

# Séminaire du GIP Seine-Aval

08 avril 2021



# Scénarios et Trajectoires

*Pourquoi et comment mobiliser les  
outils de modélisation ?*



*Jérémy Lobry – INRAE EABX*

*avec la participation de JP Lemoine (GIPSA)  
et les inputs de M. Muntoni, C. Fisson et N. Bacq (GIPSA)*

Les financeurs du GIP Seine-Aval sont :





*Laurence Lestel*  
*Nicolas Flipo*  
*Pascal Claquin*  
*Sami Souissi*  
*Romaric Verney*  
*Jérémy Lobry*  
*Elise Avenas*  
*Nicolas Bacq*  
*Manuel Muntoni*  
*Cédric Frisson*  
*Jean-Philippe Lemoine*



# Scénarios, trajectoires, prédictions et modèles

- Les notions de *scénarios* et de *trajectoires* sont présentes dans les travaux SA et même dans les appels d'offres depuis longtemps
- De plus en plus présentes pour comprendre, anticiper, tester, évaluer, gérer...
- Elles sont utilisées par les gestionnaires et sont à la base de prises de décisions qui peuvent être déterminantes pour l'évolution du système

=> Modélisation(s) prédictives des trajectoires (écologiques) de l'estuaire de la Seine

- En d'autres termes

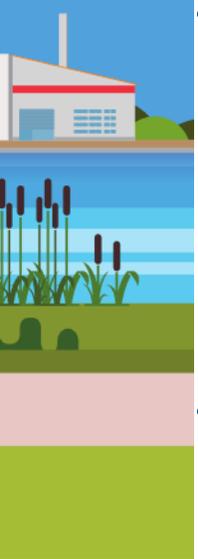
Prédire les évolutions possibles d'un paramètre, processus ou fonction écologique associés à l'estuaire de la Seine ...

...dans un contexte de stress multiples associés aux changements globaux ...

... pour contribuer à l'évaluation de mesures de gestion et de restauration.

- Cela implique

- ❑ Prédiction anticipatives => Modèles
- ❑ Décivant de façon pertinente le phénomène/mécanisme/processus/fonction (indices, proxy...)
- ❑ Prenant en compte de manière directe ou indirecte les facteurs environnementaux et anthropiques
- ❑ Permettant de tester des scénarios de gestion / restauration



## ■ Qu'entend-on par scénarios ?

### ■ Différentes définitions :

- cinéma, démarche prospective (récits), modélisation physique ou écologique, analyse de risques...

### ■ Ensemble d'hypothèses sur l'évolution future, possible ou non, d'un ou plusieurs facteurs de forçage du modèle

- Ex. niveau de GES dans les scénarios du GIEC

### ■ “**et si ?**” plutôt que “quoi et quand ?”

- Présenter différentes prédictions alternatives; différentes trajectoires possibles

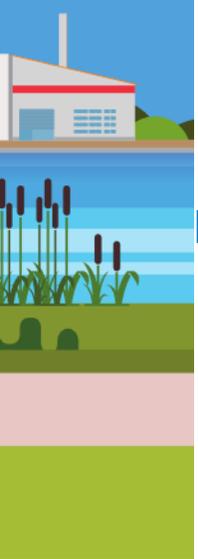
- H0 : pas d'hypothèses vs Hx correspondant au(x) scénario(s) étudié(s)

## ■ Et par trajectoires ?

- Évolution de la position d'un objet dans l'espace (date, position)

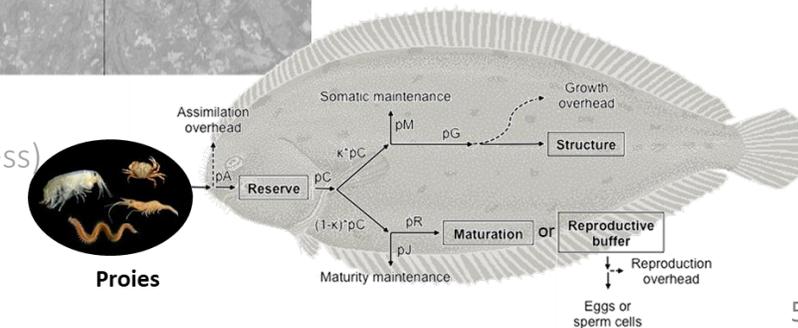
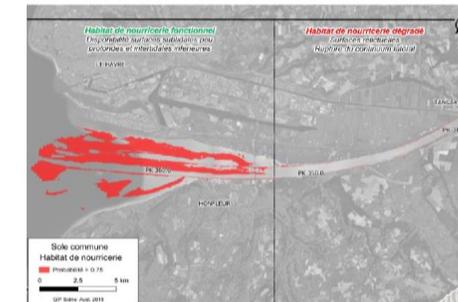
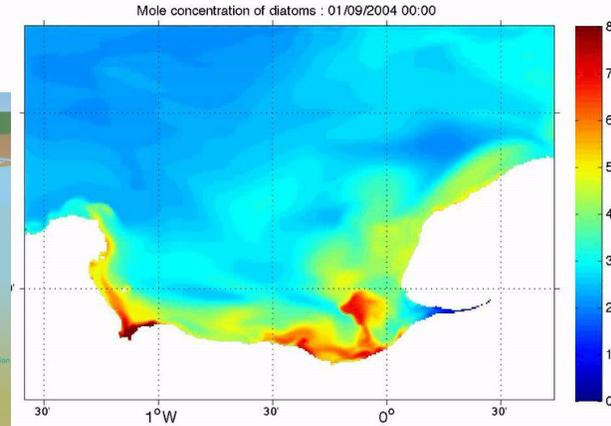
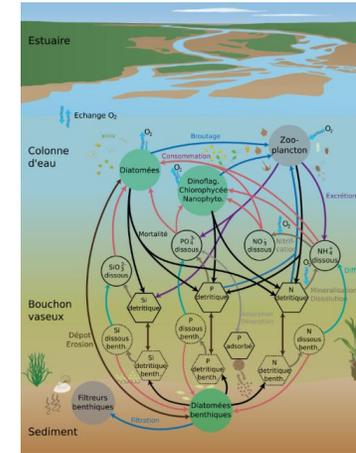
- Évolution de la valeur d'un paramètre dans le temps

- De façon + pragmatique : état d'un système/valeur d'un paramètre sous hypothèse Hx par rapport à aujourd'hui



# Quels outils disponibles ?

- Des bases de scénarios climatiques
  - Déclinables à l'échelle locale
- Des modèles Hydro(morpho) sédimentaires à ≠ échelles
  - Modèle "inondation" (*Artelia 2013, et en cours*)
  - Modélisation Ifremer CurviSeine (*cf. présentation Grasso, Lemoine*)
- Des modèles biogéochimiques et de production
  - ECO-MARS (Projet SA4- NEREIS / SA5 RESET)
- Des modèles écologiques
  - Des modèles d'habitats (zooplancton, benthos, poissons) (*SA5- ZOOGLOBAL, SA6-SENTINELLES, REPERE/PROPOSE...*)
  - Des modèles mécanistes (processus physiologiques...)
    - ✓ Copépodes (Dur et al. 2013...), sole (Mounier et al. 2020)
  - Des modèles de dynamique de population
    - ✓ Ex. sole (Rochette et al. 2010, Archambault et al. 2018, Champagnat et al. in press)



- On peut partir de récits complets déjà construits
  - Ex. SA5-RESET | 4 scénarios d'évolution à LT (horizon 2050) du système agro-alimentaire
- On peut en construire d'autres sans forcément les lier à des récits (écologie territoriale, dynamique socio-éco...)
  - Impact du CC (SLR, débit) sur les risques :
    - mise en place de mesure d'atténuation (zones d'expansions des crues) à intérêt écologique (reconnexion d'habitats latéraux)  
"Tuning the tide: creating ecological conditions for tidal marsh development in a flood control area" Maris et al. 2007
  - Effets du CC (température) sur la croissance, la maturité et la bioaccumulation de POP chez la sole
  - Effets de stratégies de gestion des sédiments "alternatives" sur les habitats estuariens

Se poser des questions... et essayer d'y répondre - *cf. exemple à suivre*



## EXEMPLE

Comment améliorer le fonctionnement écologique  
de l'estuaire de la Seine ?



*L'exemple de la fonction de nourricerie*

## ■ Fonction de nourricerie ?

### ■ Espèce modèle (ex. la sole ?)

(Le Pape et al. 2003, Gilliers et al. 2006, Amara et al. 2007, Rochette et al. 2010, Archambault et al. 2018)

### ■ Processus indicateurs

✓ Ex. Croissance, Maturité, Mortalité

## ■ Facteurs limitants

### ■ Surface habitats favorables

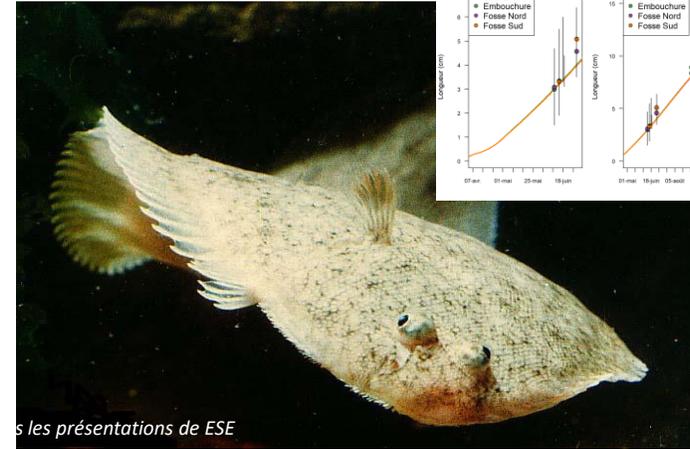
(Rochette et al. 2010, Archambault et al. 2018, Champagnat et al. in press)

### ■ Ressources trophiques (capacité d'accueil)

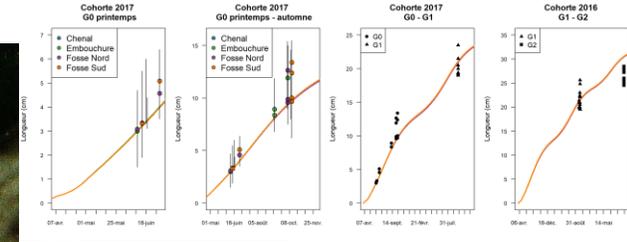
(Tableau et al. 2019, Day et al. 2020.... ) => cf/ présentations Anik Brind'Amour

### ■ Contaminants/qualité de l'eau et des sédiments

(Gilliers et al. 2006, Courrat et al. 2009; Rochette et al. 2010, Champagnat et al. in press, ...)



les présentations de ESE



Rapport SA6-CHOPIN

Peut on utiliser les matériaux issus des dragages pour restaurer/ recréer des habitats favorables aux nourricerie ?



## Exemple de scénario



Utilisation des immersions de sédiments dragués pour favoriser la fonction de nourricerie de soles de l'estuaire de la Seine ?

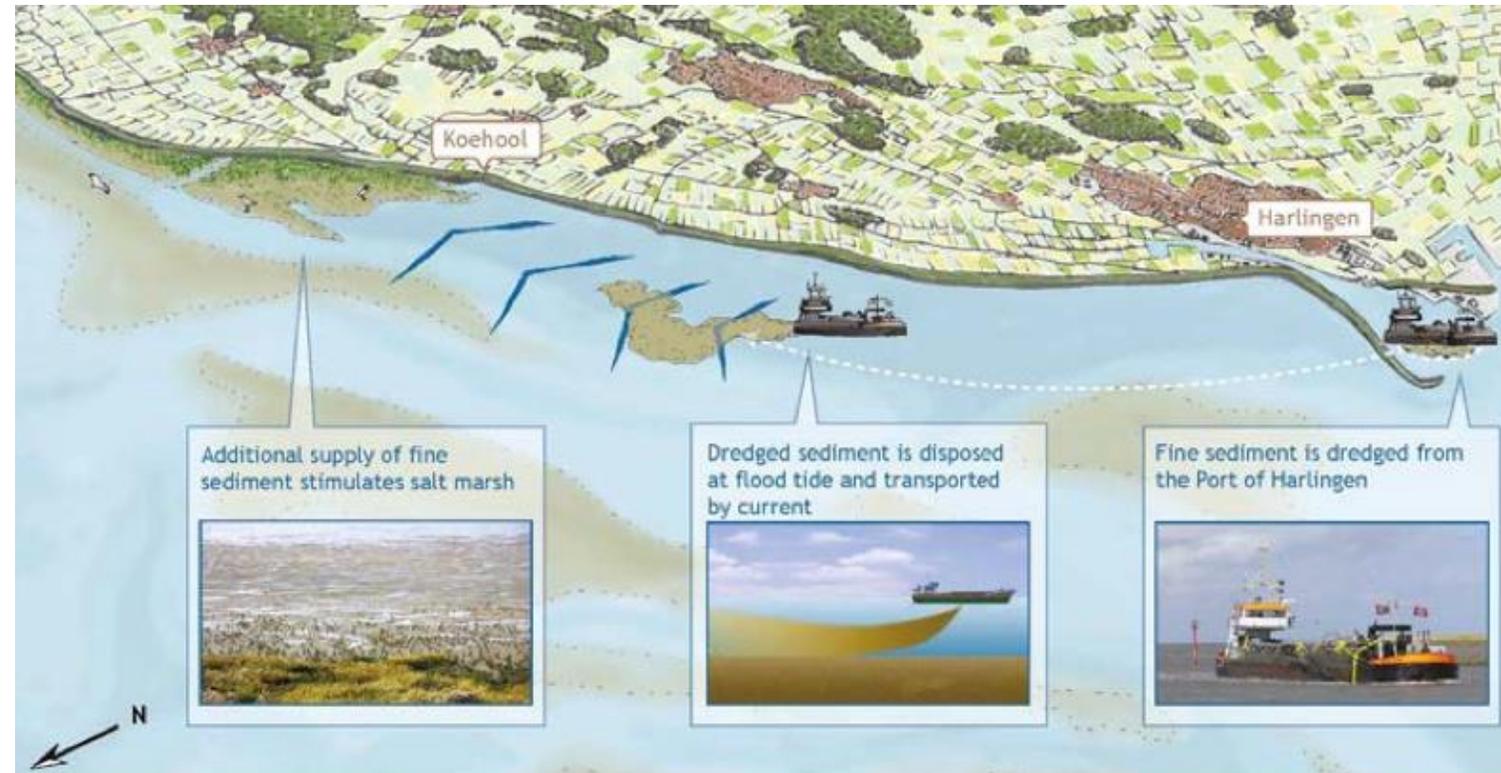
- Le concept :
  - **Orienter les effets des dragages et surtout clapages à des fins de génie écologique**
  - SA6-MEANDRES a montré que les dragages et les immersions pouvaient jouer un rôle dans la dynamique sédimentaire de l'estuaire

Ce concept a déjà été expérimenté par les Belges et Hollandais

- “morphological dredging” Restauration d’habitat dégradé par les aménagements dans l’estuaire de l’Escaut (e.g. Plancke et al. 2014)
- “mud motor” A beneficial use of dredged sediment to enhance salt marsh development (e.g. Baptist et al. 2019)

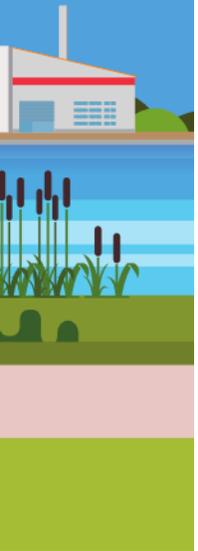
### Illustration du concept

*Recréation d’habitat intertidaux au large du port de Harlingen*





Comment favoriser la  
fonction de  
nourricerie?  
Les surfaces d'habitats  
intertidaux vaseux?

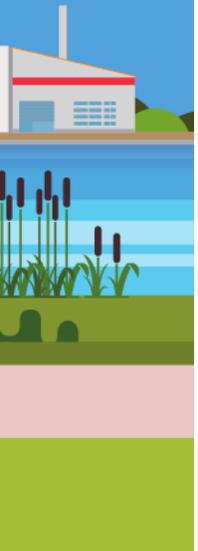




Construction  
de scénarios



Peut-on utiliser les  
immersions de  
sédiments dragués par  
les ports afin de recréer  
un “physiotope”  
optimum?



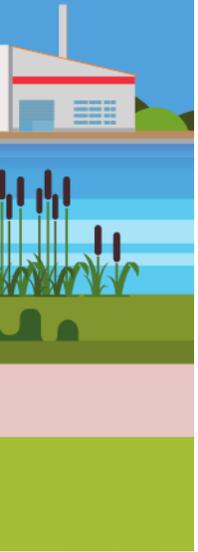


Construction  
de scénarios



Facteurs de forçages  
naturels et anthropiques  
(ex. bathy, sédiment,  
gestion des dragages)

Définition et  
modélisation de  
scénarios de gestion  
alternative des  
sédiments (à comparer  
au scénario tendanciel)



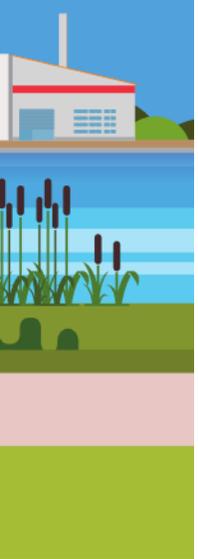
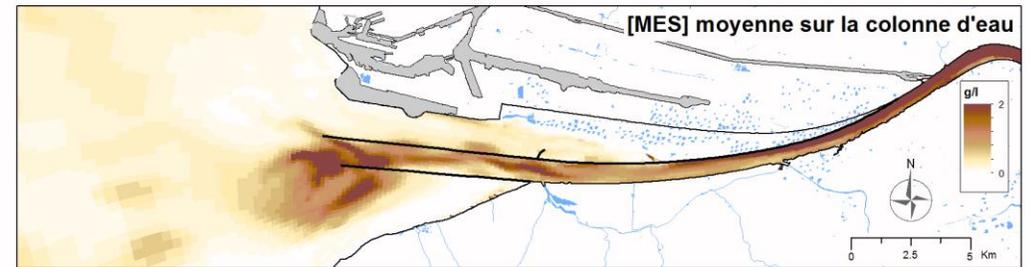
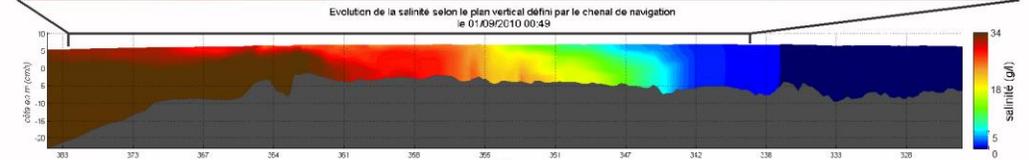
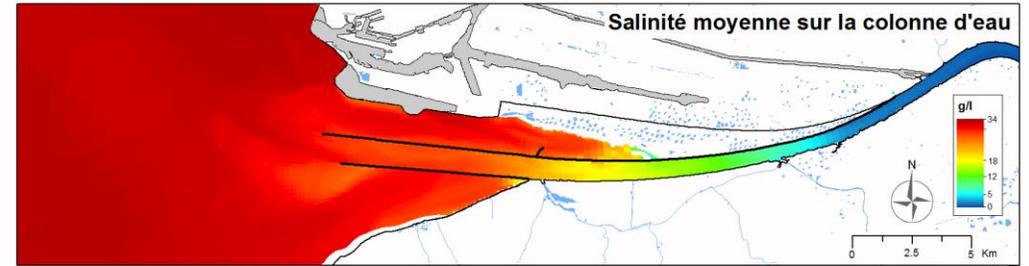


≠ Scénarios



Facteurs de forçages  
naturels et anthropiques  
(ex. bathy, sédiment,  
gestion des dragages)

Simulations  
MARS3D



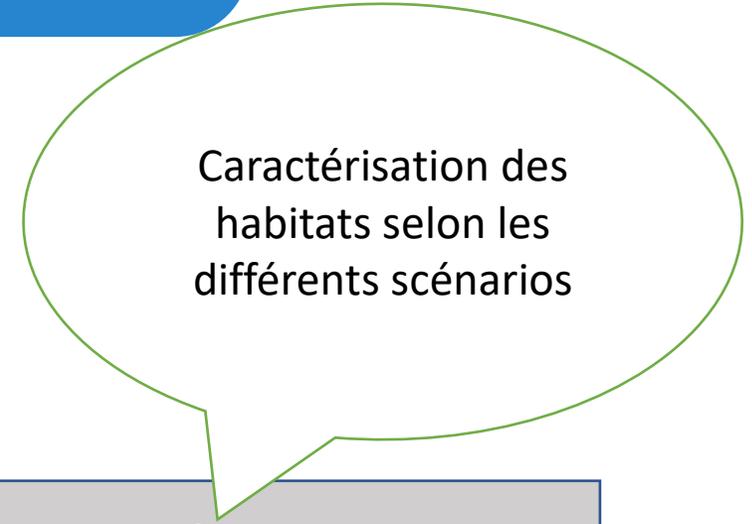


≠ Scénarios



Facteurs de forçages  
naturels et anthropiques  
(ex. bathy, sédiment,  
gestion des dragages)

Simulations  
MARS3D



Caractérisation des  
habitats selon les  
différents scénarios

### Physiotope pélagique :

*Hauteur d'eau  
Vitesse de courant (3D)  
Vagues (Tp, Hs)  
Turbulence  
Salinité / Température  
Concentration en MES*

### Physiotope benthique :

*Profondeur  
Contraintes de cisaillement (vagues, courants)  
Dynamisme sédimentaire (intensité dépôts/érosion)  
Nature du faciès sédimentaire (granulométrie, consolidation)*



≠ Scénarios



Facteurs de forçages  
naturels et anthropiques  
(ex. bathy, sédiment,  
gestion des dragages)

Simulations  
MARS3D



Comparaison des  
habitats favorables à la  
fonction nourricière...

## Physiotope pélagique :

*Hauteur d'eau*  
*Vitesse de courant (3D)*  
*Vagues (Tp, Hs)*  
*Turbulence*  
*Salinité / Température*  
*Concentration en MES*

## Physiotope benthique :

***Profondeur***  
*Contraintes de cisaillement (vagues, courants)*  
*Dynamisme sédimentaire (intensité dépôts/érosion)*  
***Nature du faciès sédimentaire*** (granulométrie, consolidation)



≠ Scénarios



Facteurs de forçage  
(ex. bathy, sédiment)

Simulations  
MARS3D



Carte Habitats  
+ Temp, salinité...

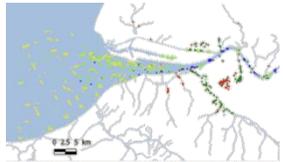


# Les Species Distribution Models (SDM)

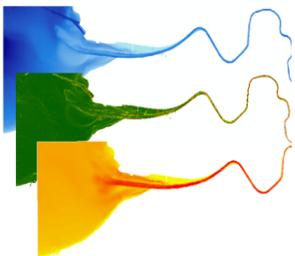
- Objectifs : Extrapoler la distribution des espèces dans le temps et l'espace, grâce à des approches statistiques

- Création de

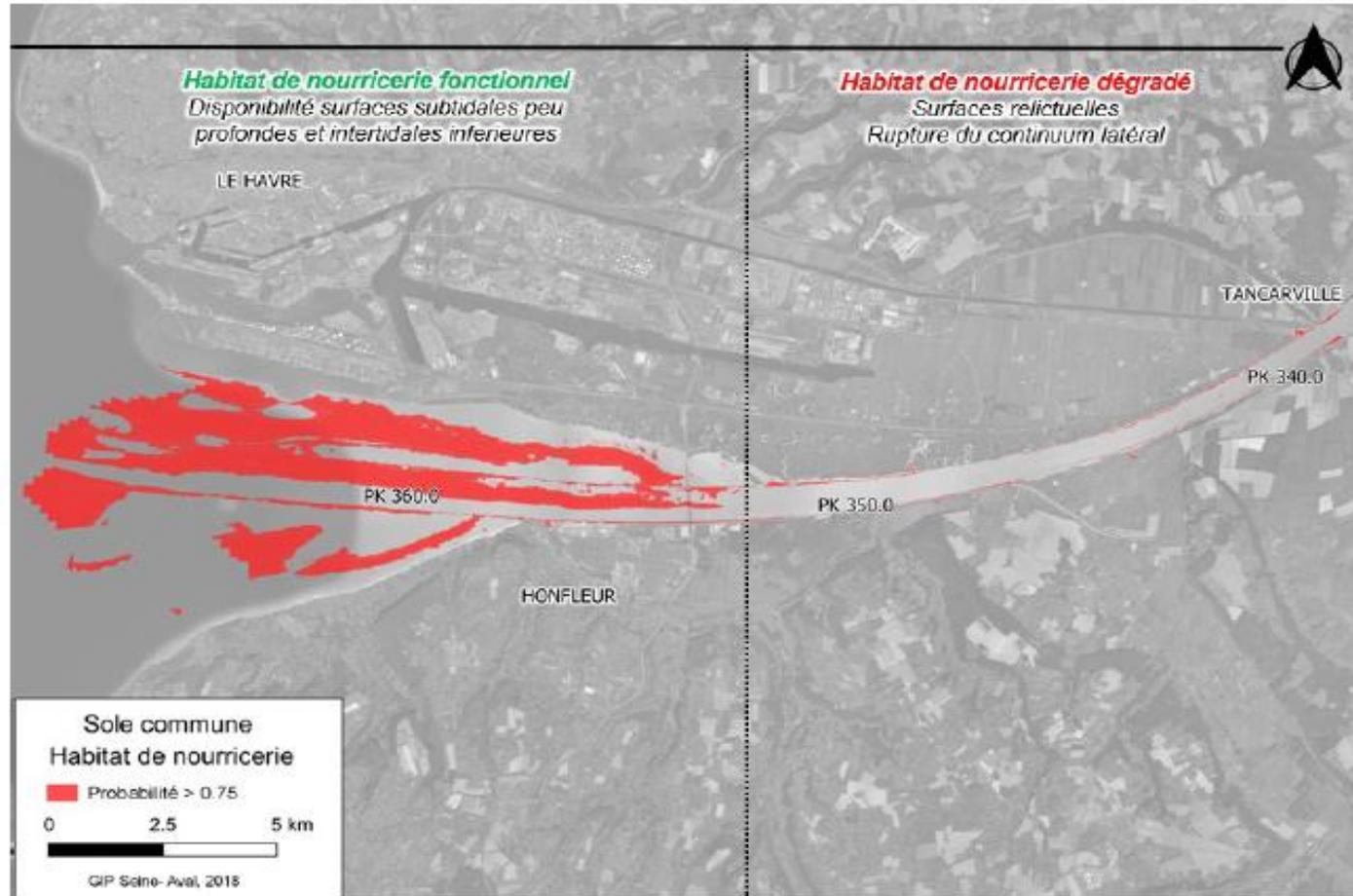
- Création
- Support des espèces



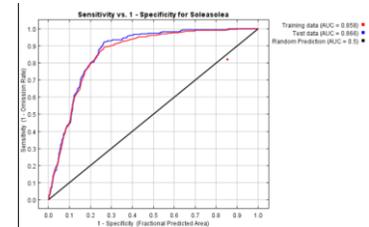
Observations



Descripteurs environnementaux



risque de colonisation par



des facteurs déterminant la distribution



# Exemple | Etape 2 – le volet écologique



≠ Scénarios



Facteurs de forçage  
(ex. bathy, sédiment)

Simulations  
MARS3D

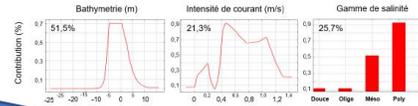
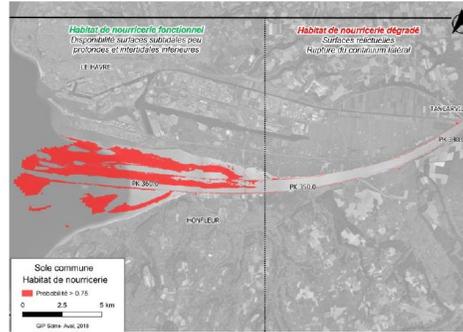


Carte Habitats  
+ Temp, salinité...

Indicateurs HMS

SIG-HF  
Ou analogie

$$\frac{\text{Surf Hx}}{\text{Surf H0}} \%$$



SDM

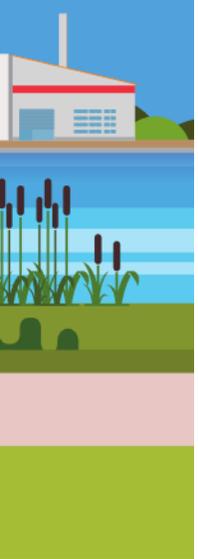


SDM



Carte distribution  
zooplancton

Carte distribution  
Macrofaune benthique



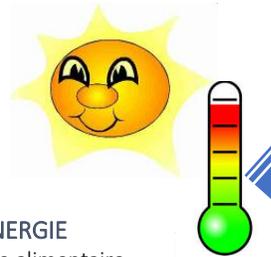
## Objectifs

- ❑ Prendre en compte de façon explicite les mécanismes/processus à l'échelle individuelle
- ❑ Lier directement facteurs de l'environnement et processus écologiques
  - Modèles d'allocation d'énergie (ex. DEB, Koojman 2000) | Cycle de vie, croissance et maturité (+ bioacc Mounier et al. 2020, tox, *Projet SA6-CHOPIN*)

FORCAGES

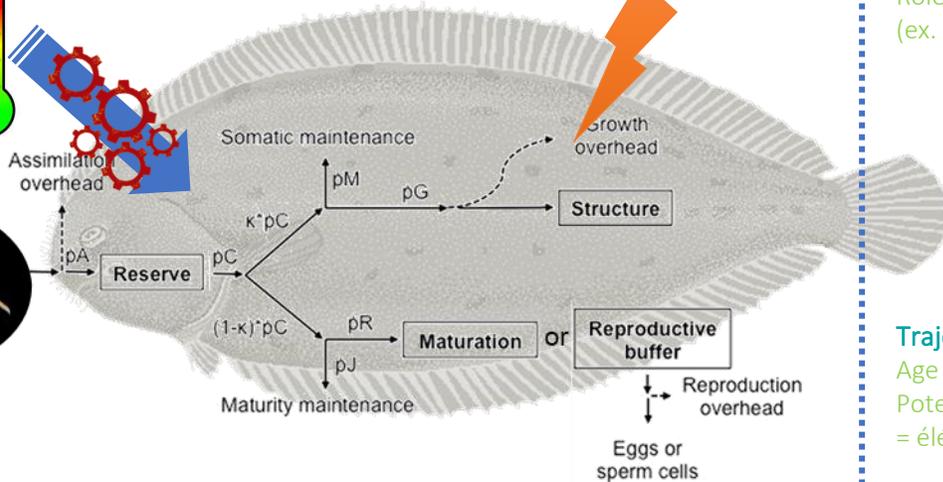
**ALLOCATION de l'ENERGIE** (aux différentes fonctions métaboliques)  
 La température régit les flux d'acquisition et d'allocation d'énergie au sein de l'individu  
 Elle conditionne la valeur de nombreux paramètres (de flux) du modèle

**ACQUISITION de l'ENERGIE**  
 Composition du régime alimentaire  
 Quantité de proies  
 Valeur énergétique des proies



Proies

**STRESS environnementaux** (voire anthropiques)  
 Ils peuvent modifier l'allocation d'énergie en augmentant certains coûts énergétiques  
 Ils modulent la valeur de certains paramètres de coût du modèle



MODELE

Représentation schématique de l'allocation d'énergie au sein d'un individu vue par la théorie DEB

Les paramètres du modèle sont l'expression du phénotype d'un individu.

SORTIES

### Trajectoires de CROISSANCE

Croissance = f(env., habitat)  
 Rôle, fonctionnalité des habitats (ex. nourricerie)

Éléments de caractérisation de la nourricerie

### Trajectoires de MATURATION

Age et taille à la maturité  
 Potentiel de reproduction = élément de la Fitness

# Exemple | Etape 2 – le volet écologique

Contribution Seine à la dynamique du stock



≠ Scénarios



Facteurs de forçage  
(ex. bathy, sédiment)

Simulations  
MARS3D

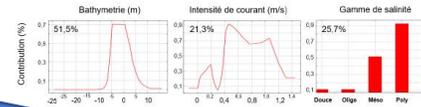
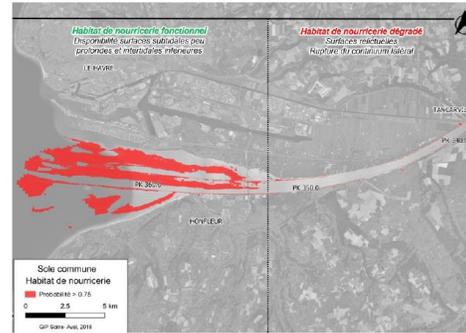


Carte Habitats  
+ Temp, salinité...

Indicateurs HMS

SIG-HF  
Ou analogie

$$\frac{Surf\ Hx}{Surf\ H0} \%$$



SDM



SDM



Carte distribution  
zooplancton

Carte distribution  
Macrofaune benthique

Δ Biomasse Féconde  
Δ captures

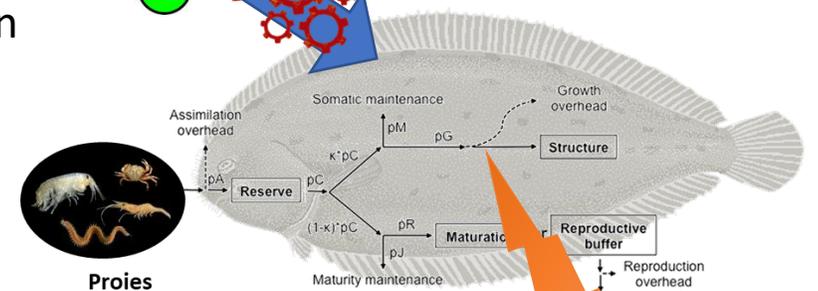
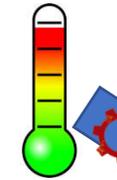


Modèle  
Dyn Pop

Carte du potentiel de nurserie

Potentiel de  
croissance, maturité

Evolution du potentiel de croissance et de  
maturité sous différents scénarios  
environnementaux

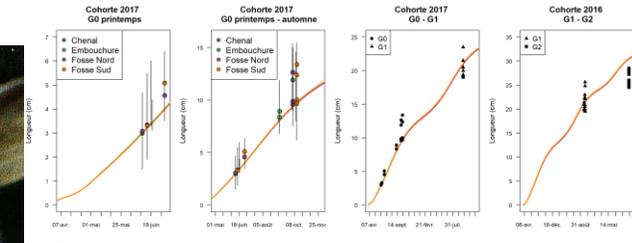
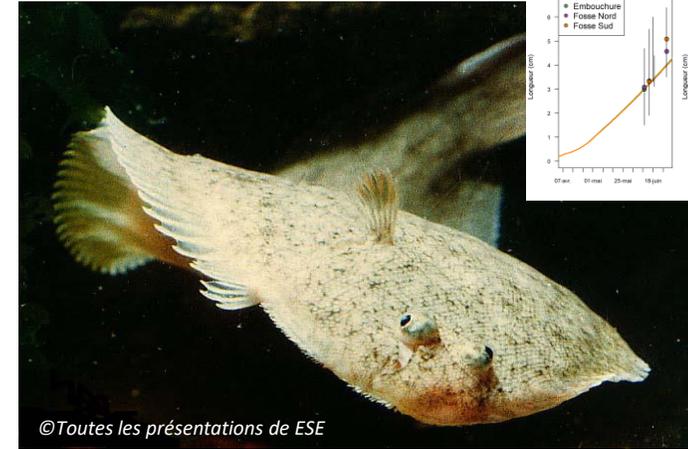


Proies

Autres facteurs de stress  
environnemental ?



- Fonction de nurricerie ?
  - Espèce modèle (ex. la sole, autres ?)
  - Processus indicateurs
    - ✓ Ex. Croissance, Maturité, Mortalité

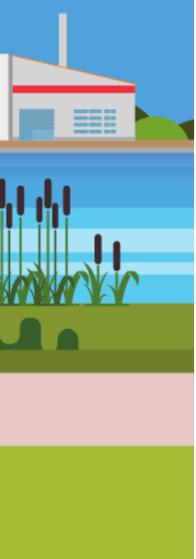


Rapport SA6-CHOPIN

- Facteurs limitants
  - Surface habitats favorables →
  - Ressources trophiques (capacité d'accueil)
  - Contaminants/qualité de l'eau

Peut on utiliser les matériaux issus des dragages pour restaurer/ recréer des habitats favorables aux nurricerie ? Quelles évolutions/sensibilités de ces habitats au SLR?

*scénarios en lien avec des mesures d'adaptation au SLR type zone d'expansion des crues/ recréation d'habitats latéraux (tels que mises en œuvre sur l'Escaut).*





## CONCLUSION

Limites, perspectives, discussion

- Echelle spatiale

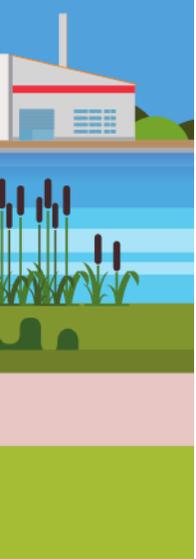
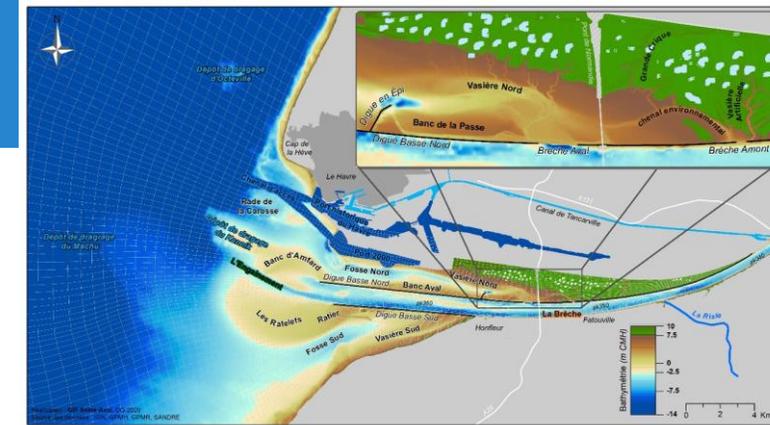
- Actuellement les modèles\* ne permettent pas de tester les effets et la durabilité de mesures de restauration localisées (ex. reconnexion habitats latéraux)

- Echelle temporelle

- Les modèles sont validés sur des échelles de temps de l'ordre de 10 ans au-delà les incertitudes augmentent ...

- Données d'entrées et processus pris en compte

- Incertitudes fortes sur la nature des fonds "en profondeur" → incertitudes sur les évolutions morphosédimentaires simulées
- Pour les études des habitats latéraux, des filandres les apports de la nappes ne sont pas pris en compte
- Les scénarios sur le CC et ses effets sont incertains ( ex. caractéristiques des tempêtes / apports solides à l'estuaire)

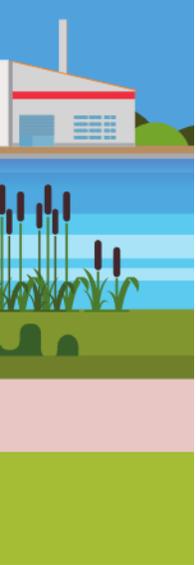


## Prédictions en écologie (Maris et al. 2018, OIKOS)

- ❑ Contrairement à ce que le mouvement actuel en faveur d'une écologie prédictive (enfin!), on prédit depuis longtemps en écologie
  - Prédiction corroboration (ex. prédictions vs observations dans un modèle stat) vs Prédiction anticipatives (ex. scénarios du GIEC)
- ❑ Prédiction anticipatives
  - Pas de théorie général unifiée : Ecology is a 'soft' science, to suffer 'physics envy'" (McIntosh 1986)

## Quelques points de progrès (Maris et al. 2018, OIKOS)

- ❑ Echelles spatiales, temporelles ... et biologiques
  - Cellule (biomarqueurs) > individu > population
  - Vers communauté et réseau trophique ?
- ❑ Autant d'approches que d'espèces ?
- ❑ Mortalités
  - On sait calibrer un paramètre dans une équation
  - Mais difficile de paramétrer/calibrer un processus
  - Adaptation/évolution (dépend des espèces ; *E. Affinis*, Flet, Sole)
- ❑ Réseaux trophiques
  - Possibilité de construire des modèles de réseaux trophiques en combinant de manière indirectes différentes approches en réflexion



- Intégrer les connaissances/outils les plus récents
  - Ex. Résultats présentés ce matin
- Préciser les données/outils/méthodes mobilisables (Seine-Aval +bibliographie)
  - pour définir, construire, simuler et analyser les scénarios
- Co-construire (CS/CT) des scénarios prenant en compte les problématiques des gestionnaires dans les futures études
  - Préservation/restauration de l'estuaire ...
    - Quantifier les objectifs de restauration
  - Evolution des conditions de submersions et augmentation des risques avec le CC et recherche de solutions d'atténuation durables
  - ...

Ce n'est pas parce qu'on ne sait pas tout qu'on ne peut rien dire



*Merci de votre attention*

