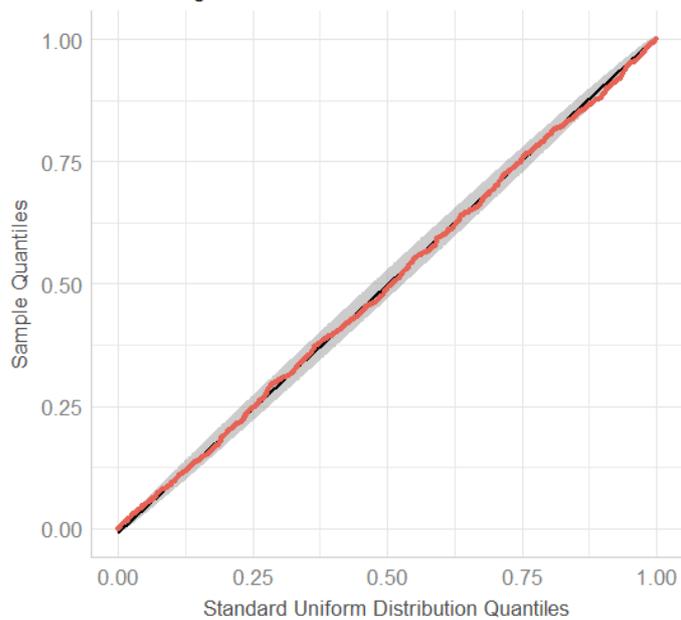
Posterior Predictive Check

Model-predicted intervals should include observed data points



Uniformity of Residuals

Dots should fall along the line



QUALITÉ D'AJUSTEMENT

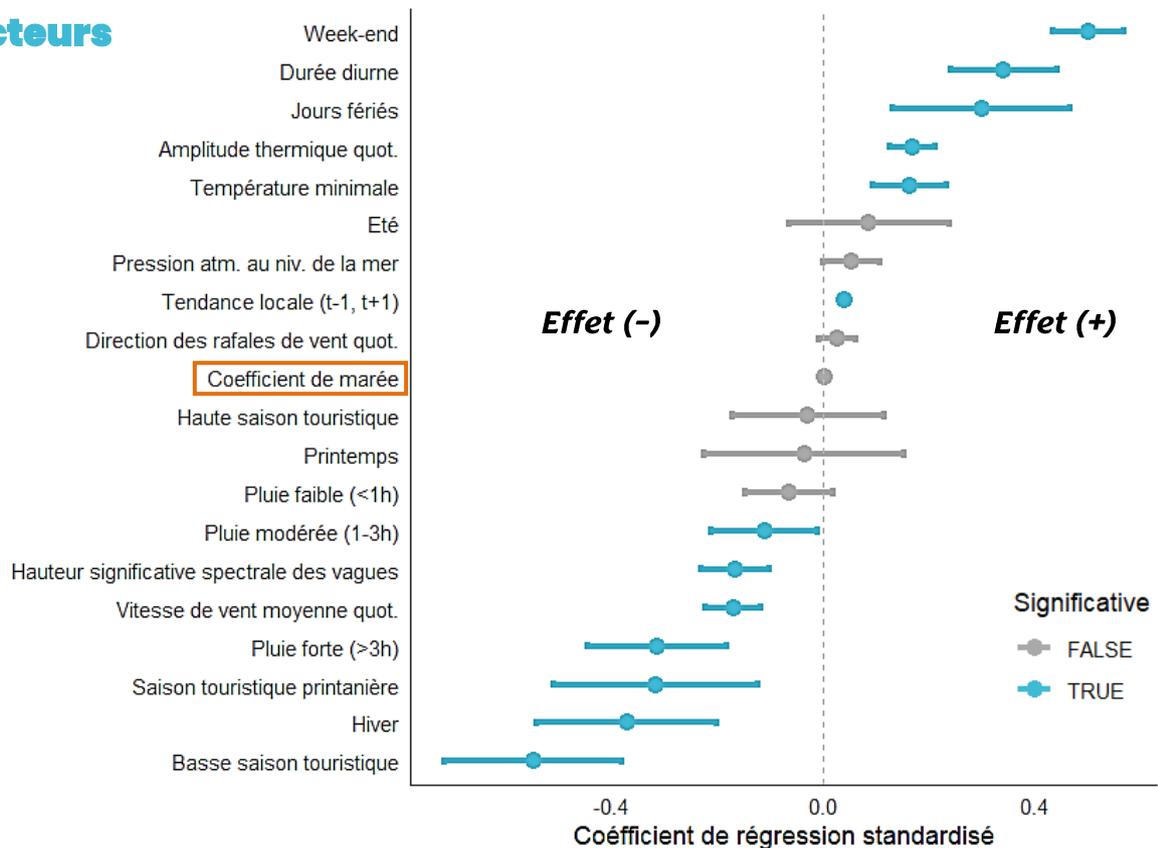
$$R^2_{\text{Déviance}} = 1 - \frac{\text{Déviance modèle}}{\text{Déviance nulle}}$$

$$R^2_{\text{Déviance}} = 0.822$$

MODÈLE GLOBAL À L'ÉCHELLE DU BASSIN

M. explicatif

11 facteurs



DIAGNOSTIC (2021-2023)

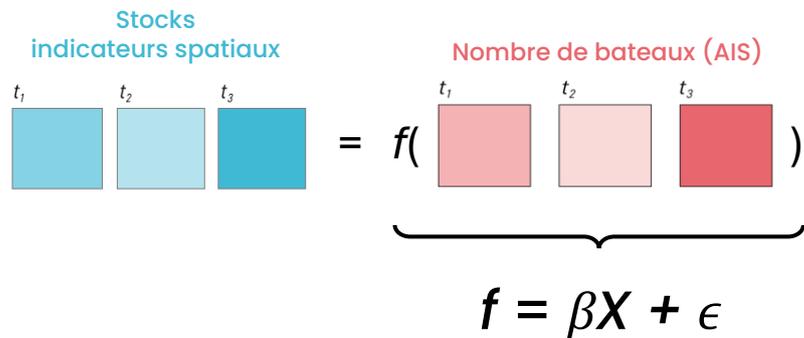


Basse saison touristique	-42.6 %
Hiver	-31.1 %
Pluie forte (>3h)	-27.0 %
Hauteur vague	-15.2 %
Vitesse du Vent	-15.6 %

Week-End	65 %
Durée diurne	40.7 %
Jours fériés	34.8 %
Température minimale	17.7 %

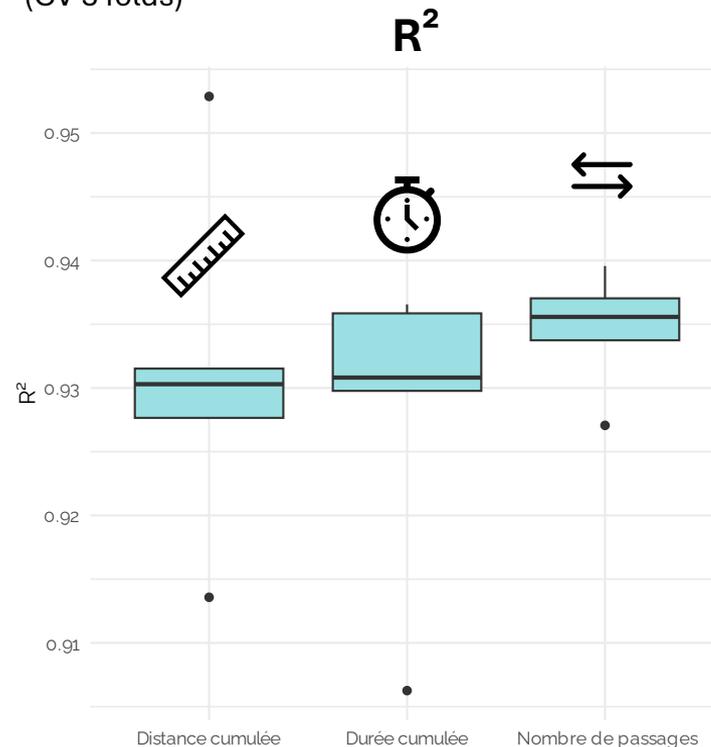
REDRESSEMENT DES DONNÉES

Ajustement



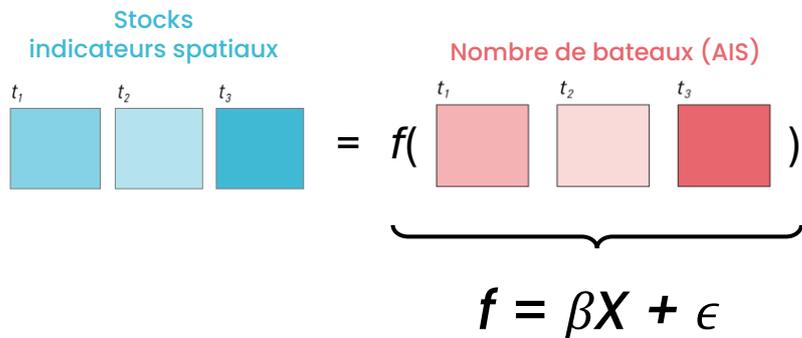
Validation

(CV 5 folds)



REDRESSEMENT DES DONNÉES

Ajustement



3. Prédiction du stock de l'indicateur spatial /

$I_{\text{stock}} = \beta_{I0} + \beta_{I1} N_{\text{bat.R}}$

Validation

(CV 5 folds)

