



**Pronostic de durée de vie en fatigue
par apprentissage statistique
et modélisation physique**

Journées de la Conception robuste et fiable

11 mai 2017

Sylvain Girard

girard@phimeca.com

Point de départ : la fatigue des *risers*

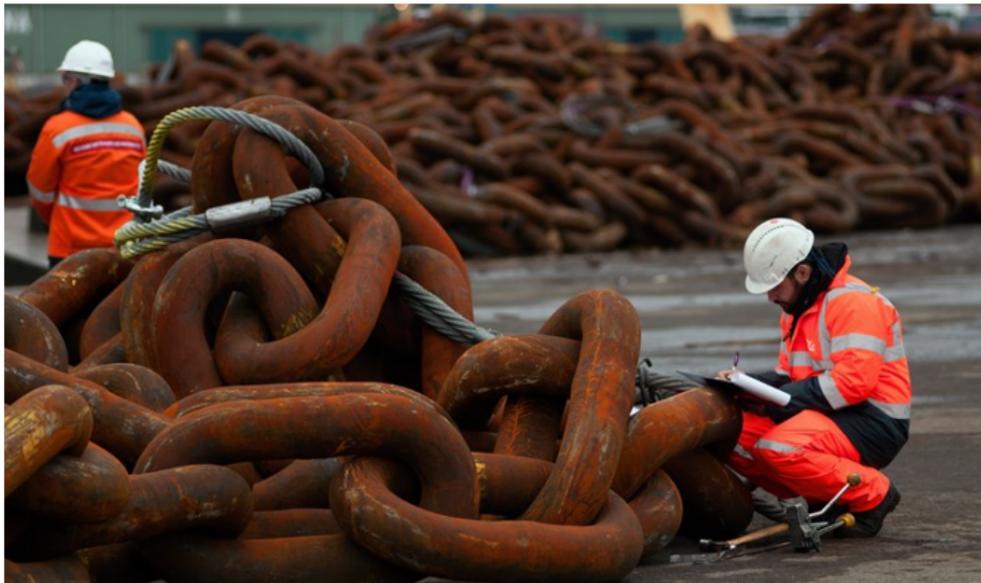
- Les *risers*, tuyaux acheminant le pétrole depuis le fond marin, sont soumis au mouvement continu de la houle.



- Objectif initial** : prédire l'endommagement en fatigue pour prolonger la durée de vie des installations

Diversité d'application

Tenue des lignes d'ancrage



☐ **Plus généralement** : **diagnostic** et **pronostic** de l'état de santé d'installations en mer à partir de mesures embarquées

Une collaboration de 10 ans

☐ Une nouvelle méthode de pronostic **bientôt industrialisée**, avec de **nombreuses applications** en perspective.

☐ Clef du succès : un partenariat fondé sur la confiance mutuelle

 **PRINCIPIA** modélise la physique des systèmes

 **PHIMECA** articule simulation numérique et analyse de données

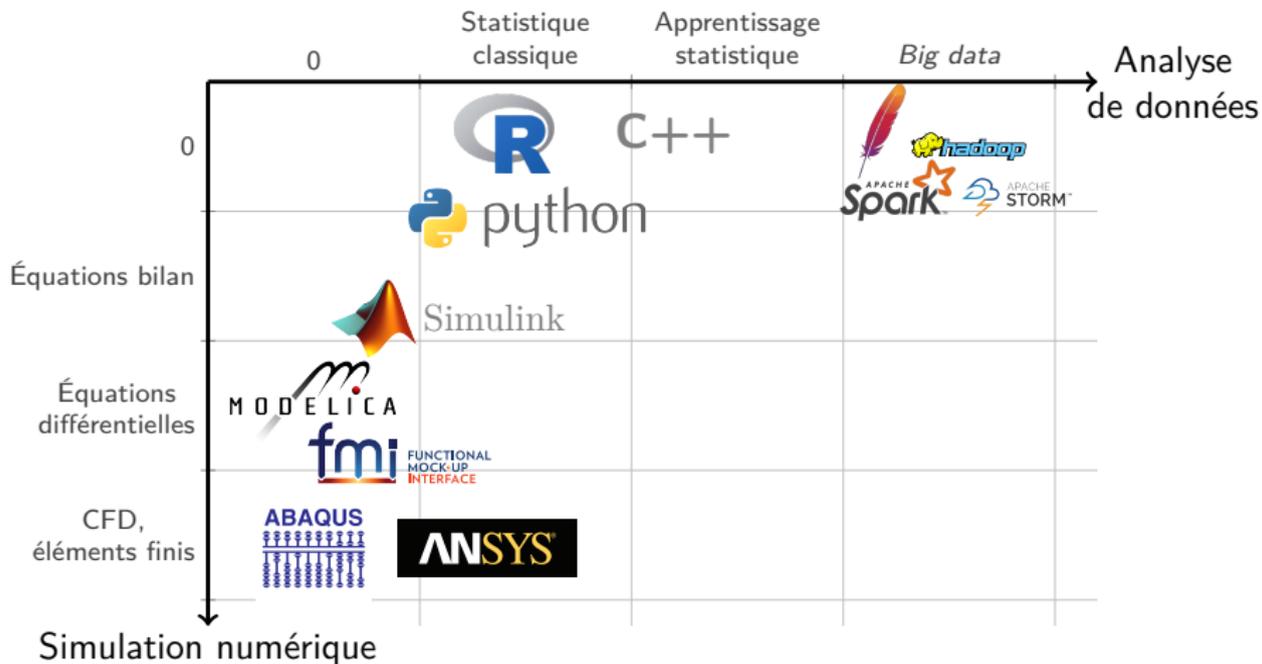
Ingénierie robuste

- = Conception et exploitation de systèmes industriels
 plus sûrs et performants grâce à la simulation numérique et
 l'analyse de donnée



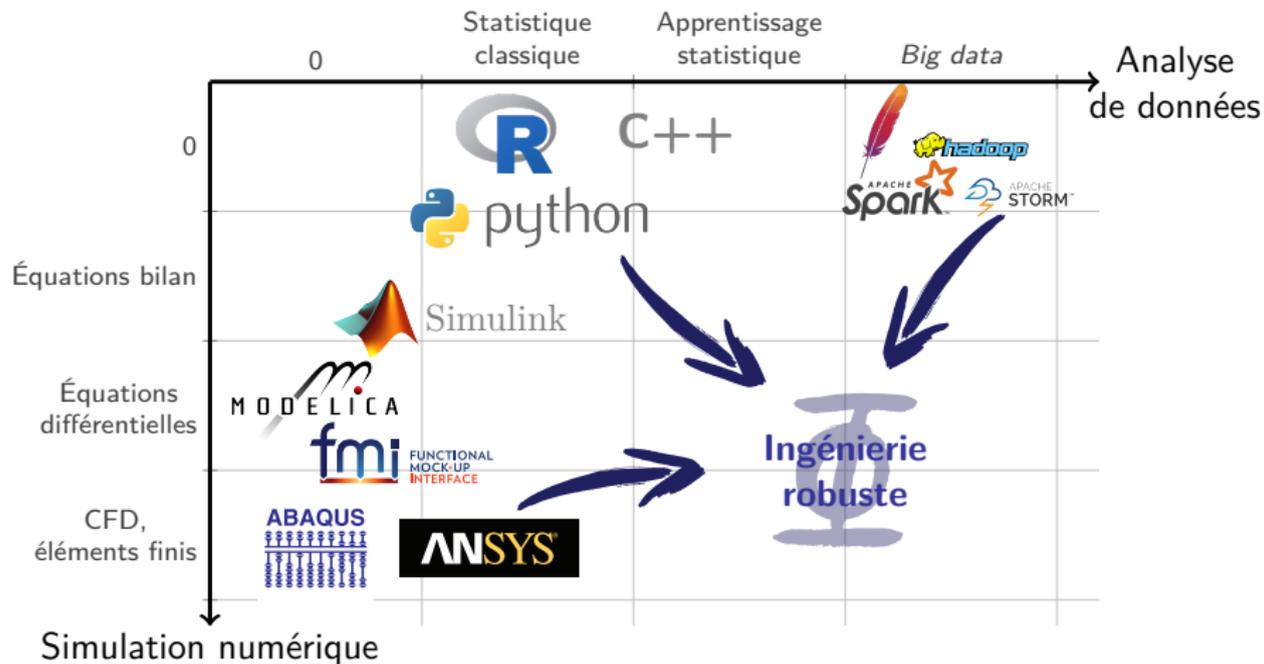
Ingénierie robuste

- = Conception et exploitation de systèmes industriels
 plus sûrs et performants grâce à la simulation numérique et
 l'analyse de donnée



Ingénierie robuste

- = Conception et exploitation de systèmes industriels
 plus sûrs et performants grâce à la simulation numérique et
 l'analyse de donnée



Plan

Contexte

Nouvelle méthode de pronostic

Quelles données, quels modèles ?

Signaux structurés de grande dimension

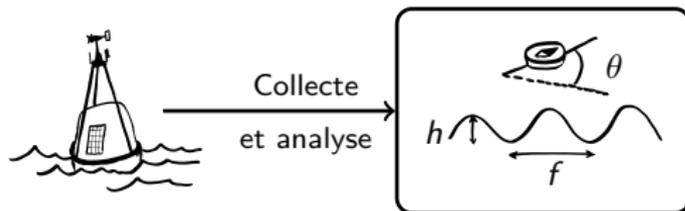
Changement d'échelle et extrapolation

Résultats

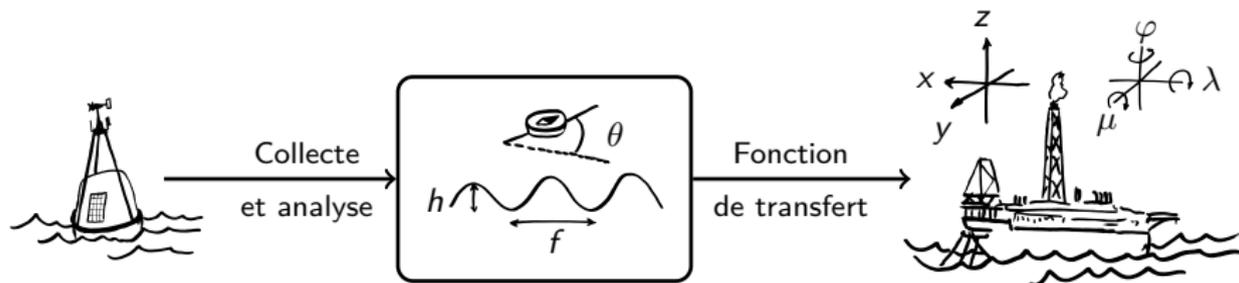
Validation par des données de synthèse

Application à la conception d'éoliennes flottantes

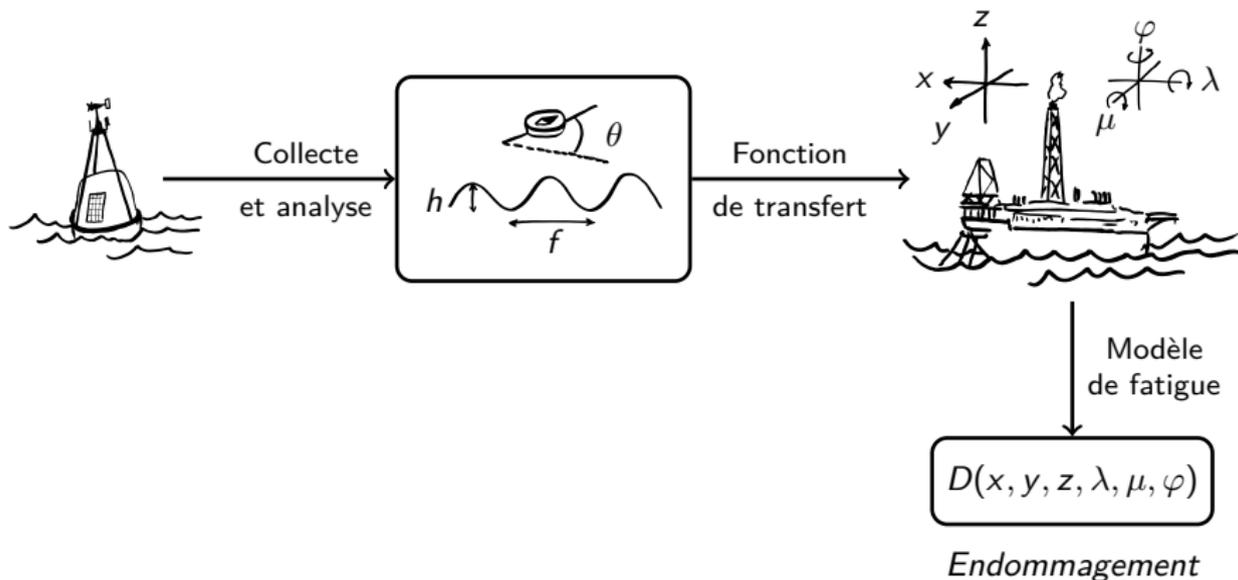
Méthode classique de pronostic



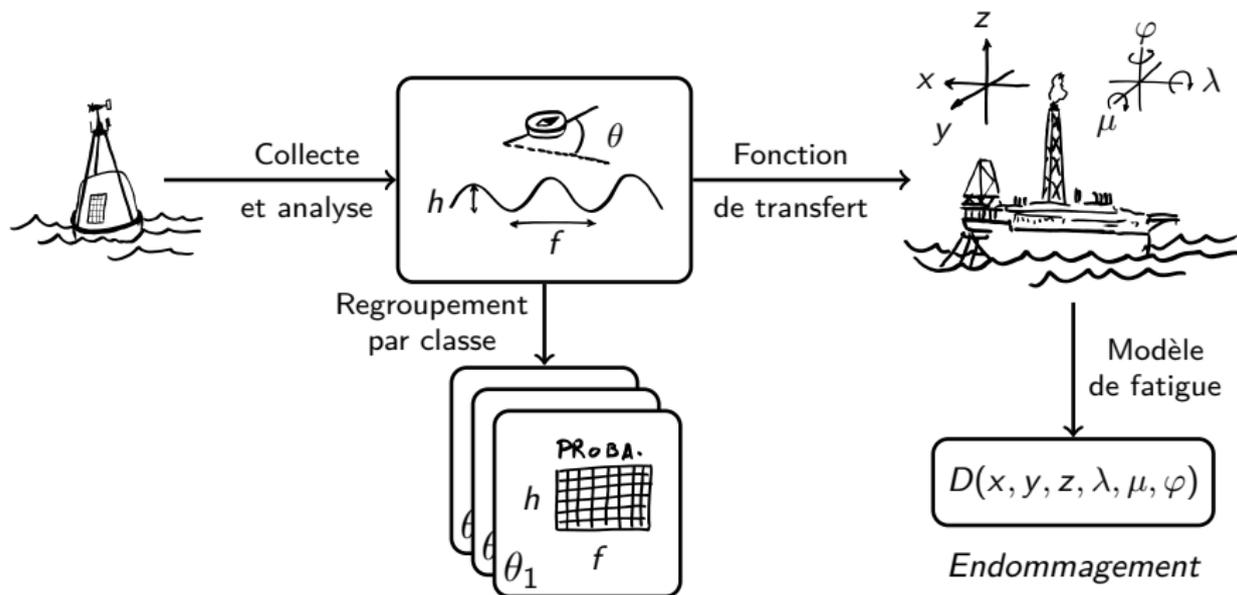
Méthode classique de pronostic



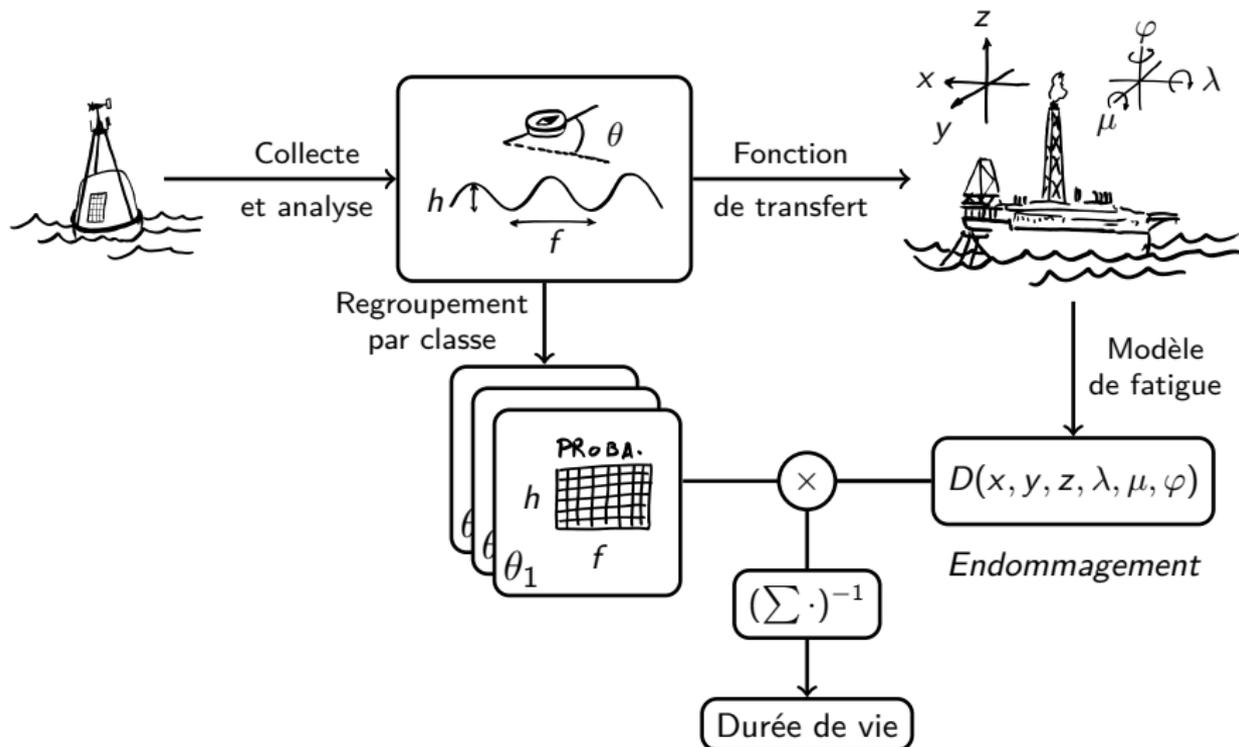
Méthode classique de pronostic



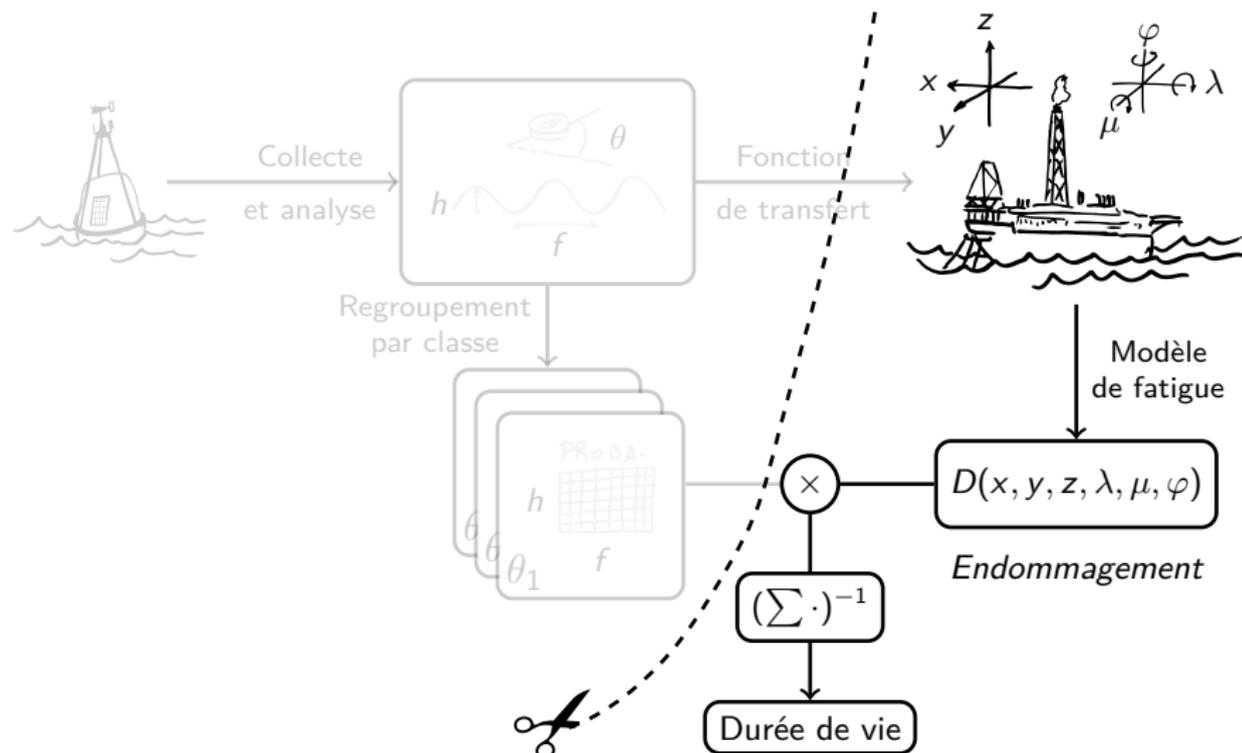
Méthode classique de pronostic



Méthode classique de pronostic

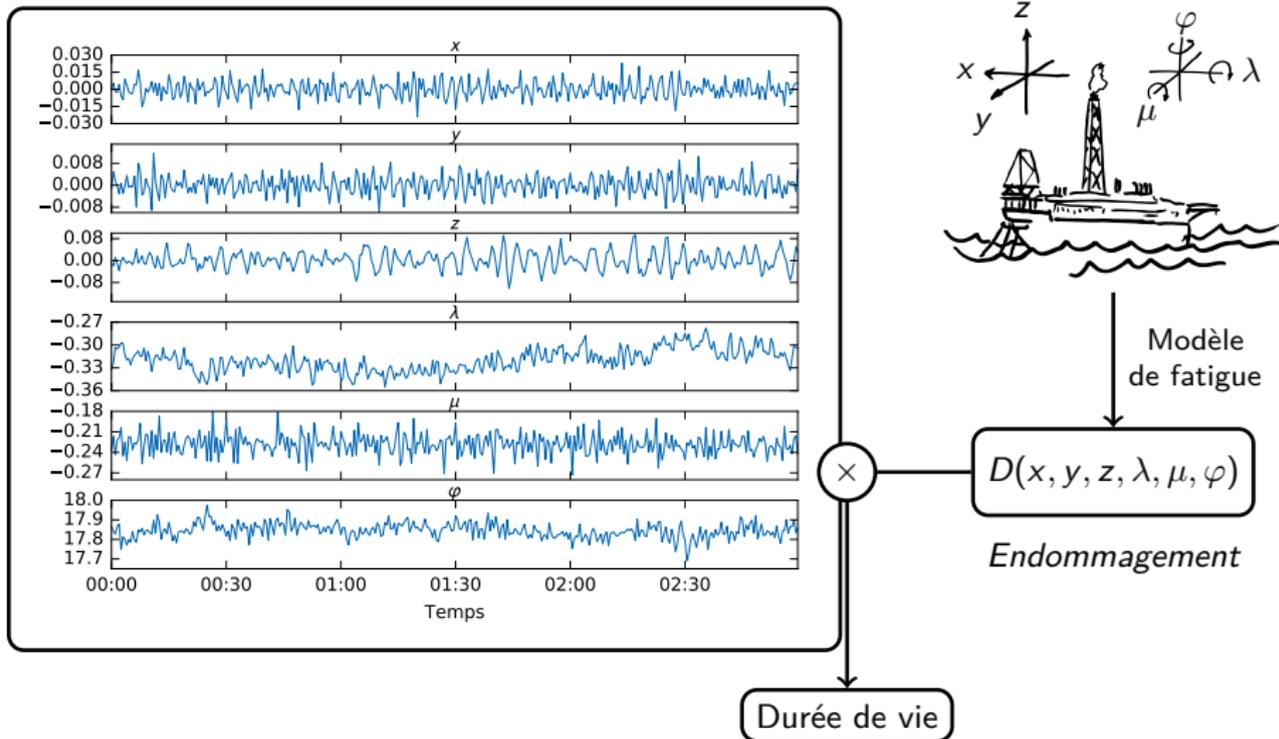


Innovation #1 : utiliser les mesures embarquées



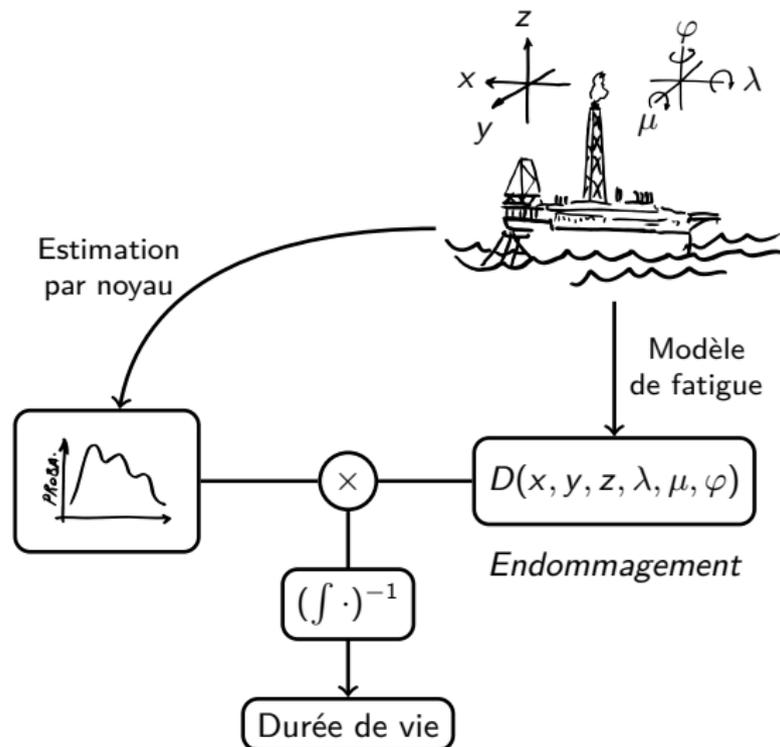
☐ C'est le mouvement du bateau et non les vagues qui nous intéresse !

Innovation #1 : utiliser les mesures embarquées

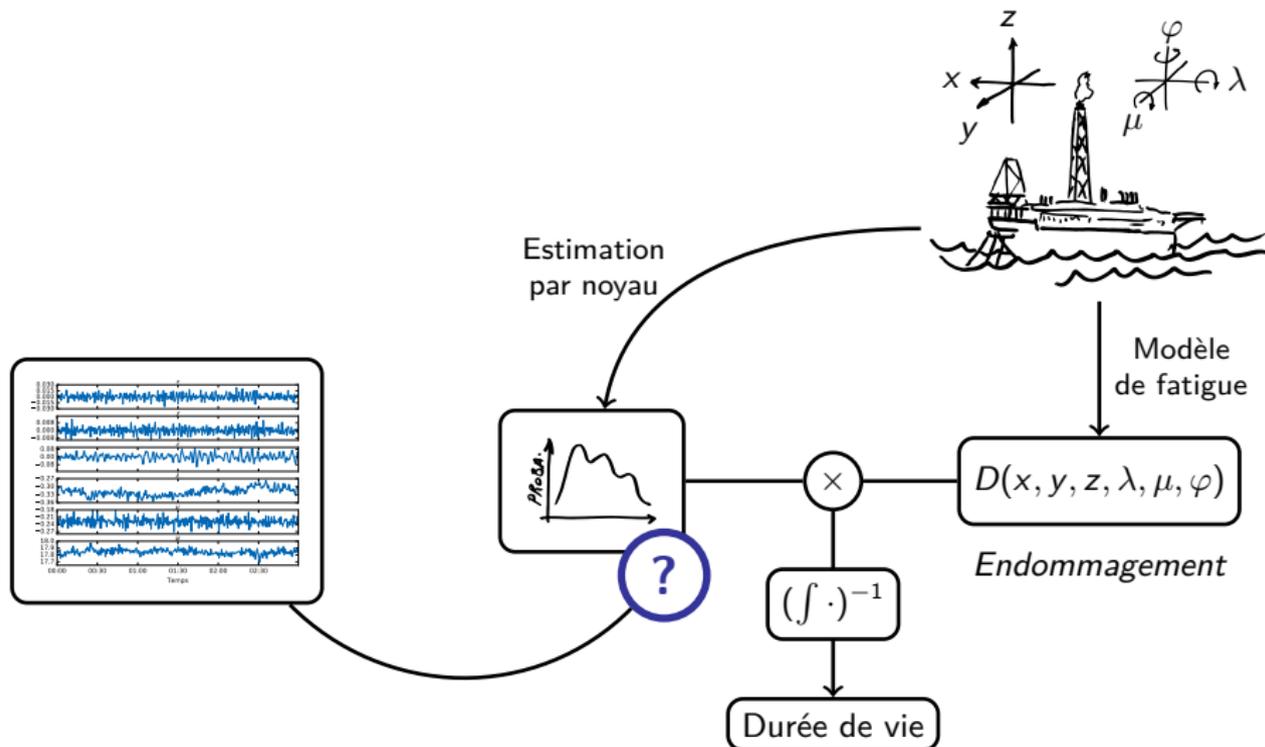


☐ Exemple d'épisode de mouvement de 3 heures.

Nouvelle méthode de pronostic

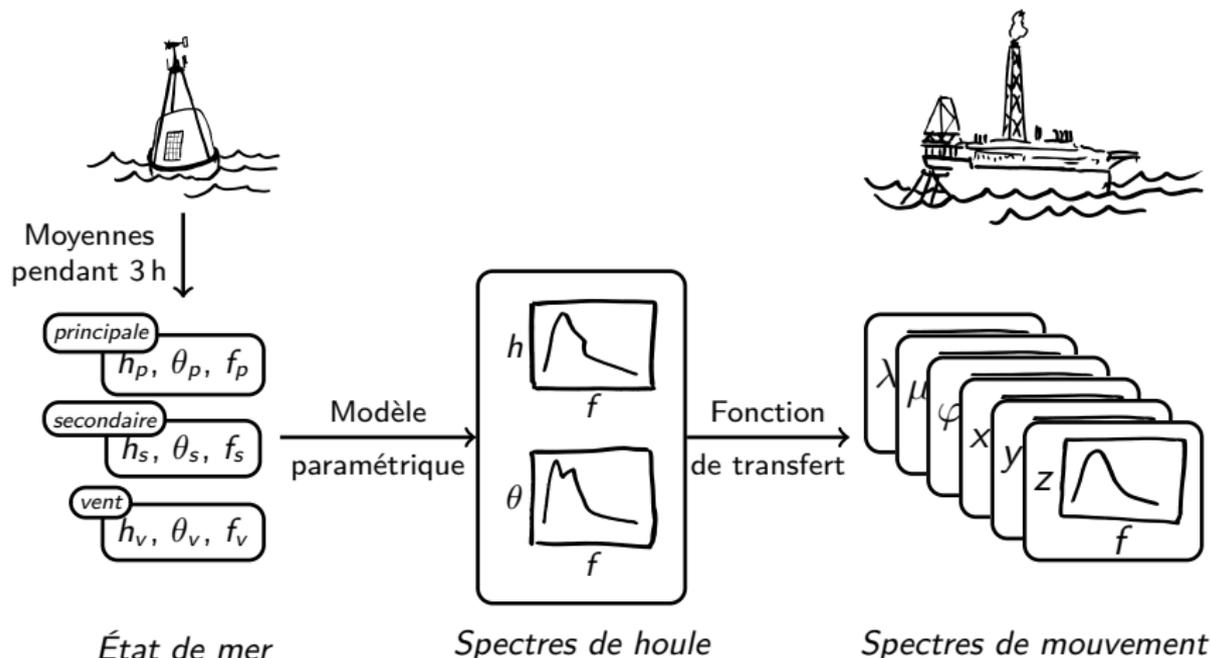


Problème de dimension



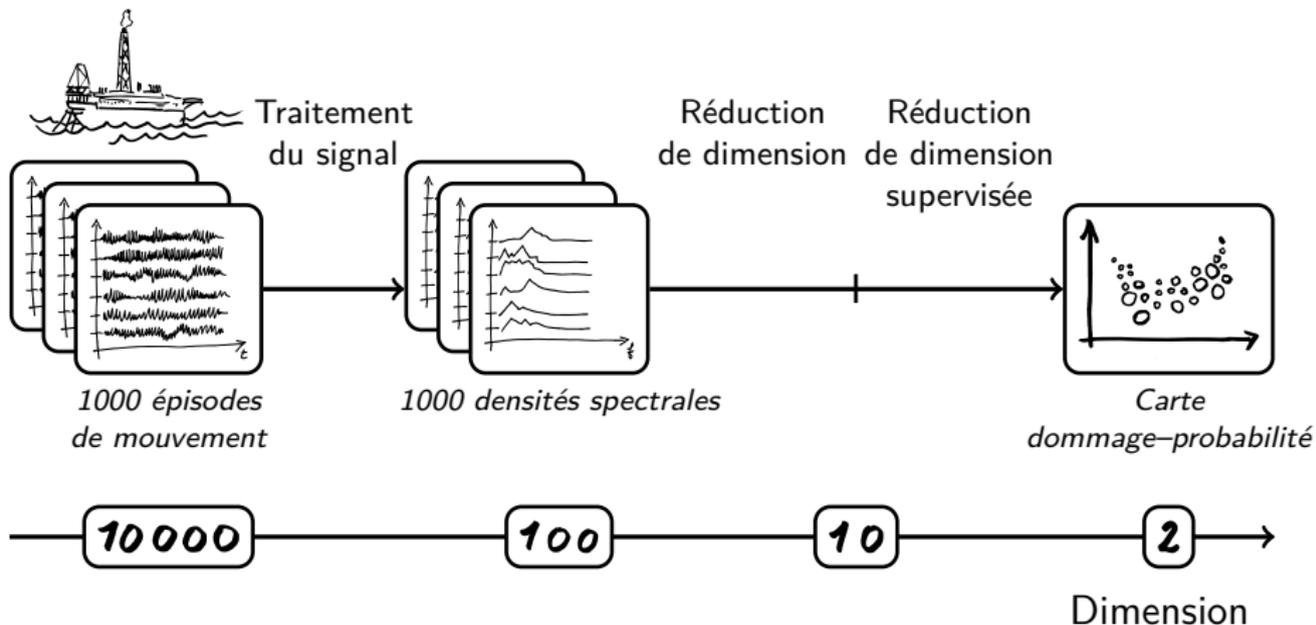
Les données d'entrée sont structurées et de grande dimension.

Réduction de dimension dans la méthode classique



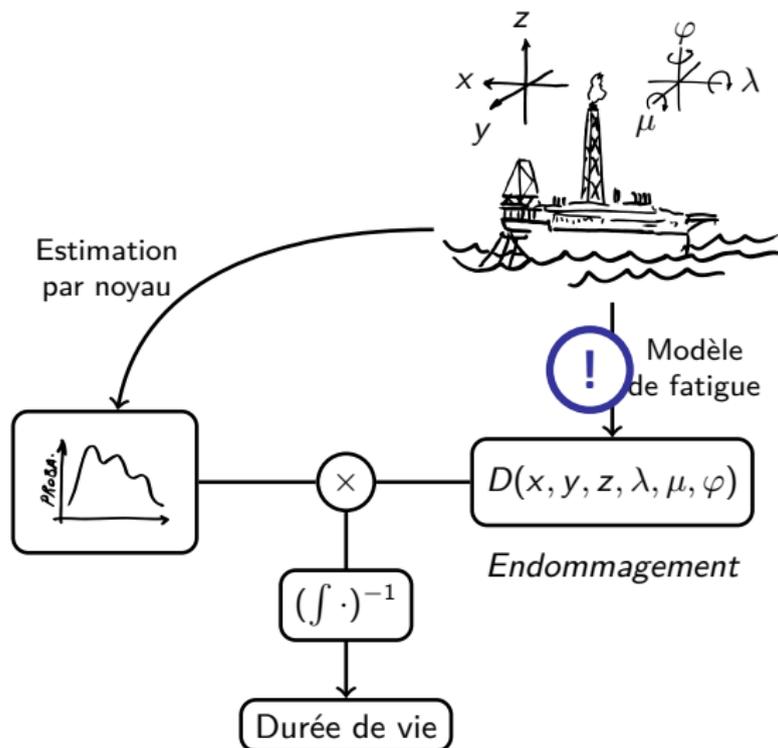
- ☐ Chaque étape repose sur des **hypothèses fortes**, parfois implicites.

Innovation #2 : représentation concise



☐ La réduction de dimension est dédiée à l'objectif de pronostic.

Problème de temps de calcul



☐ Comment extrapoler à partir d'une centaine de simulations ?

Échelles de temps

Période caractéristique des vagues	2 s
État de mer	3 h
Effet d'une tempête	1 semaine
Variabilité saisonnière	3 mois
Campagne de mesure	2 ans
Durée d'exploitation	30 ans
Durée de vie	150 ans

- ☐ Le passage d'une échelle à l'autre est une **extrapolation** fondée par une **hypothèse de stationnarité**.
- ☐ Il faut une **connaissance presque exhaustive** du comportement à la petite échelle.

Extrapolation dans la méthode classique

Probabilité

Domage

$$\sum \left(\begin{array}{c} h \\ \theta \quad f \end{array} \times \begin{array}{c} h \\ \theta \quad f \end{array} \right)^{-1} = \text{durée de vie}$$

☐ L'homogénéité des classes de dommage n'est pas garantie.

Innovation #3 : émulation et modèle probabiliste

Probabilité

Domage

$$\int \left(\begin{array}{c} \text{Graphique d'une courbe de probabilité} \\ \text{Estimation par noyau} \\ \text{Apprentissage : 1000 signaux} \end{array} \times \begin{array}{c} \text{Graphique d'un nuage de points} \\ \text{Émulation (processus gaussien)} \\ \text{Apprentissage : 100 simulations} \end{array} \right)^{-1} = \text{durée de vie}$$

- ☐ La pertinence de la **représentation concise des mouvements** est déterminante.

Avantages de la nouvelle méthode de pronostic

- ④ Raccourcir la chaîne de modèles et ne conserver que ses maillons les plus fiables.
- ④ Condenser l'information des signaux en un nombre restreint de variables, spécialement adaptées au pronostic.
- ④ Tirer pleinement parti du cadre probabiliste du pronostic pour fonder sa pertinence.

Plan

Contexte

Nouvelle méthode de pronostic

Quelles données, quels modèles ?

Signaux structurés de grande dimension

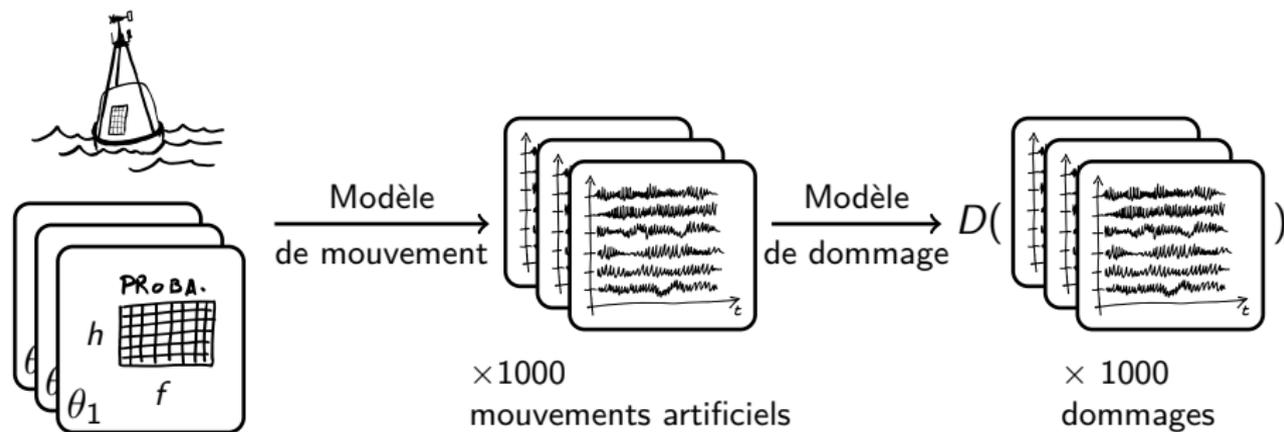
Changement d'échelle et extrapolation

Résultats

Validation par des données de synthèse

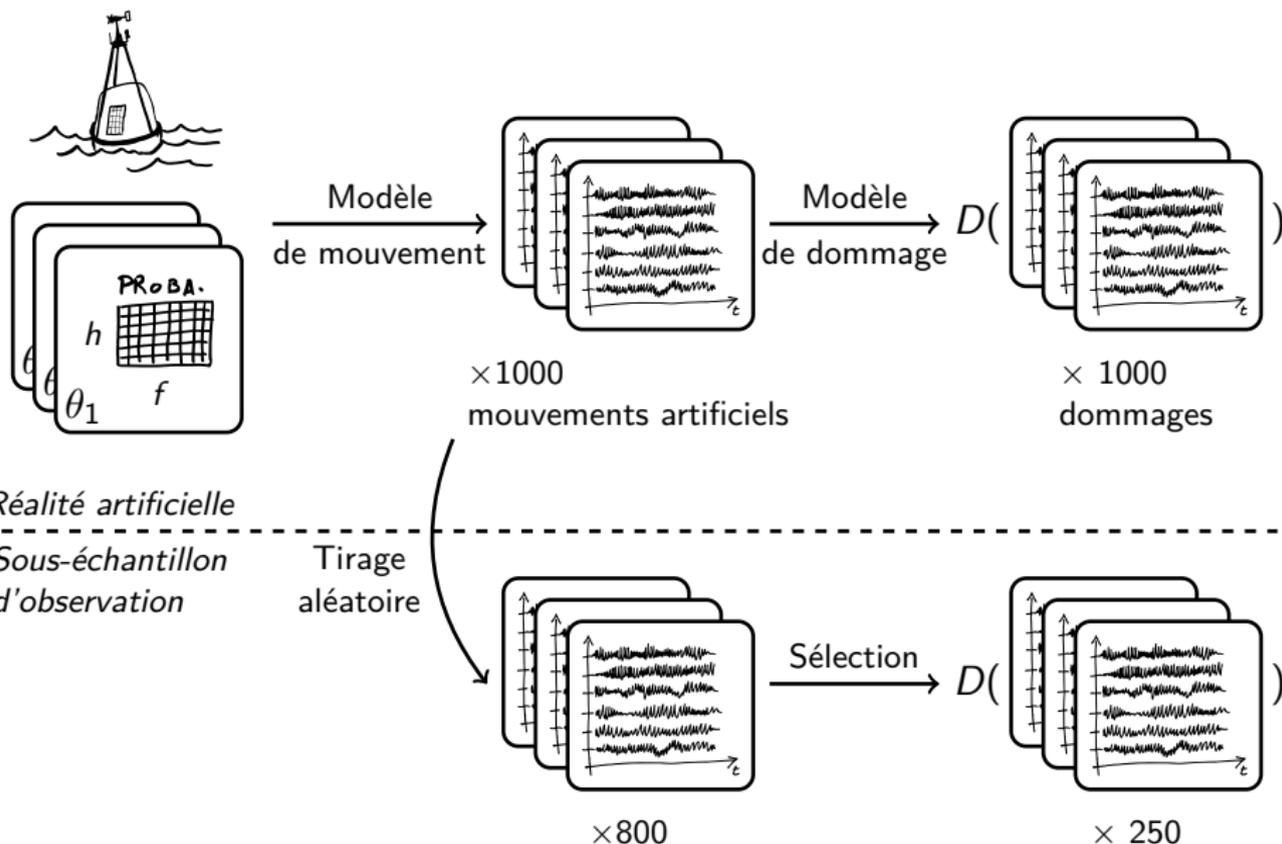
Application à la conception d'éoliennes flottantes

Validation par *bootstrap*

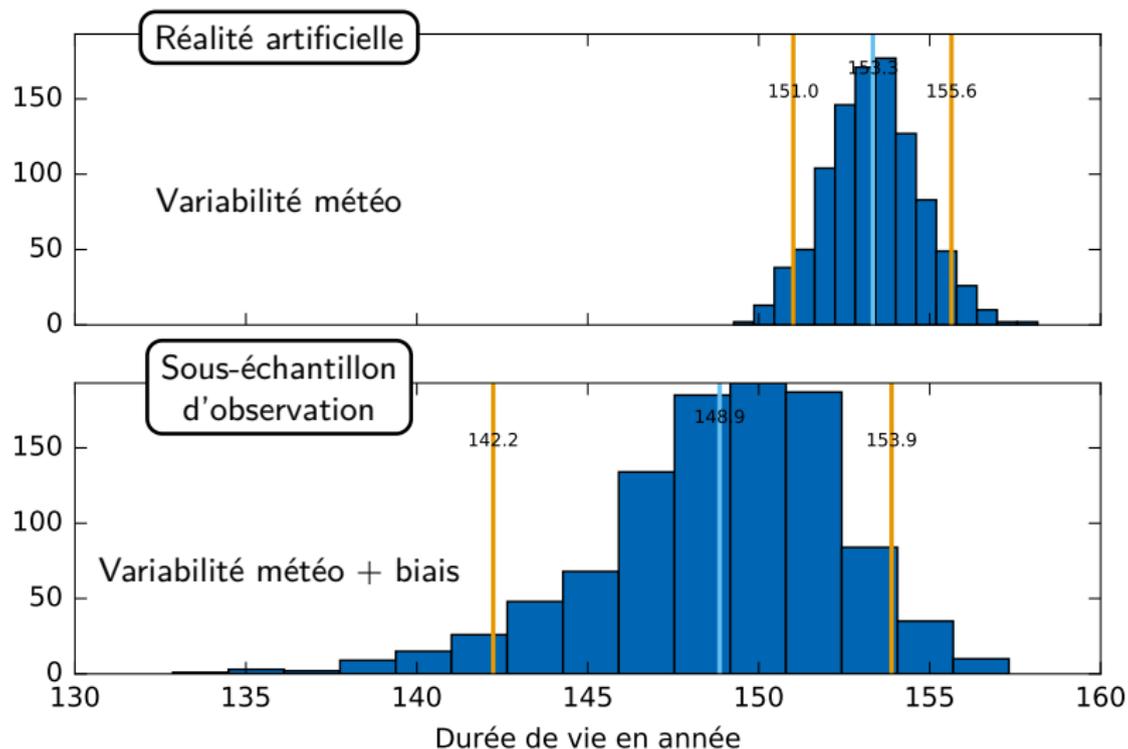


Réalité artificielle

Validation par *bootstrap*



Impact du biais d'approximation



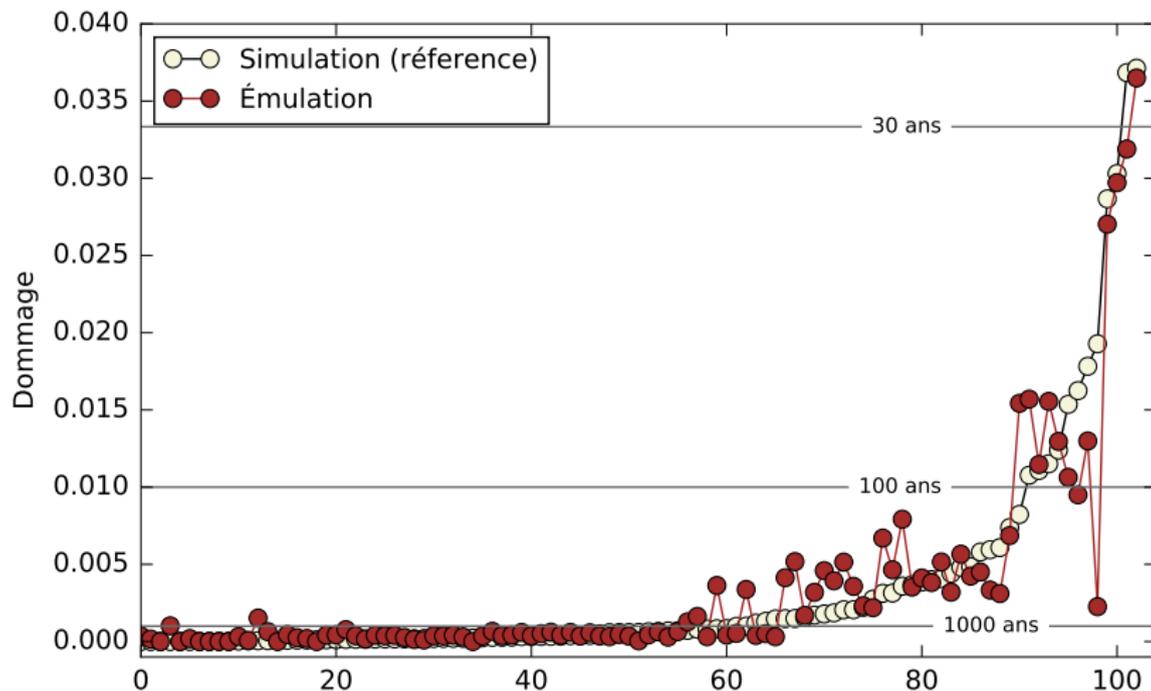
📌 Le **bias de l'émulateur** ajoute une incertitude acceptable.

Application : garantir la tenue des ancrages



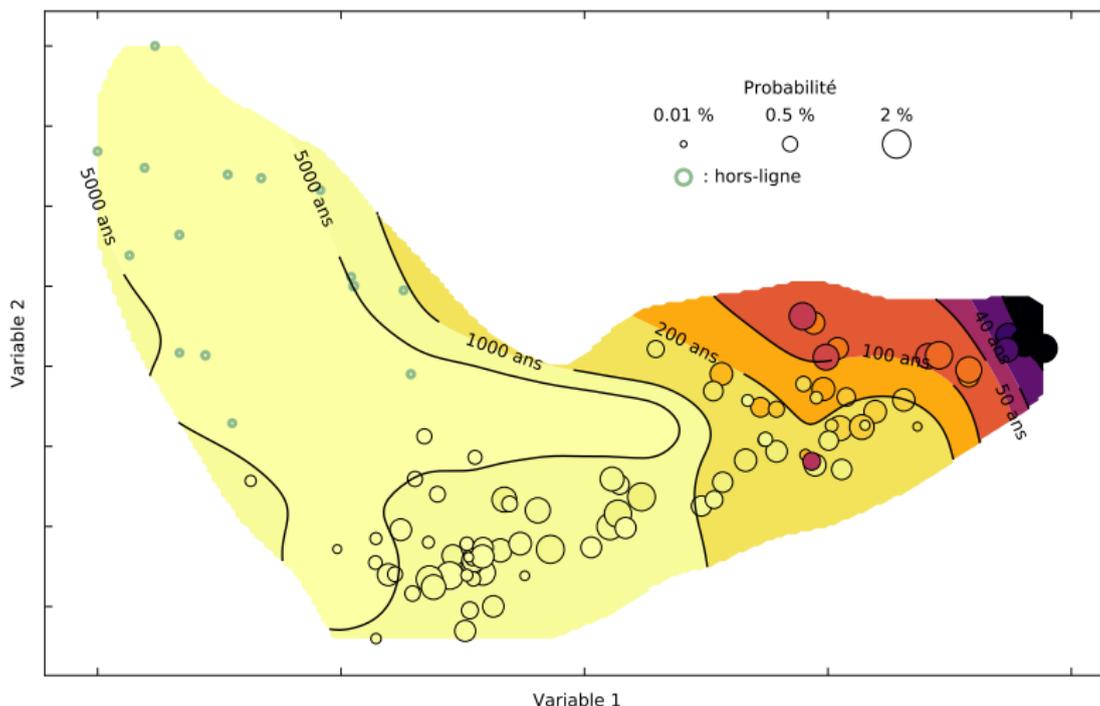
- ☐ Les concepteurs d'éoliennes flottantes doivent convaincre les investisseurs.

Validation croisée de l'émulateur



Apprentissage : 103 simulations de mouvements et dommages

Carte probabilité–dommage



☐ Cette carte issue de simulations sera mise à jour continuellement au fil de la collecte des données.

Synthèse

- ☞ Combiner **modélisation physique** et **apprentissage statistique** renouvelle le pronostic de fatigue des installations en mer, depuis la **conception** à la **prolongation d'exploitation**, en passant par la **surveillance en ligne**.

- ☞ **Technique clef :**
Identifier des **représentations de faible dimension** pertinentes des modèles et données sélectionnés

Perspectives

- ☐ Cette année : mise en œuvre industrielle
- ☐ Question de recherche :
« toute l'information sur le dommage est-elle dans le spectre ? »
- ☐ Plusieurs applications de l'approche à d'autres domaines et types de signaux.



Merci de votre attention.

Contact : girard@phimeca.com