

Modèle

Hydro-Sédimentaire et de Qualité des eaux  
de l'Estuaire de la Loire

HySQL - Structuration et premiers résultats

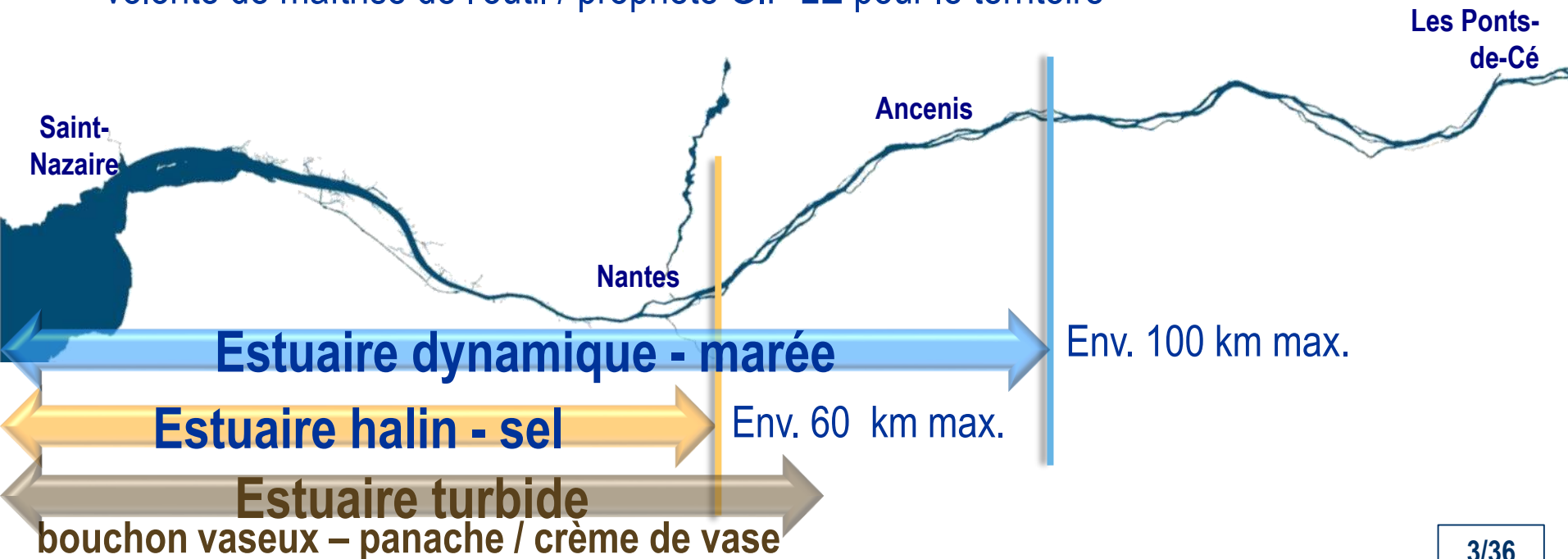
Kristell LE BOT, GIP Loire Estuaire

## Modèle **Hydro-Sédimentaire** et de **Qualité** des eaux de l'**Estuaire** de la **Loire** - HySQEL

- Contexte / objectifs
- Emprise / structure générale
- Construction : maillage, forçages, processus modélisés
- Rejeu étiage 2019
- Bilan de masse 2017-2018 avec dragages
- Modèle oxygène dissous - structuration - 1ers résultats
- Mobilisations en cours et en perspective



- Succession de 3 modélisations hydro-sédimentaires 2D/3D depuis près de 30 ans  
projets d'amélioration du fonctionnement hydro-sédimentaires de la Loire et de son  
estuaire ➡ repousser en aval le **sel** et la **vase** (remontées liées à 2 siècles d'aménagement)
- Mise à niveau technologique (modèle 3DHS 2009-2012 développé pour le GIP LE)
- Besoin de modélisation pour différents projets –  
volonté de maîtrise de l'outil / propriété GIP LE pour le territoire



## Objectifs - depuis 2021 :

- affiner la représentation de la dynamique estuarienne hydrosédimentaire à l'échelle de l'estuaire ;
- affiner la représentation des dragages d'entretien et les immersions (clapages) à la Lambarde / activité portuaire - maintien profondeur d'eau - Composante sédimentaire ;
- représenter l'oxygénation des eaux.



## Moyens :

- Prestation confiée au bureau d'études
- Prestation AMO, puis Contrat recherche et développement
- COmité d'EXperts – COMEX animation



## Système Open TELEMAC-MASCARET

couplages de TELEMAC-3D, TOMAWAC (houle), GAIA et  
TRANSPOR2004 1DV (gestion du sol), WAQTEL (qualité de l'eau)

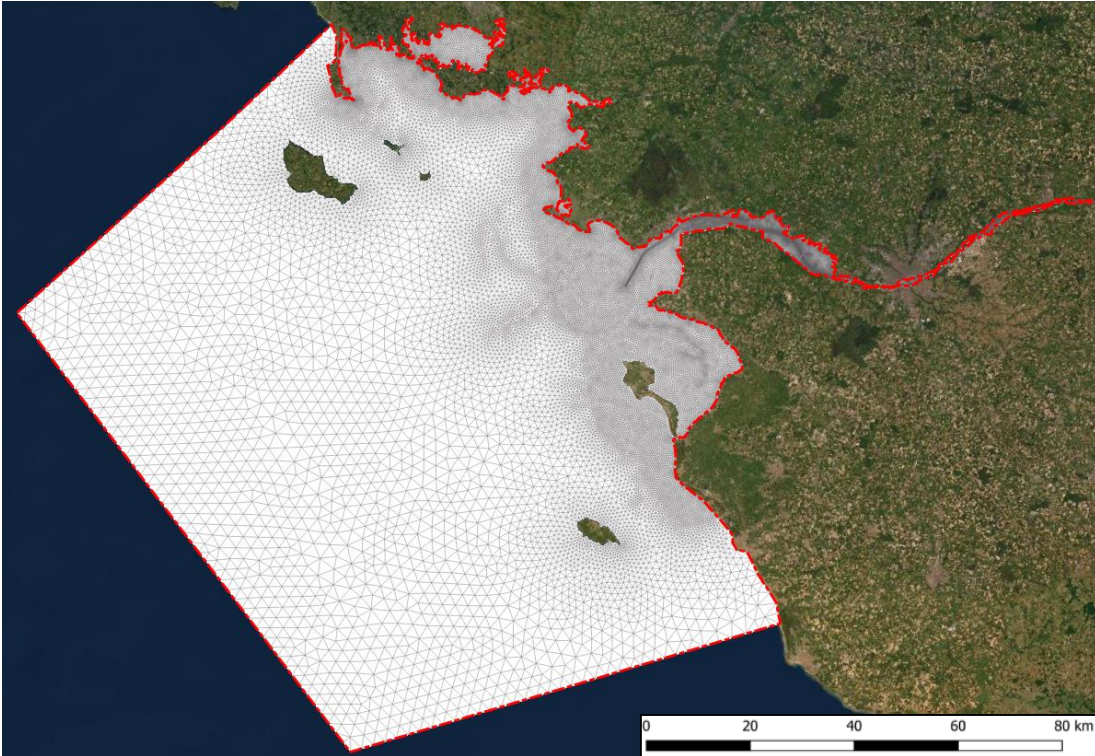


**Modèle  
2009-2012**

## Système Open TELEMAC-MASCARET

couplages de TELEMAC-3D, TOMAWAC (houle), GAIA et  
TRANSPOR2004 1DV (gestion du sol), WAQTEL (qualité de l'eau)

Depuis 2021



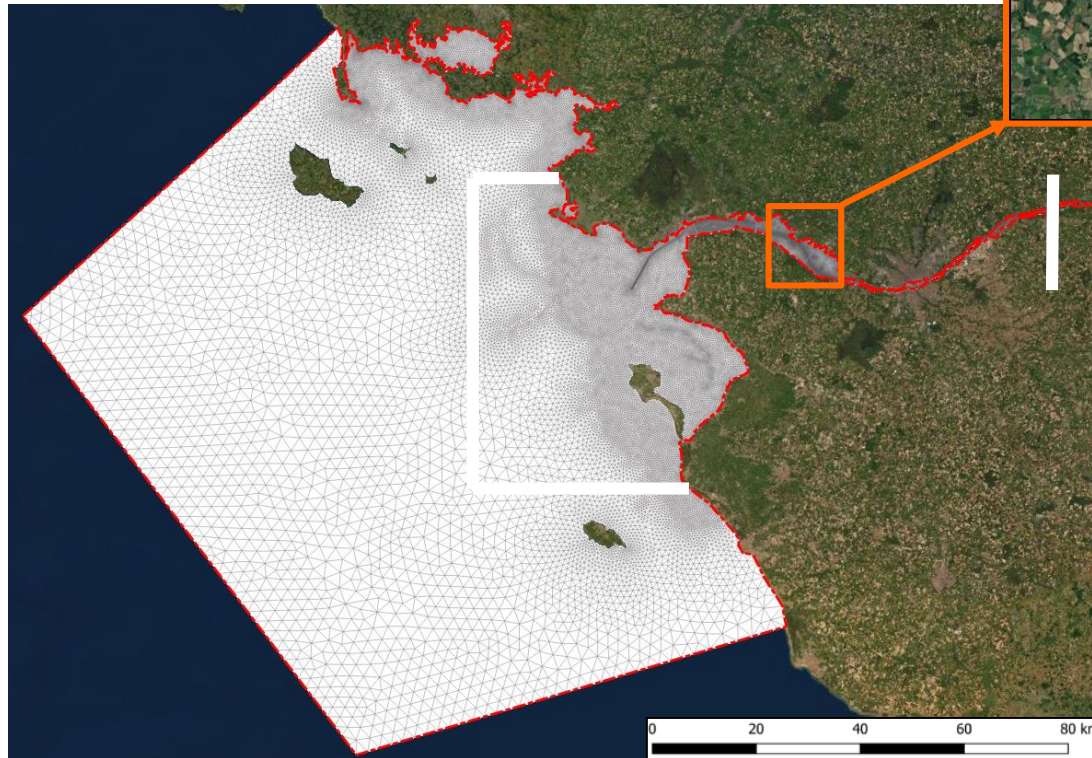
# Emprise du modèle HySQEL

## Système Open TELEMAC-MASCARET

couplages de TELEMAC-3D, TOMAWAC (houle), GAIA et  
TRANSPOR2004 1DV (gestion du sol), WAQTEL (qualité de l'eau)

Prise en compte des zones latérales  
submersibles par vives eaux

Emprise  
étendue côté  
maritime :  
environ 80 km  
de part et  
d'autre de  
l'embouchure

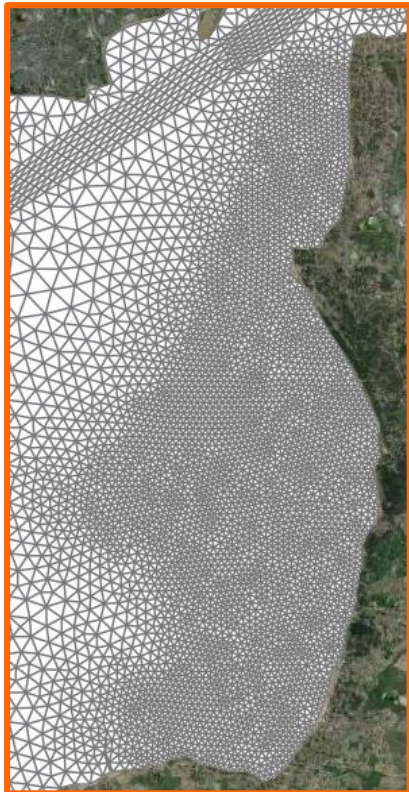


Emprise étendue  
amont Point  
Kilométrique - PK 99  
Saint-Florent-le-Vieil

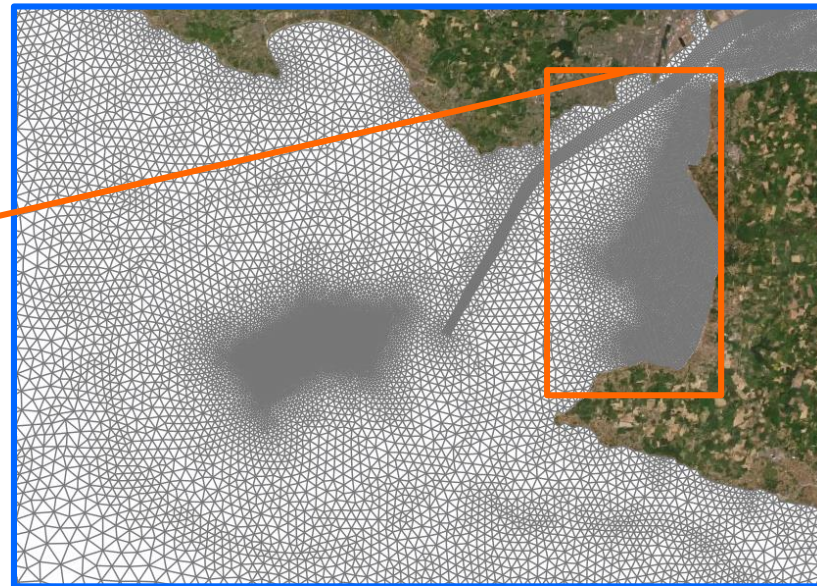
# Structure du modèle HySQEL

## Modèle Hydro-Sédimentaire et de Qualité des eaux de l'Estuaire de la Loire

- Modèle 3D raffiné estuaire externe avec dragages et immersions



- Modèle 3D local clapage Lambarde



- Modèle 3D global hydro-sédimentaire



- Modèle 3D d'oxygène dissous sur le modèle global



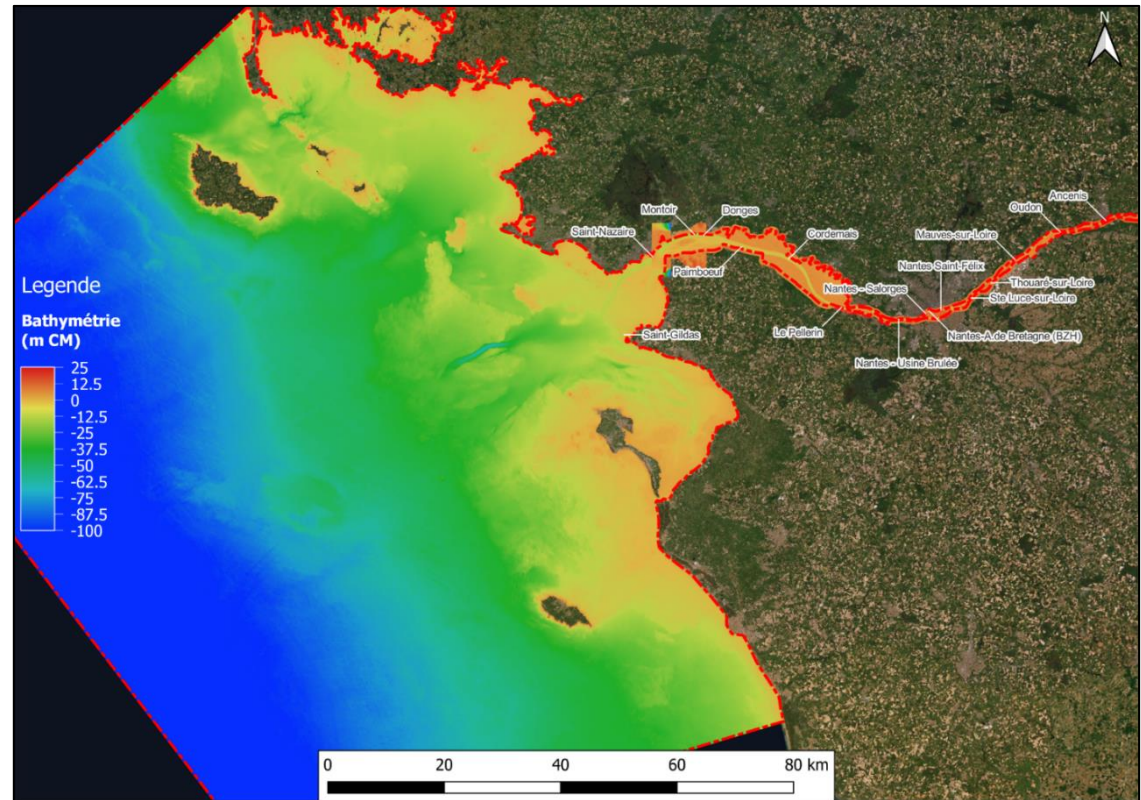
# Construction : maillage

- Calage des modèles grâce aux nombreuses campagnes d'acquisition depuis les années 2000
- Données du GIP LE et autres acteurs (pas d'acquisition spécifique - rare)
- Choix parmi les données

Modèle numérique de terrain unifié – MNTU composé de plusieurs bathymétries et de levés LIDAR

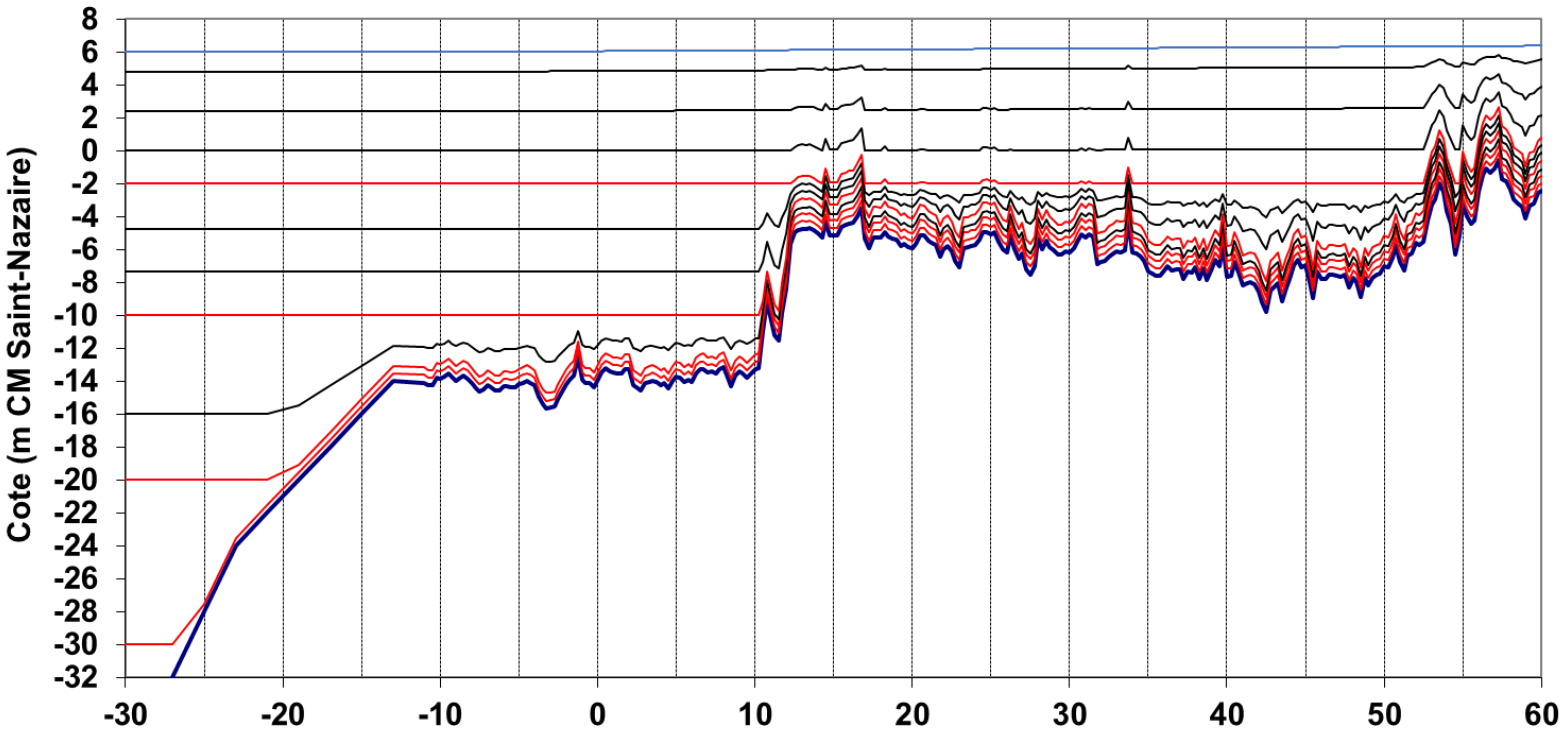
Le maillage « horizontal - 2D » ainsi constitué contient environ 55 000 nœuds (7000 modèle 2009-2012).

Sources données : bathymétrie de 2008/LIDAR de GIP LE 2008 et DPT 2019/ Bathymétrie et LIDAR VNF 2009/ GPMNSN2019-2021, HOMONIM 2015 - SHOM)



12 plans, dont des plans à cote fixe (en rouge)

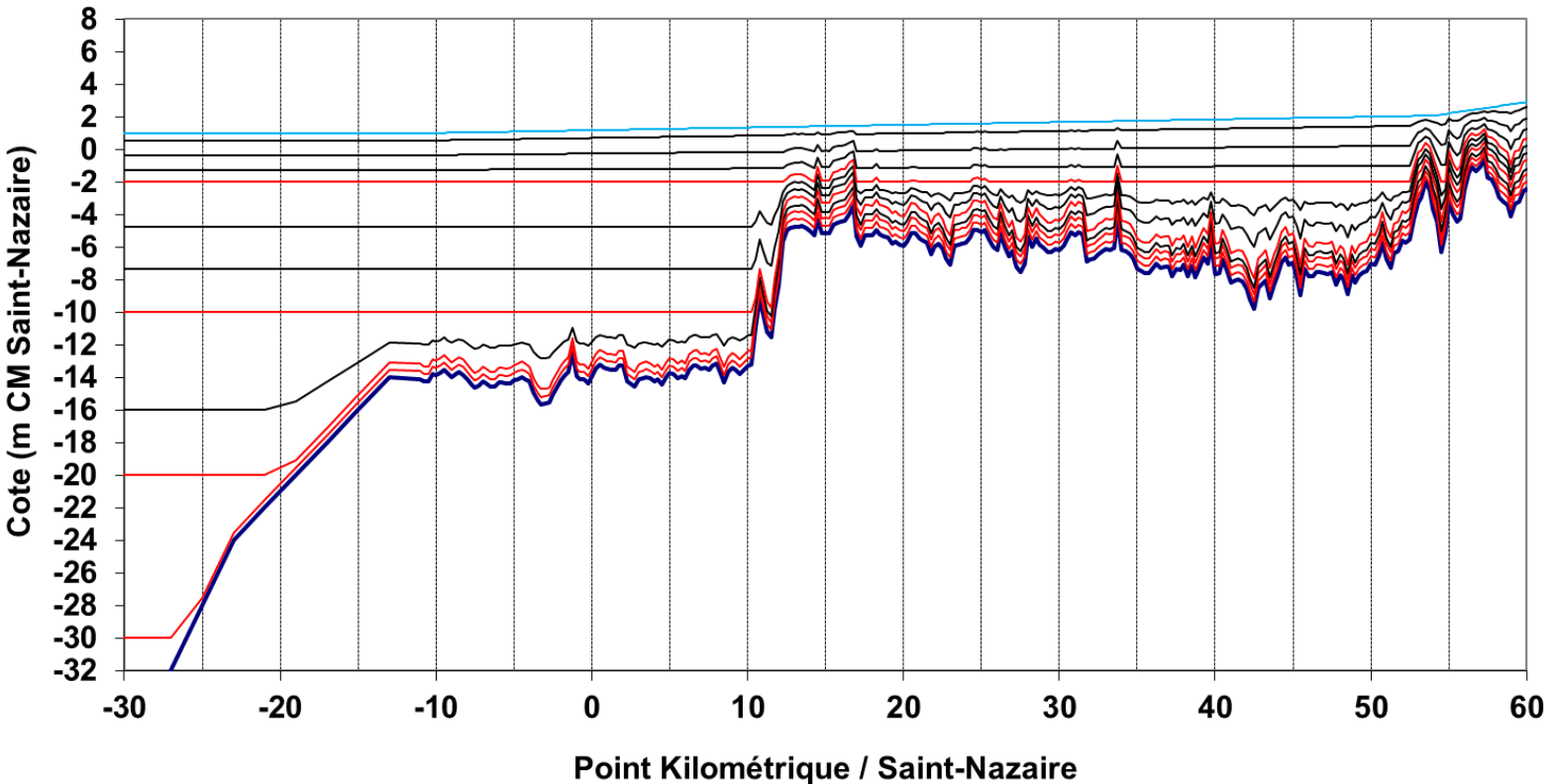
PLEINE  
MER



Point Kilométrique / Saint-Nazaire  
Coupe longitudinale dans le chenal de navigation

12 plans, dont des plans à cote fixe (en rouge)

**BASSE  
MER**

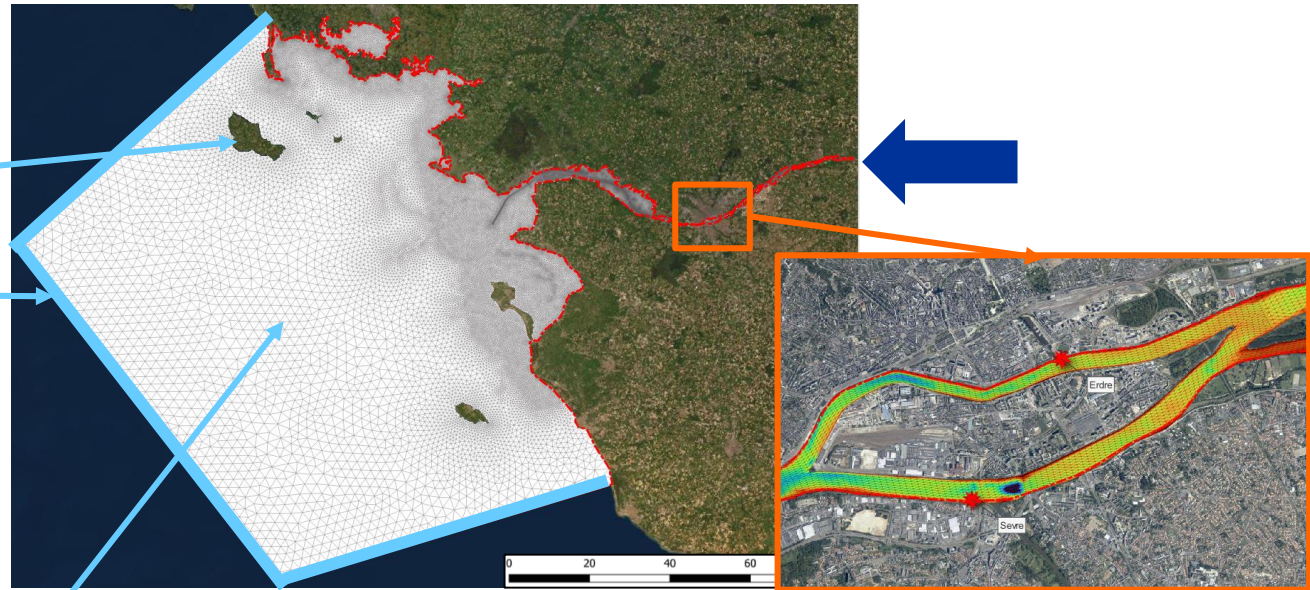


Coupe longitudinale dans le chenal de navigation

Maillage 3D ainsi finalisé comprend 655 000 nœuds de calcul  
2D: Toutes valeurs (d'entrée et de sortie) moyennées sur la verticale

# Construction du modèle HySQEL : Forçages

- Forçage au large par la **marée astronomique** → reconstitution d'un signal de marée **FES 2012** (Noveltis, Legos et CLS Space Oceanography Division et est distribué par Aviso, avec le soutien du CNES)
- Recomposition autour d'un **niveau moyen** tenant compte de la pression atmosphérique à Belle-Île (56)
- Propagation de la **houle** → le modèle est forcé en chaque point de sa frontière maritime par les résultats de modélisation **HOMERE** (Ifremer)
- Imposition des champs de **vent** horaire à la surface par le modèle **HOMERE** (Ifremer) (IOWAGA (ERC) pour 2021) ;



- Imposition des **débits** cumulés de la **Loire** à Montjean et de l'Evre sur la frontière amont du modèle (PK 99). Concentrations en MES issues d'une loi fonction du débit journalier et de sa variation des 5 derniers jours

- Injection des **débits** de l'Erdre et de la Sèvre N. par des points sources à la confluence avec la Loire (secteur de Nantes)

# Construction du modèle HySQL : Calage hydrodynamique – zones de frottement

## Lit mineur :

Frottement différent selon:

- la localisation fond « dur » (substrat)
- selon si présence de vase (position crème de vase/bouchon vaseux),

limites aval et amont  
de la crème de vase  
selon le débit

Position latérale de la  
crème de vase =>  
frottement différent dû à  
la vase

- fond du lit, altitude -  
définition d'une cote  
limite de crème de  
vase

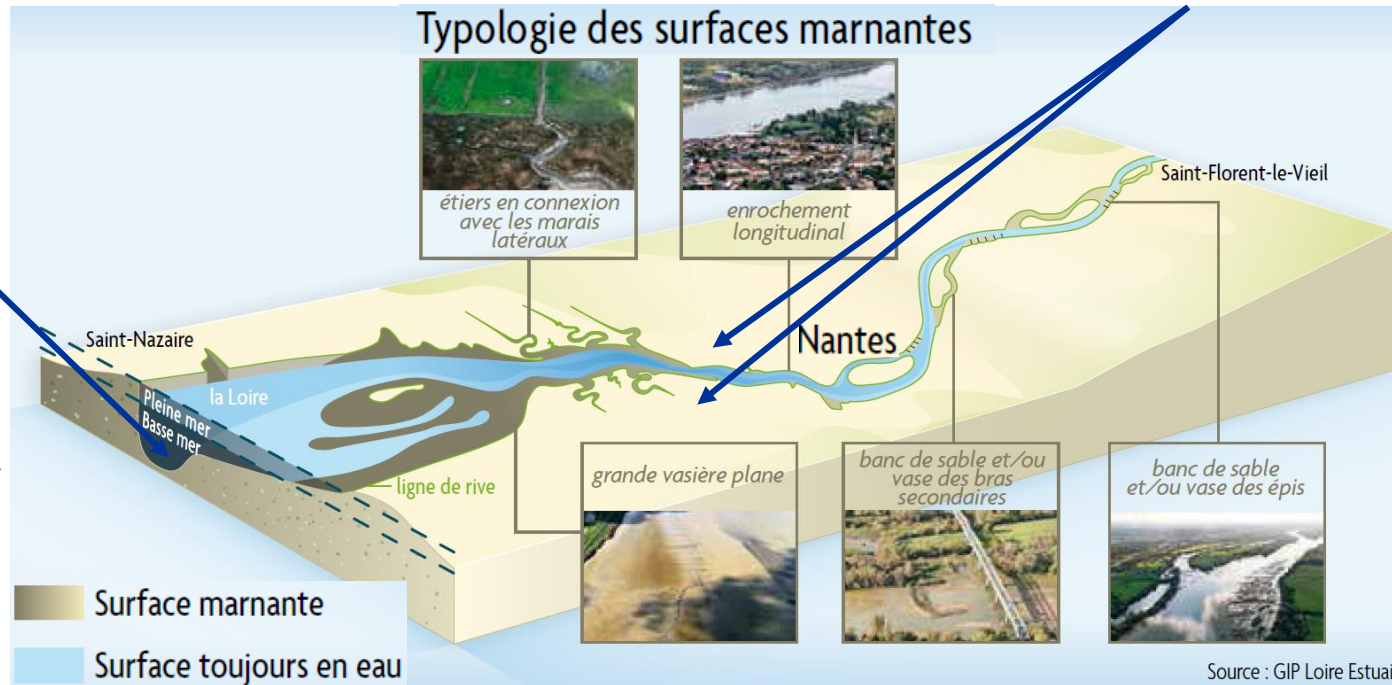
## Lit majeur :

Frottement différent sur les  
zones submersibles spécifique

Loire (hauteur de rugosité  
équivalente de Nikuradse) :

- Prairies
- Roselières
- Étiers (vaseux)

### Typologie des surfaces marnantes



Source : GIP Loire Estuaire

- surfaces marnantes – estrans vaseux entre -2 m CM  
et 5m CM, d'aval Bilho jusqu'à Nantes

# Construction du modèle HySQEL : Processus dans la colonne d'eau

- Actuellement modèle de transport de vase uniquement,  
mais qui tient compte du mélange sablo-vaseux

## Stratification verticale courants / salinité :

- mortes eaux (Coeff. 30-40)  
**ET** débit d'étiage ( $\leq 250 \text{ m}^3/\text{s}$ )  
ou crue
- modèle de turbulence 1D de longueur de mélange multicouches développé par ARTELIA (modèle 2009 – 2012)

## Vitesse de chute vases :

- avec prise en compte simplifiée de la floculation /défloculation - reliée de manière simplifiée à une vitesse moyenne de l'écoulement (modèle 2009 – 2012)
- adaptation de la loi pour les faibles concentrations : borne aval en estuaire externe et borne amont en eau douce

|   |                         |                           |  |                            |  |
|---|-------------------------|---------------------------|--|----------------------------|--|
| TELEMAC<br>-3D<br>Suspension /<br>convection /<br>diffusion | Eau<br>Salinité<br>Vase | Vases<br>Érosion    Dépôt |  | Sables<br>Érosion    Dépôt |  |
|   |                         |                           |  |                            |  |

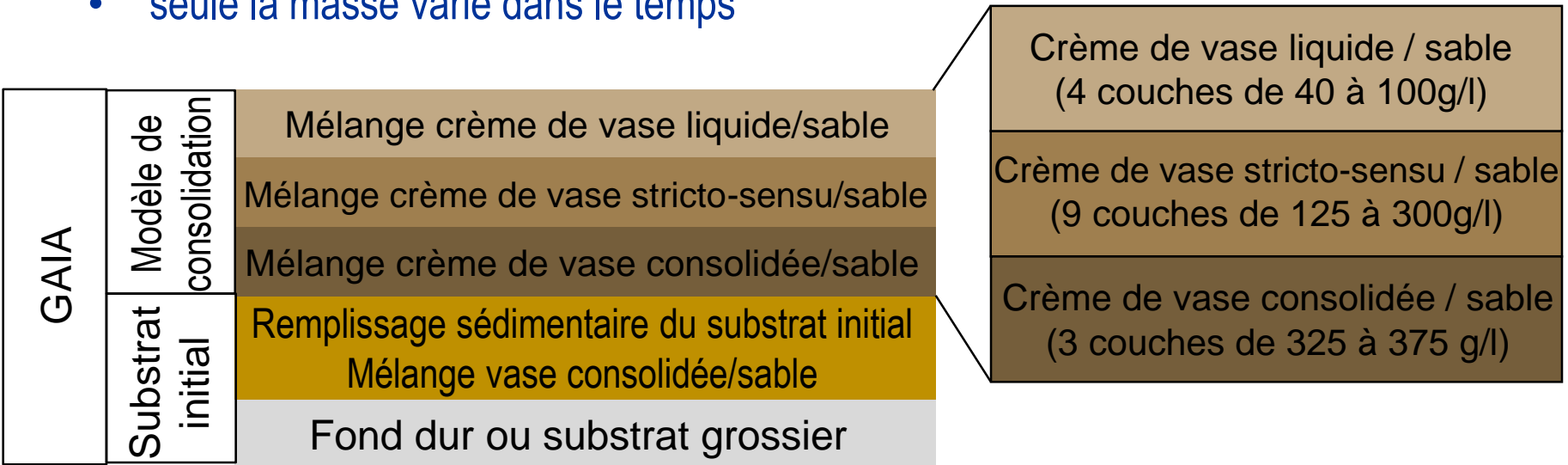
Sources données : Campagnes de 2000, mai et août 2008 par tube d'Owen en estuaire interne (GIP LE) et mesures Labsflocs (2011) au niveau de la Lambarde en mer (GPMNSN).

# Construction du modèle HySQEL : vase/sable, gestion du sol

## Chaque couche :

- représentative d'une concentration donnée et d'une contrainte critique associée (capacité à être érodée)
- seule la masse varie dans le temps

16 couches mélange sables-vases



### Flux d'érosion d'une vase :

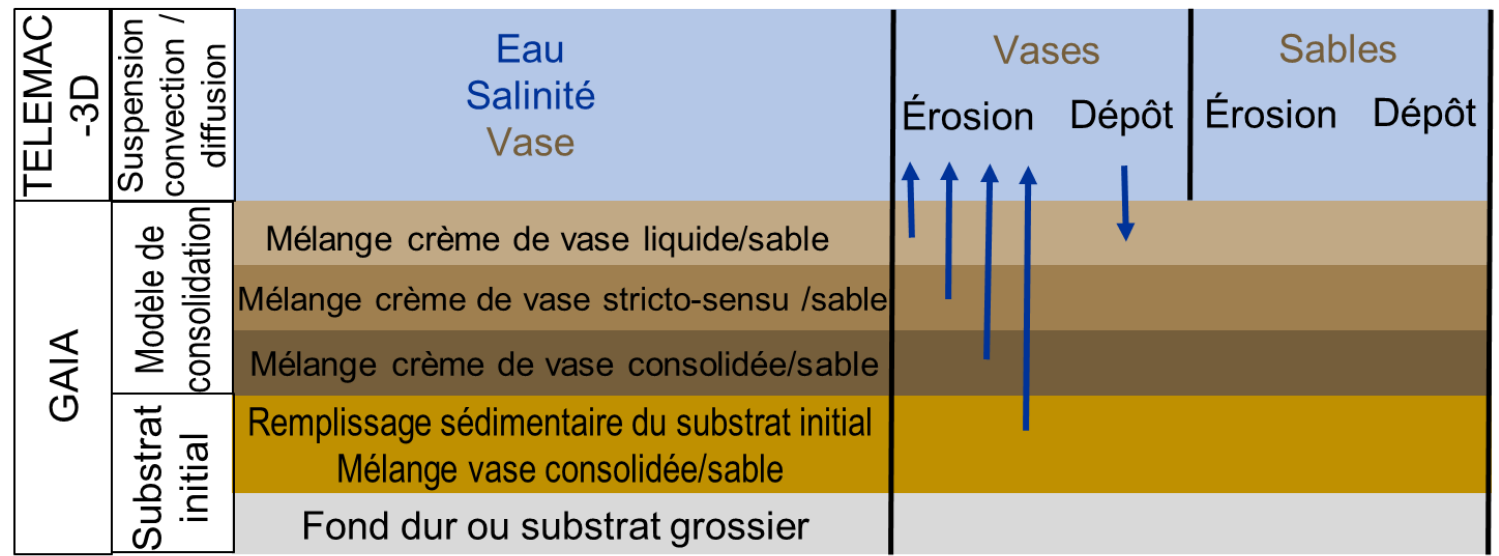
Sanchez M., Grimigni P et Delanoe Y., « Distribution des sédiments cohésifs en relation avec la vitesse de la phase solide dans l'estuaire de la Loire », VIII Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Compiègne 7 et 9 septembre 2004

### Taux d'érosion max:

Kranenburg C. & Winterwerp J.C., 1997. Erosion of fluid mud layers. I-entrainment model. J. Hydraul. Eng. 123(6) : 504-511

# Construction du modèle HySQEL : vase/sable, gestion du sol

- **Modèle de consolidation** : gestion du transfert des masses de sédiment entre les couches, au cours du temps ;
- 16 couches supérieures érodées en priorité avant la couche de remplissage sédimentaire du substrat initial ;
- dépôts de la matière en suspension toujours dans la couche supérieure.



Taux de transfert / modèle de consolidation des vases :

Source : Sanchez M., Grimigni P et Delanoe Y., « Distribution des sédiments cohésifs en relation avec la vitesse de la phase solide dans l'estuaire de la Loire », VIII Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Compiègne 7 et 9 septembre 2004

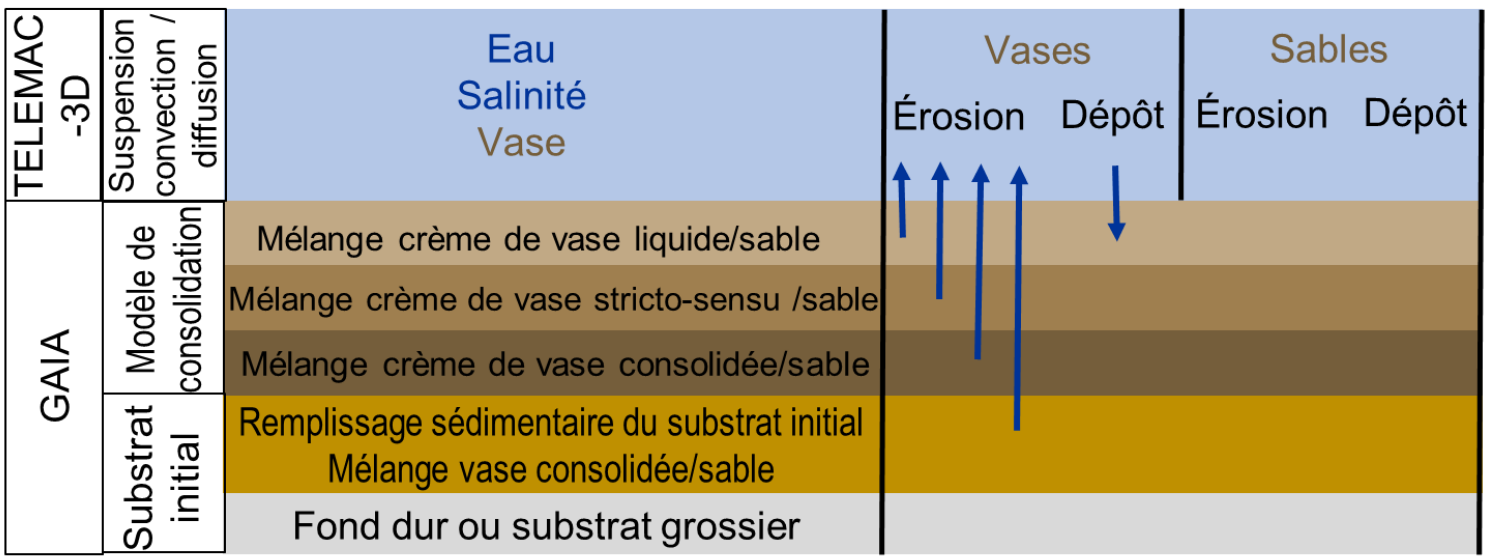
Flux d'érosion d'un mélange sable/vase:

Thèse de Benoît Waeles, 2005 qui a donné suite à la publication Le Hir P., F. Cayocca et B. Waeles, 2011



# Construction du modèle HySQEL : vase/sable, gestion du sol

- **Modèle 1DV TRANSPOR 2004 de Van Rijn : érosion du sable ;**



Taux de transfert / modèle de consolidation des vases :

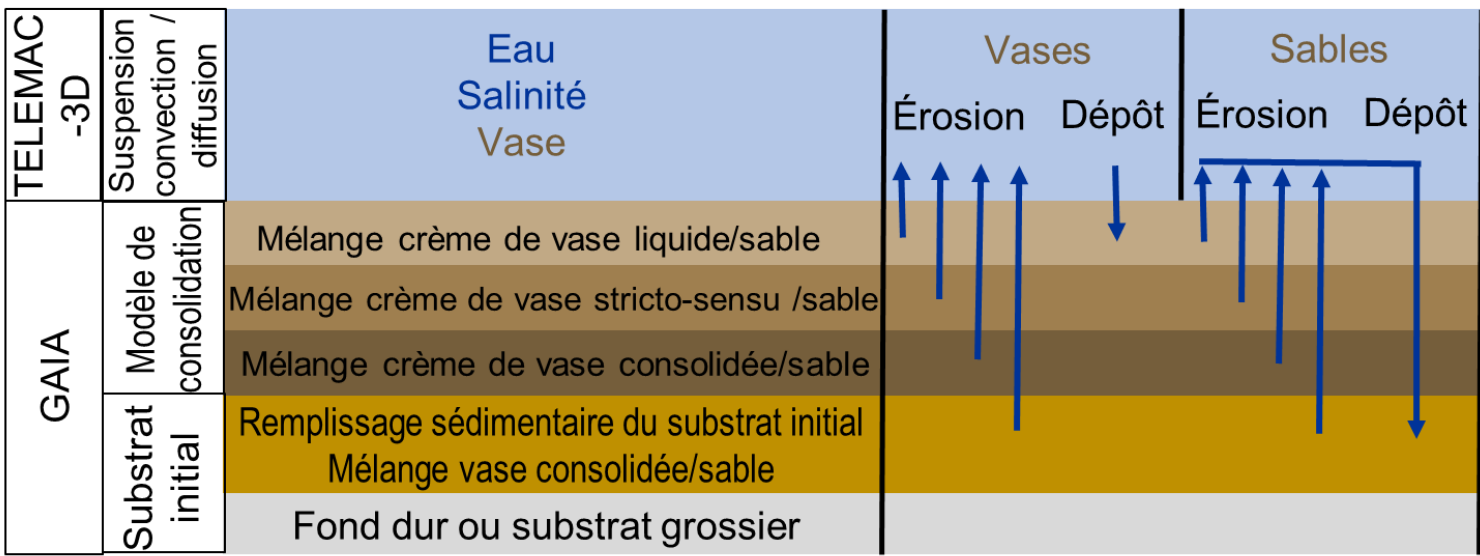
Source : Sanchez M., Grimigni P et Delanoe Y., « Distribution des sédiments cohésifs en relation avec la vitesse de la phase solide dans l'estuaire de la Loire », VIII Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Compiègne 7 et 9 septembre 2004

Flux d'érosion d'un mélange sable/vase:

Thèse de Benoît Waeles, 2005 qui a donné suite à la publication Le Hir P., F. Cayocca et B. Waeles, 2011

# Construction du modèle HySQEL : vase/sable, gestion du sol

- **Modèle 1DV TRANSPOR 2004 de Van Rijn** : érosion du sable ;
- sable érodé dans la couche active (pas transporté) directement remis dans le remplissage sédimentaire afin de conserver la masse.



Taux de transfert / modèle de consolidation des vases :

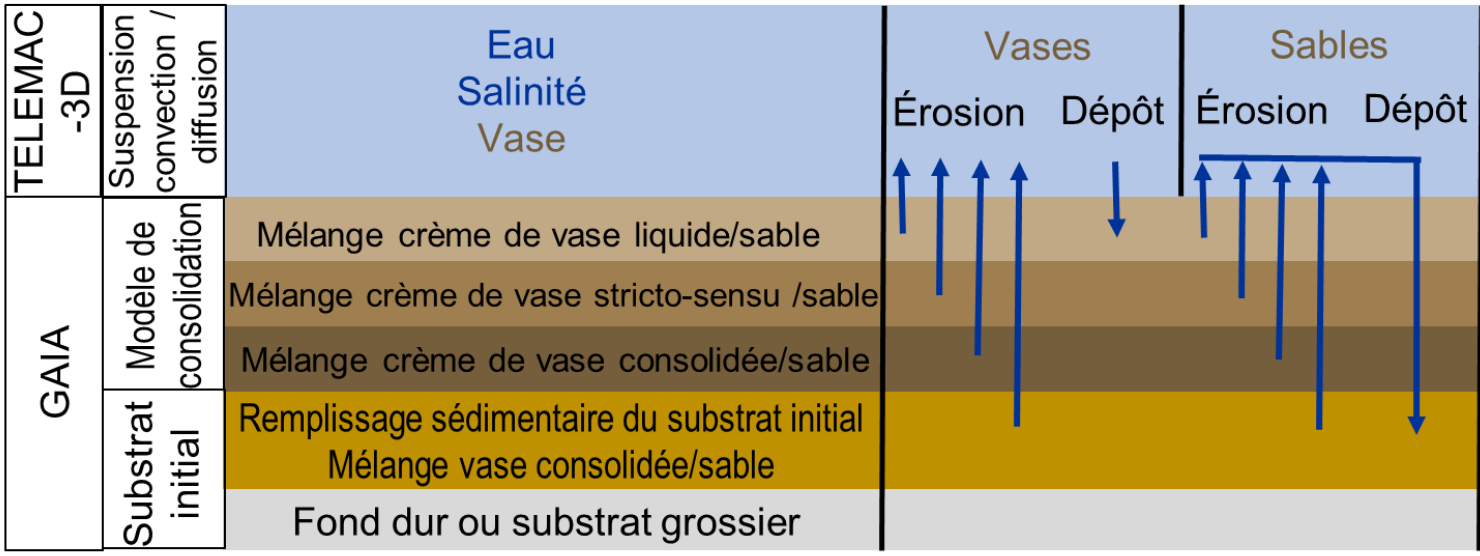
Source : Sanchez M., Grimigni P et Delanoe Y., « Distribution des sédiments cohésifs en relation avec la vitesse de la phase solide dans l'estuaire de la Loire », VIII Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Compiègne 7 et 9 septembre 2004

Flux d'érosion d'un mélange sable/vase:

Thèse de Benoît Waeles, 2005 qui a donné suite à la publication Le Hir P., F. Cayocca et B. Waeles, 2011

# Construction du modèle HySQEL : vase/sable, gestion du sol

- Modélisation du glissement de la crème de vase :**  
 Transfert des dépôts dans la couche de crème de vase liquide (40 à 100g/l) dans le sens de la pente la plus forte dès lors qu'une pente critique est dépassée = **2,5%**  
 (Source : observations Port de Saint-Nazaire)



Taux de transfert / modèle de consolidation des vases :  
 Source : Sanchez M., Grimigni P et Delanoe Y., « Distribution des sédiments cohésifs en relation avec la vitesse de la phase solide dans l'estuaire de la Loire », VIII Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Compiègne 7 et 9 septembre 2004

Flux d'érosion d'un sable: Le transport solide sableux est estimé par le modèle 1DV Transpor 2004 de Van Rijn.

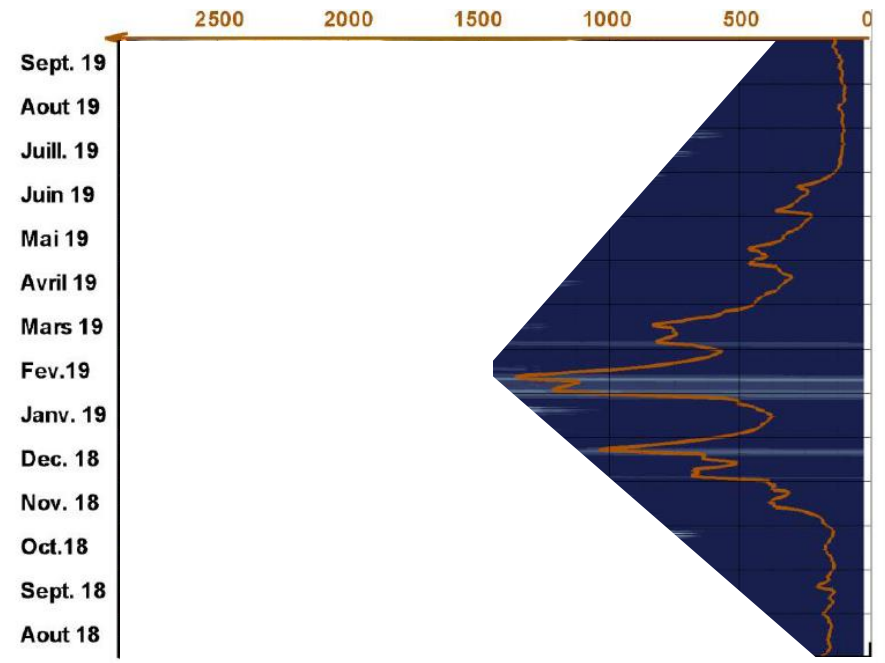
Flux d'érosion d'un mélange sable/vase:  
 Thèse de Benoît Waeles, 2005 qui a donné suite à la publication Le Hir P., F. Cayocca et B. Waeles, 2011

# Rejeu année hydrologique 2018-2019 – dynamique de la MES - estuaire interne

Rencontre autour de la Loire  
de la Maine à la mer  
Nantes, le 05 décembre 2023



Débit (m<sup>3</sup>/s) de la Loire à Montjean-sur-Loire + Èvre



# Rejeu année hydrologique 2018-2019 – dynamique de la MES - estuaire interne

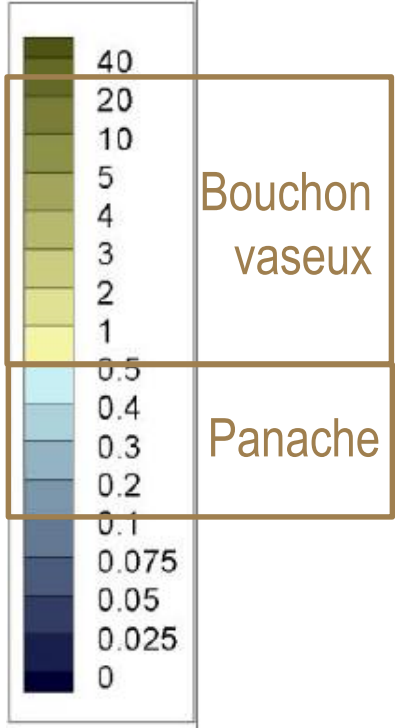
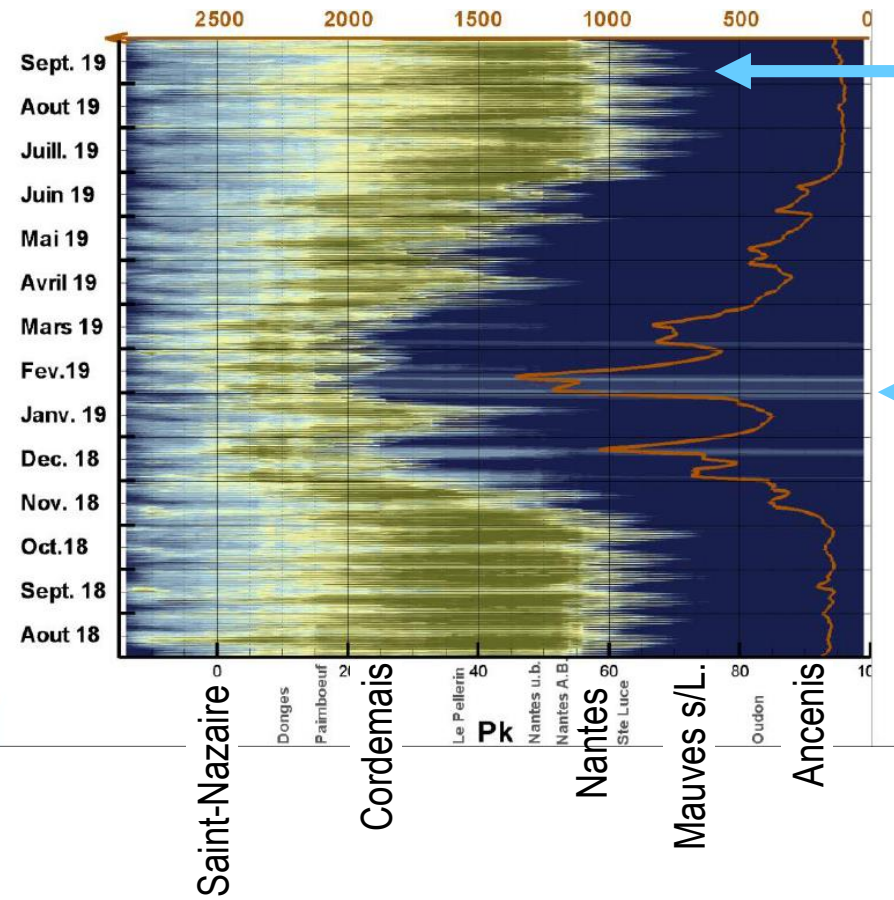
Rencontre autour de la Loire  
de la Maine à la mer  
Nantes, le 05 décembre 2023



## FOND - MES moyenne

MES – Matières en suspension (g/l)

Débit (m<sup>3</sup>/s) de la Loire à Montjean-sur-Loire + Èvre



# Rejeu année hydrologique 2018-2019 – dynamique de la MES - estuaire interne

Rencontre autour de la Loire  
de la Maine à la mer  
Nantes, le 05 décembre 2023



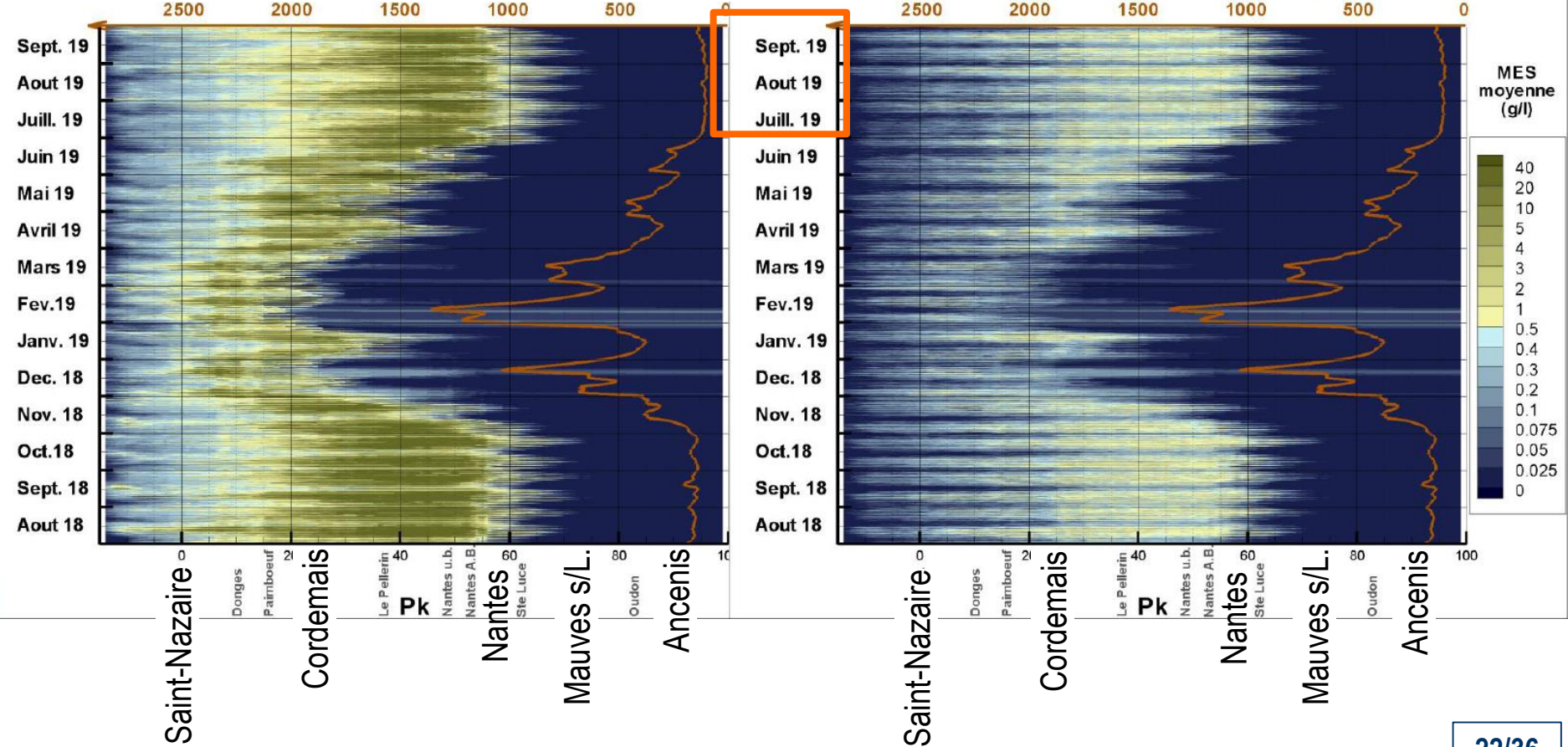
- Concentrations en MES plus élevées au fond qu'en surface

FOND - MES moyenne

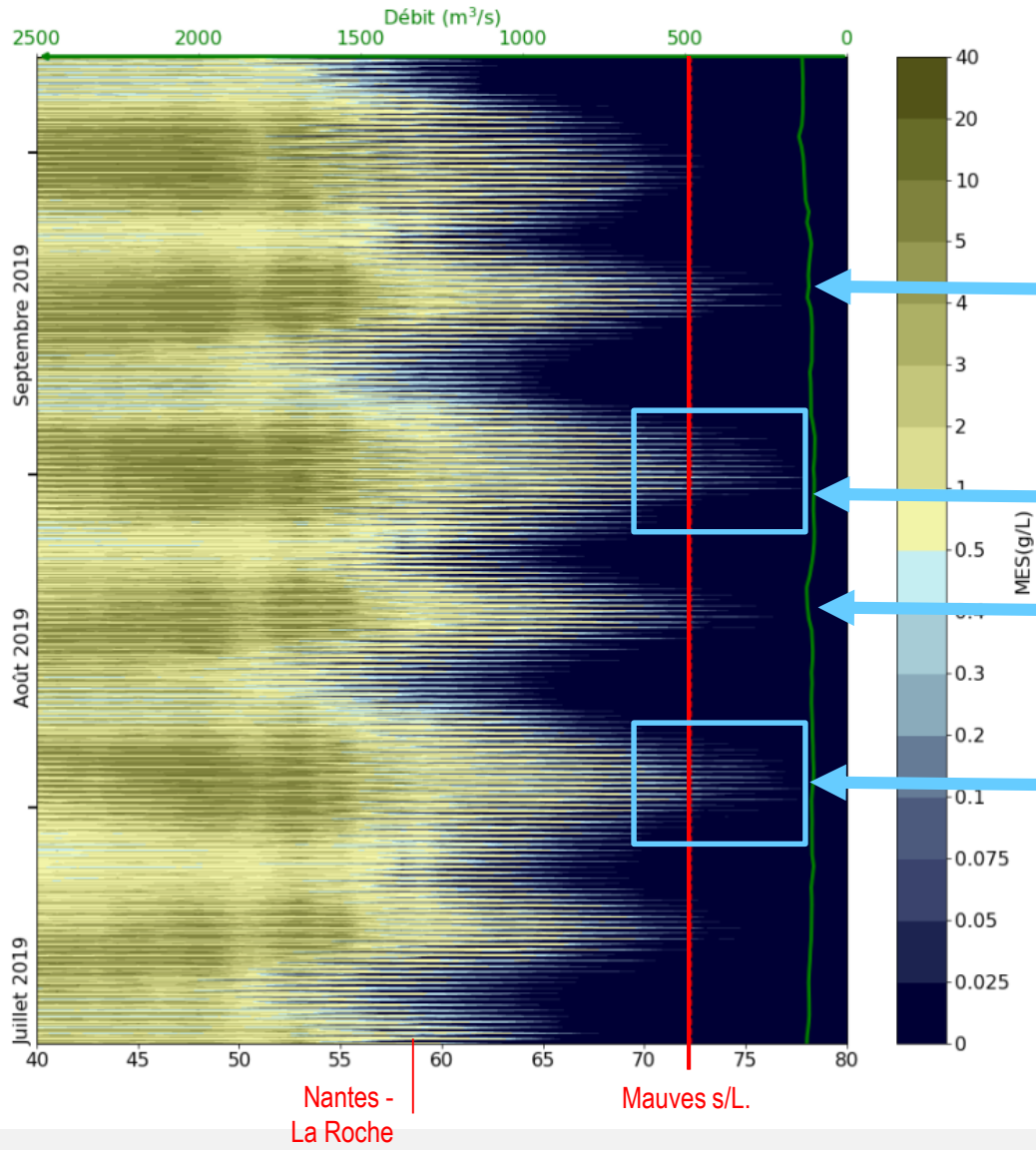
SURFACE - MES moyenne

Débit (m<sup>3</sup>/s) de la Loire à Montjean-sur-Loire + Èvre

Débit (m<sup>3</sup>/s) de la Loire à Montjean-sur-Loire + Èvre



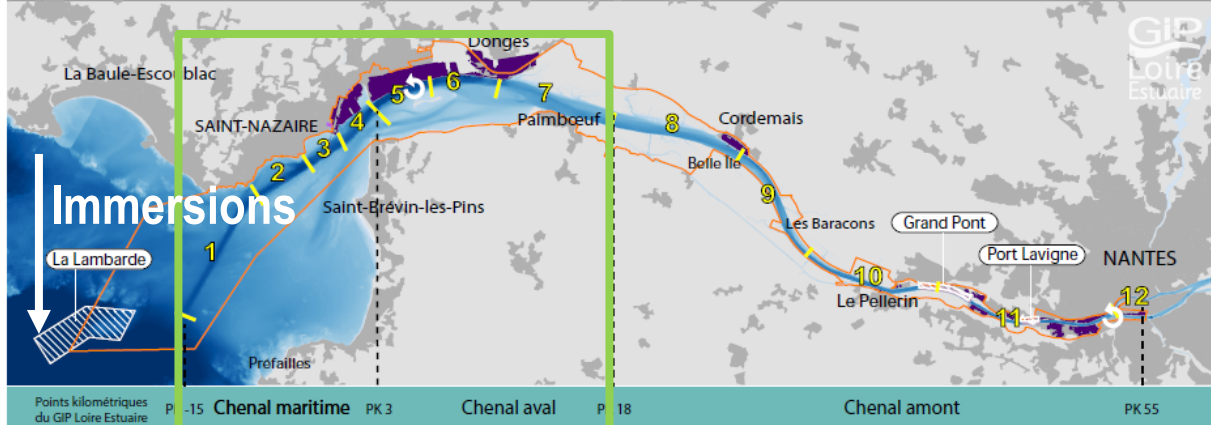
# Rejeu étiage 2019 – Position amont du bouchon vaseux



- Calcul de référence : simulation hydrosédimentaire sur l'étiage réel de 2019, débit variable (en moyenne  $115 m^3/s$ )
- Présence du bouchon vaseux faiblement concentré, lors des périodes de vives eaux (VE) et davantage encore lors de deux périodes des plus fortes VE, accentuant la remontée du bouchon vaseux avec un débit aussi faible (coeff. 01-04/08 max. 104 ; 30/08 03/09 max. 113 ; 28/09 – 02/10 max. 116)
- Trois simulations sur cette même période : débit amont constant à  $110 m^3/s$ ,  $90 m^3/s$ ,  $80 m^3/s$

# Modélisation des dragages d'entretien

➤ 3 types de dragages pour entretenir le chenal de navigation, les accès et installations portuaires :

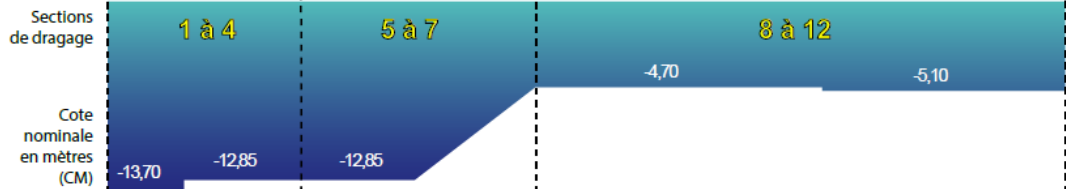


- Zones urbanisées
- Sites industrialio-portuaires
- Limite de circonscription de NSNP
- Limites de sections de dragage
- Zones de clapage autorisées
- Zones d'évitage

0 4 8 km

Sources : NSNP/ GIP Loire Estuaire

99% des dragages exportés



Chenal de navigation

Principales zones d'intervention des dragues depuis 2006



DAM Samuel de Champlain

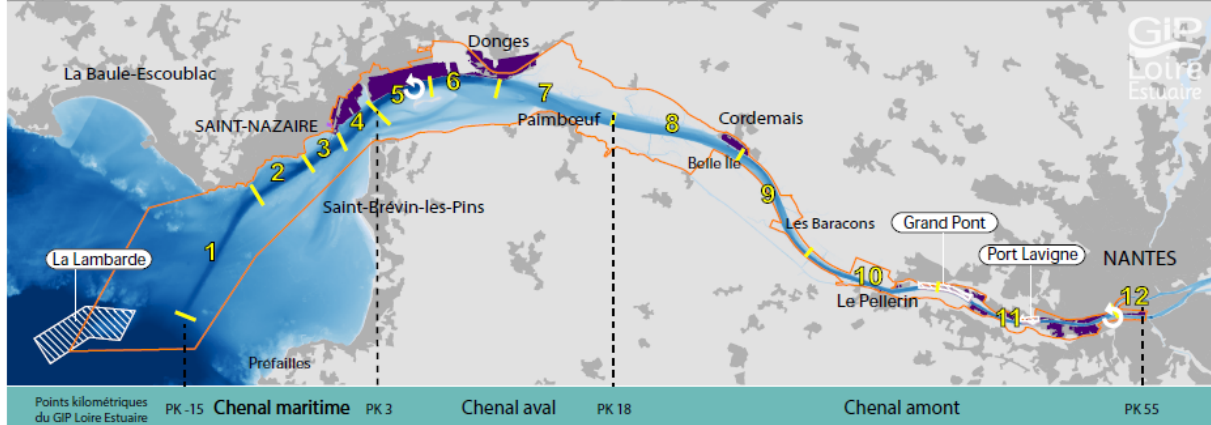


# Modélisation des dragages d'entretien

Rencontre autour de la Loire  
de la Maine à la mer  
Nantes, le 05 décembre 2023



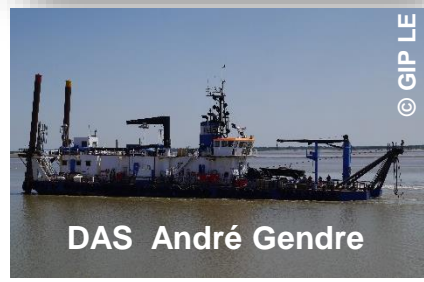
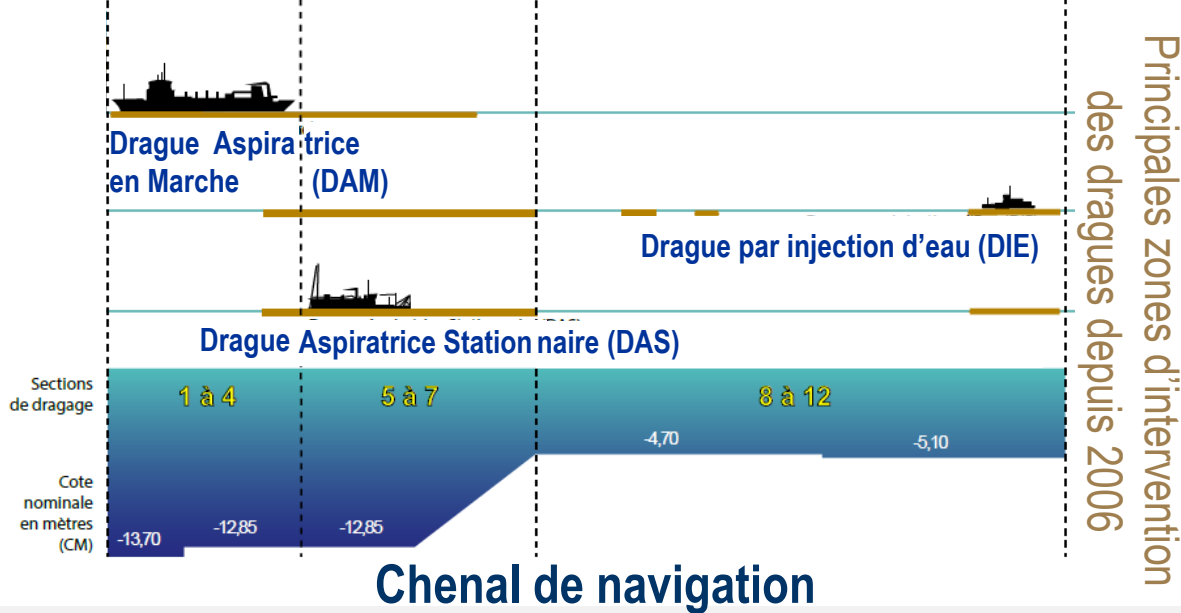
➤ 3 types de dragages pour entretenir le chenal de navigation, les accès et installations portuaires :



- Zones urbanisées
- Sites industrialo-portuaires
- Limite de circonscription de NSNP
- Limites de sections de dragage
- Zones de clapage autorisées
- Zones d'évitage

0 4 8 km

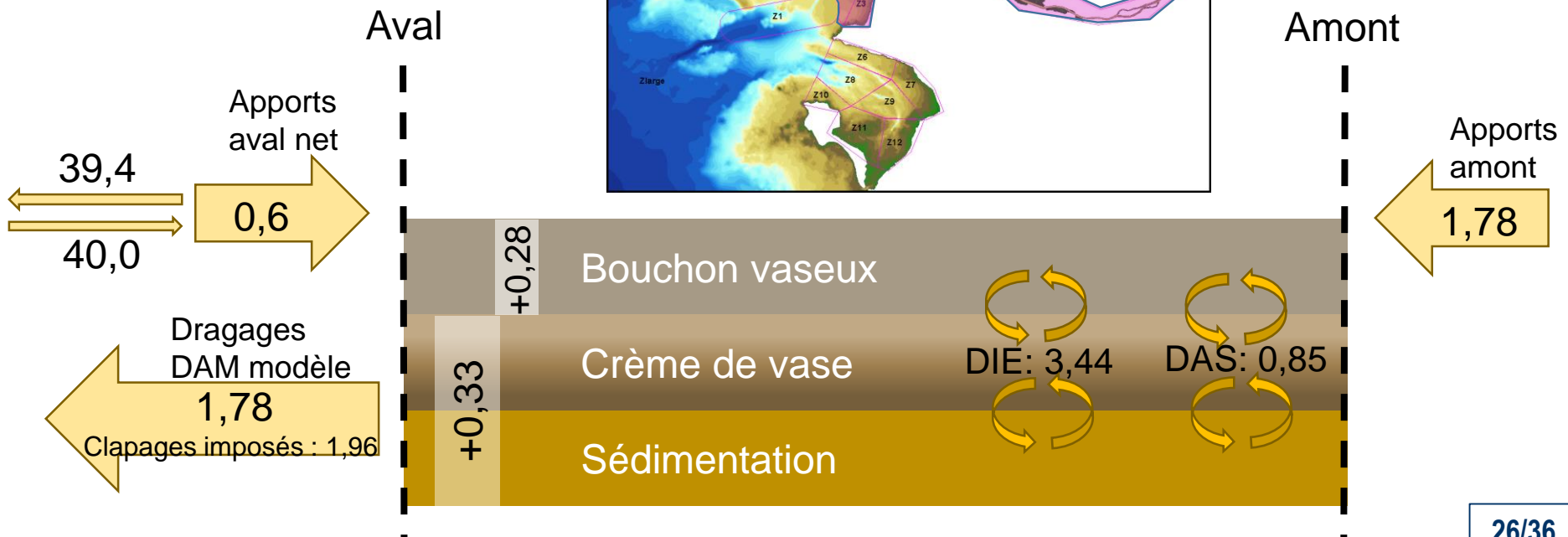
Sources : NSNP/ GIP Loire Estuaire



# Bilan de masse 2017-2018 avec dragages

- Analyse sédimentaire / approche du bilan sédimentaire améliorée - progrès par rapport au modèle 2009-2012 (l'estuaire reconstitue son bouchon vaseux après la crue)

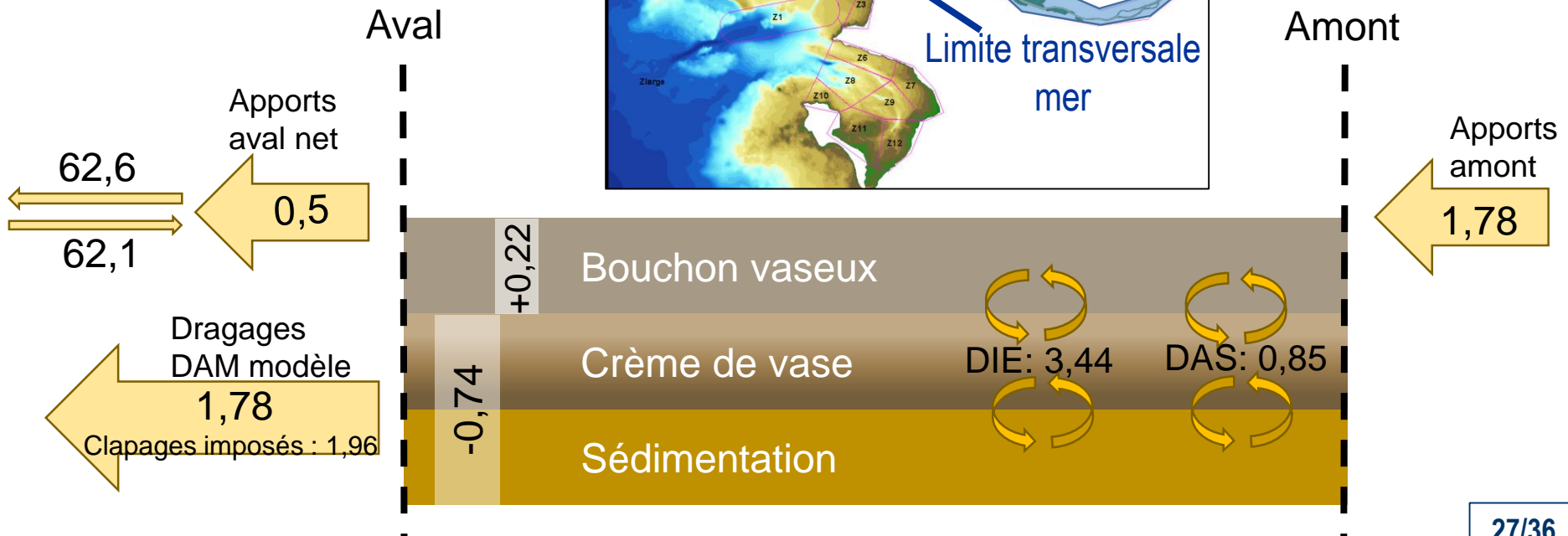
## Bilan annuel 01/10/2017 à 01/10/2018



# Bilan de masse 2017-2018 avec dragages

- Importance de l'emprise d'analyse / conditions d'initialisation
- Traduction des conditions hydrologiques / météorologiques de l'année retenue -  
**Attention particulière à l'historique des débits**
- Pas un bilan universel - Intérêt de renouveler sur l'année 2021

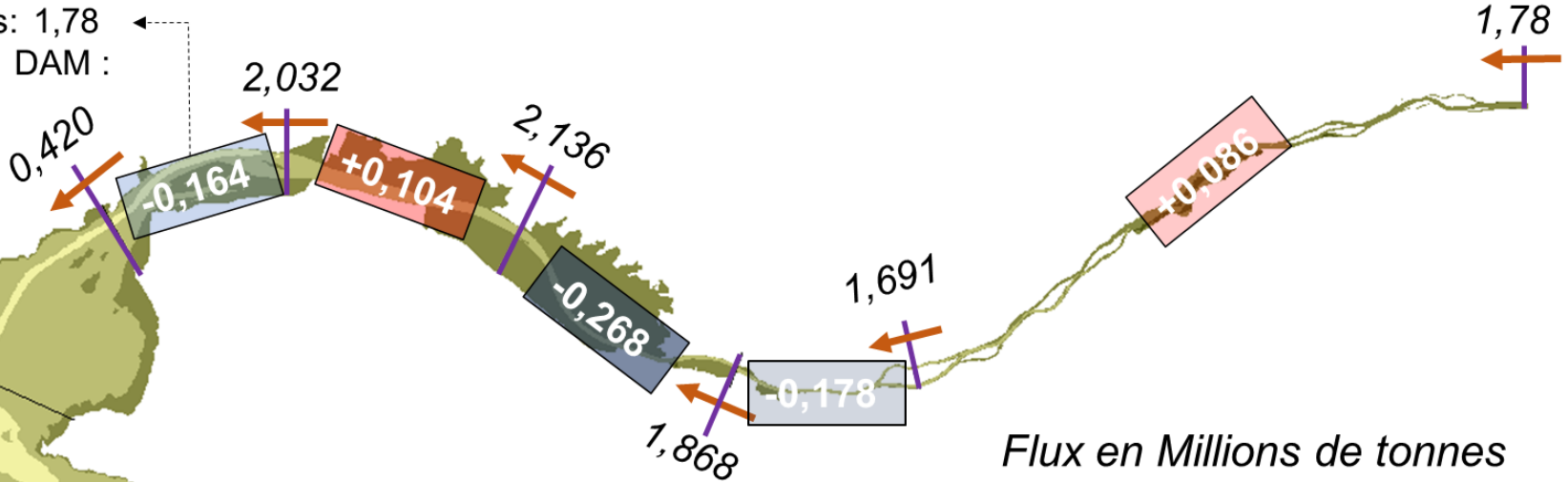
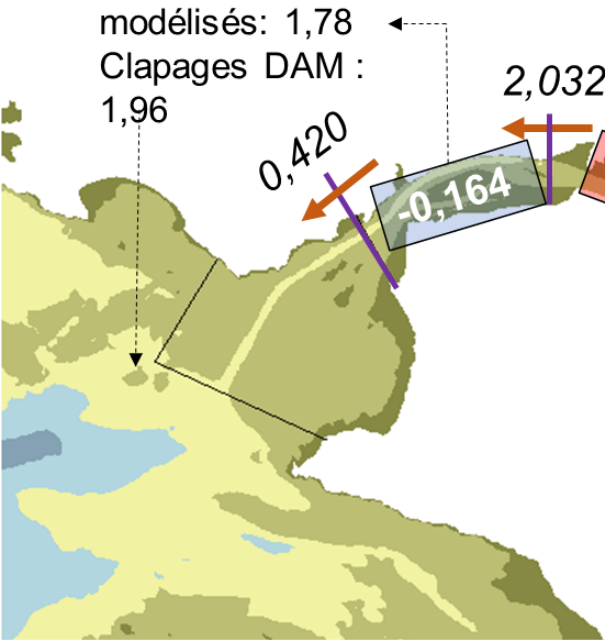
## Bilan annuel 01/10/2017 à 01/10/2018



- Détail par section – mêmes limites d'interprétation

## Estuaire interne - Bilan annuel 01/10/2017 à 01/10/2018

Dragages DAM modélisés: 1,78  
Clapages DAM: 1,96



*Flux en Millions de tonnes*

**Dépôt en Millions de tonnes**

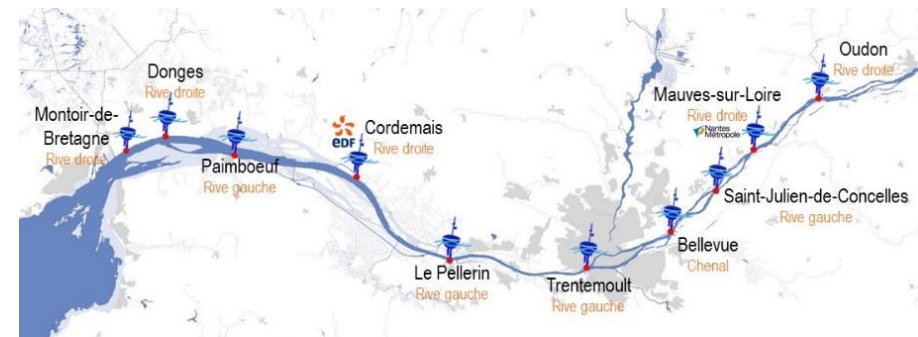
**Erosion en Millions de tonnes**

# Modèle oxygène dissous – contexte

## Contexte :

- Des hypoxies (déficits  $O_2$ ) fréquentes en étiage en aval de Nantes
- Suivi de l'oxygène dissous depuis les années 1990
- Depuis 2007 déploiement du réseau de mesures haute-fréquence SYVEL – Système de Veille dans l'Estuaire de la Loire ;
- Des profils hydrologiques sur la colonne d'eau (verticaux et transversaux) depuis les années 1990/2000
- Volonté d'amorcer la modélisation de la qualité de l'eau, en commençant par les processus d'oxygénation ;

➡ **Première approche simplifiée**



Localisation des stations du réseau SYVEL et de ses partenaires

*Paramètres mesurés par toutes les stations SYVEL en sub-surface (- 1m) :*

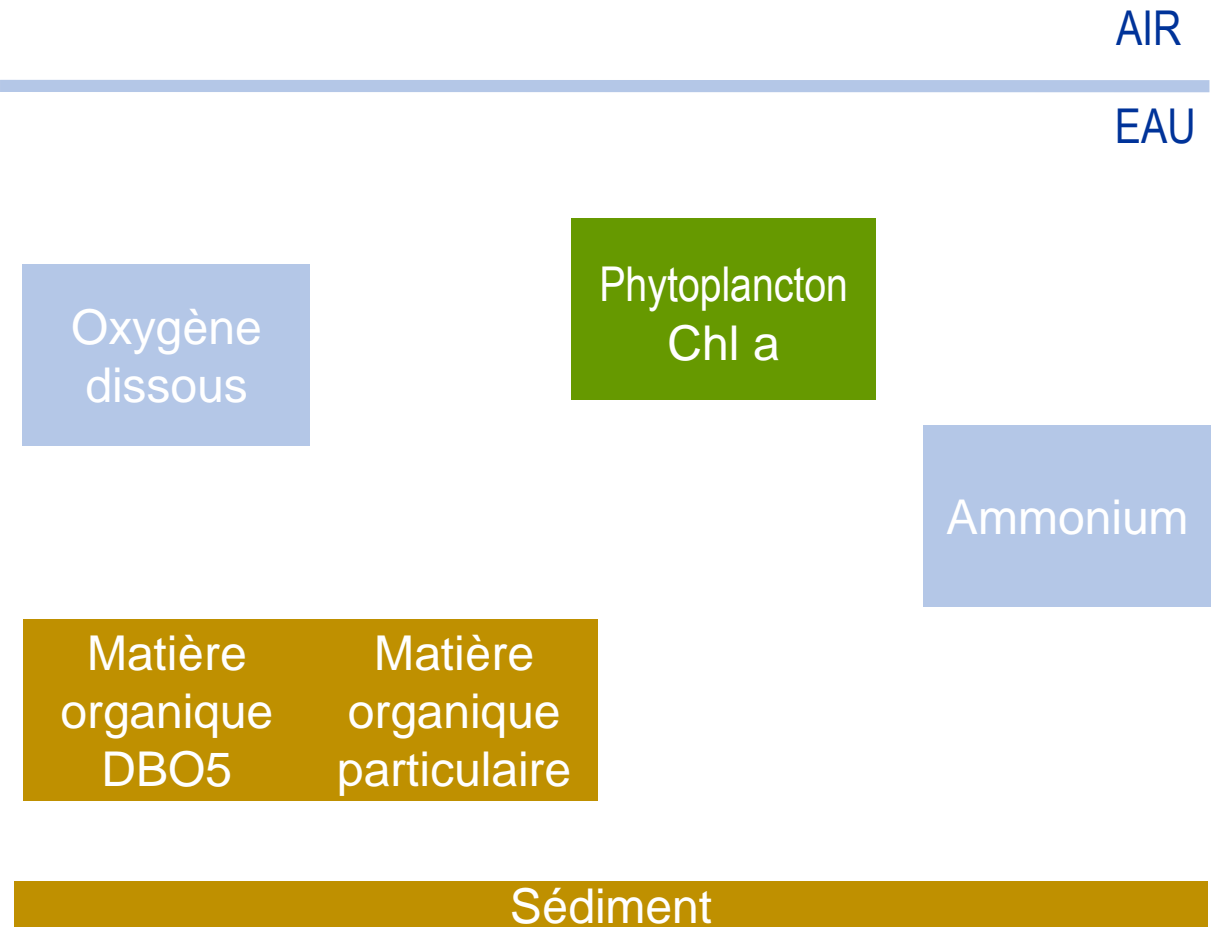
- *oxygène dissous*
- *température,*
- *turbidité => MES – Matières en suspension*
- *conductivité => salinité*

# Modèle oxygène dissous – structuration, processus

Utilisation du sous-module **EUTRO** du module **WAQTEL** du système **TELEMAC-MASCARET**

5 variables du modèle de  
qualité des eaux

**Choix discuté** de retenir  
une fraction de la MES pour  
la charge en MO particulaire  
et de phytoplancton pour la  
DBO5 (lié aux simulations  
courtes d'étiage installé).



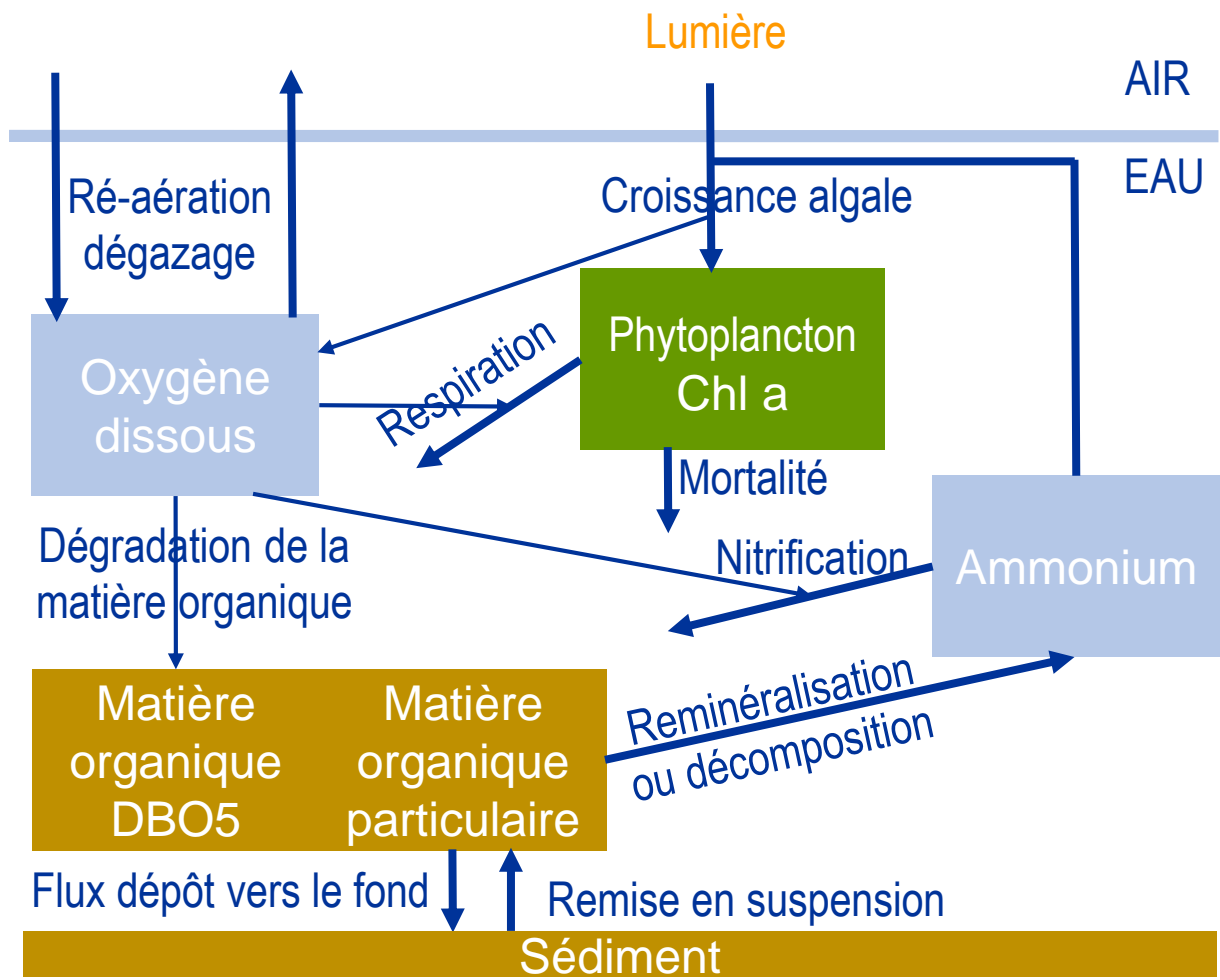
# Modèle oxygène dissous – structuration, processus

Utilisation du sous-module **EUTRO** du module **WAQTEL** du système **TELEMAC-MASCARET**

5 variables du modèle de qualité des eaux

**Choix discuté** de retenir une fraction de la MES pour la charge en MO particulaire et de PHY pour la DBO5 (lié aux simulations courtes d'étiage installé).

La **température** => prise en compte par une fonction type, car elle intervient comme paramètre dans les processus biogéochimiques établissant les flux entre les variables.



# Modèle oxygène dissous – structuration, forçages

**Modèle simplifié de température** : fonction type de la température de l'eau représentative de la courbe annuelle de température journalière, variable en fonction du PK

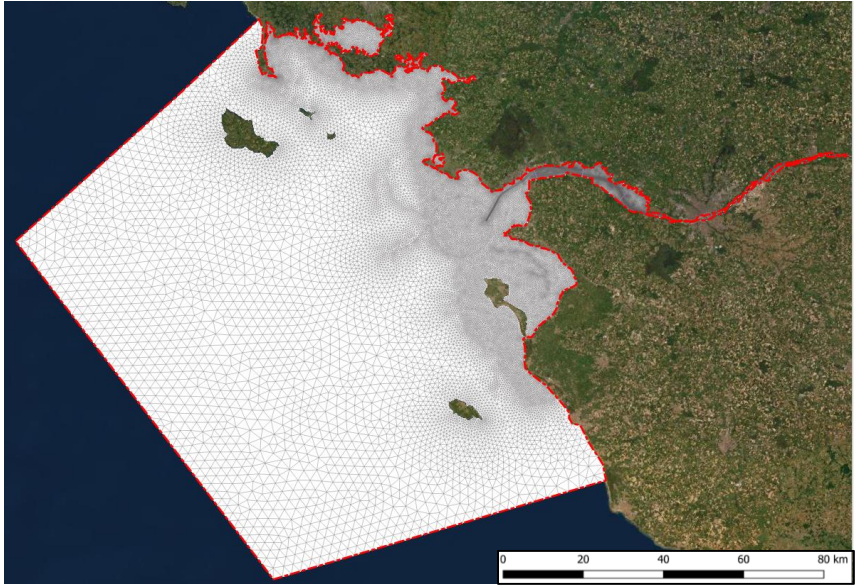
- Conditions au large

**Modèle IBI - Iberia Biscay Irish**  
(Copencicus UE – CNES)

Phytoplancton  
Chl a

Ammonium

Oxygène  
dissous



- Apports amont
- **Naiades à Montjean-s/L.**  
(OFB, AELB, DREAL)

Phytoplancton  
Chl a

Ammonium

Oxygène  
dissous

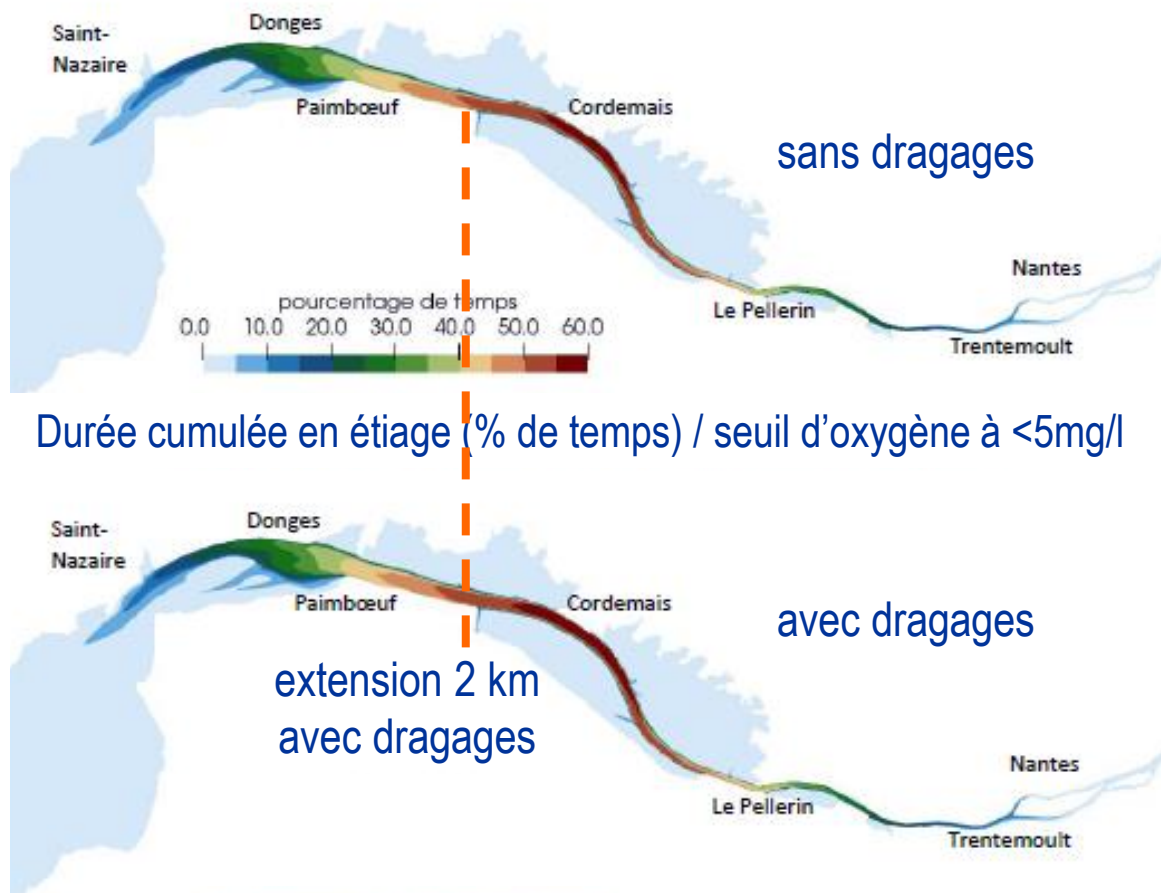
- Estuaire interne
- Apports anthropiques - 5 principales stations d'épuration (>90% apports) (AELB)
- Apports des principaux affluents Erdre, Sèvre N. dans l'estuaire interne (Naiades)
- Hypothèse de concentration de saturation avec T°C Montjean-s/L.



Estimation des conditions  
d'oxygénation, le modèle tend à  
sous-estimer la désoxygénation  
lors des vives eaux

Simulations étiage sur 3 à 4 mois  
sur l'année 2018 :

- secteur de Cordemais 50-60 %  
du temps < 5mg/l
- Max. env. 2% de temps  
supplémentaires <5mg/l avec  
dragages
- Effet DAS-DIE - variation max.  
0,2 mg/l O<sub>2</sub> moyenne, plus  
forte près du fond



# Perspectives de mobilisations du modèle HySQL

Rencontre autour de la Loire  
de la Maine à la mer

Nantes, le 05 décembre 2023

2  
0  
2  
2  
-  
2  
0  
2  
3  
-  
2  
0  
2  
4

Via contrat R&D CEREMA :

- **Projet DILEME – Dispersion Larvaire En Milieu Estuarien (INRAE – CEREMA - OFB) :**
  - rejeu 2022 en hydraulique
  - résultats 2022 du modèle global sur module lagrangien
- **Stage 2023 - rejeu étiage 2022**

Via la prestation ARTELIA :

- **Mobilisation dans le cadre du projet EOLE du Port**
- **Simulation long terme**
  - Calage couplé en frottement
  - Simulations à horizons 20 ans, et 50 ans

➤ **Poursuite des échanges avec les chercheurs :**

- cadre de projets de recherche
- mobilisation du COMEX

➤ **Développement module qualité de l'eau, affiner nutriments/MO**

➤ **Diffusion / communication**

Accueil - GIP Loire Estuaire

www.loire-estuaire.org/accueil

90%

Rechercher

**GIP Loire Estuaire** La Loire, de la Maine à la mer  
Observations et suivis environnementaux

418 m<sup>3</sup>/s  
Débit de la Loire à Montjean s/L

76  
Coefficient de marée

Webcam : l'estuaire en direct

LE TERRITOIRE | LES ACTIONS | LE GIP LOIRE ESTUAIRE

Nos actualités

Syvel : les données en direct

La Loire vue du ciel

En savoir +

0,5 à 30 g/l  
C'est la concentration (en matières en suspension) du bouchon vaseux dans l'estuaire de la Loire

SUIVIS ENVIRONNEMENTAUX

Les mouvements | La dynamique de la vie

L'environnement humain | Etudes et inventaires

Bulletins de suivis

DIFFUSION DES CONNAISSANCES

Publications | Demi-journée scientifique

Expositions | Cartothèque

NOS OUTILS

SYVEL | Photothèque

Centre documentaire | Vidéos

Portail géographique | Modélisation



## Actualisation de la rubrique Modélisation

35/36

# Merci pour votre attention

Rencontre autour de la Loire  
de la Maine à la mer

Nantes, le 05 décembre 2023



Fonds Européen de Développement Régional



## Modèle Hydro-Sédimentaire et de Qualité des eaux de l'Estuaire de la Loire

### Etiage août 2019 – MES et salinité moyenne sur la verticale

