

Modélisation hydro-sédimentaire des effets du changement climatique dans l'estuaire de la Loire

Régis WALTHER & Stéphanie AUMEUNIER

Ni fleuve, ni océan, les estuaires se caractérisent par un fonctionnement complexe. À la rencontre des eaux douce et salée, ils sont le siège de nombreux processus dont la compréhension passe par une approche globale.

Les équilibres estuariens de la Loire ont été modifiés par près de deux siècles d'aménagements du fleuve pour répondre essentiellement à des enjeux de navigation. Parmi les équilibres modifiés, celui du rapport entre le fleuve et l'océan a été particulièrement bouleversé au cours du XX^e siècle, au bénéfice de l'océan qui a progressé plus loin dans le fleuve, de près de 40 kilomètres en un siècle.

À la fin du XX^e siècle, l'estuaire est donc plus long, les eaux océaniques salées pénétrant plus loin dans le fleuve ; la vase, en grande quantité, suit le balancement de la marée et remonte au-delà de Nantes à la faveur des forts coefficients de marée et des bas débits du fleuve. Dans les années 1990, ces changements dans le fonctionnement estuarien ont conduit les acteurs à modifier leurs pratiques. Ils ont exprimé leurs inquiétudes et cherché à comprendre cette nouvelle dynamique en créant la Cellule de Mesures et de Bilans de la Loire estuarienne en 1998 - devenue Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire en 2004. Dans le même temps, les acteurs

locaux se sont interrogés sur le devenir de l'estuaire.

Ainsi, après plusieurs années consacrées à l'acquisition de données afin de mieux appréhender le fonctionnement estuarien, le GIP Loire Estuaire a étudié différents scénarios de rééquilibrage hydro-sédimentaire visant à limiter l'intrusion de l'océan dans le fleuve, en freinant la marée à l'entrée de l'estuaire par la création d'estuaires latéraux ou vasières. Rapidement, il est apparu indispensable de développer un modèle des processus physiques à l'œuvre dans l'estuaire. À partir de 2004, un premier modèle en deux dimensions (modèle 2D) est développé, puis, progressivement, un modèle en trois dimensions (modèle 3D) est mis au point en 2008-2009 par le bureau d'études Artelia, encadré dans son travail par un comité d'experts international. Il est construit à l'aide du logiciel Telemac-3D¹, et mobilise les données acquises et consolidées par le GIP Loire Estuaire : référentiels topographiques et bathymétriques, données de mesures en continu du réseau SYVEL², pour ne citer que les principales.

1. Telemac-3D est issu du système TELEMAR qui a été développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) de la division R&D d'EDF.
2. Le réseau SYstème de Veille dans l'Estuaire de la Loire est composé de 6 stations qui mesurent en continu, depuis 2007, la température, l'oxygène dissous, la salinité et les matières en suspension, à 1 mètre sous la surface de l'eau.

Ce modèle a été développé en trois dimensions afin de pouvoir représenter les gradients de salinité sur la verticale et la dynamique sédimentaire du bouchon vaseux³. L'effort de développement consacré à l'outil a permis d'aboutir à une représentation réaliste du fonctionnement hydraulique (niveaux, courants, salinité) et de la dynamique spatiale du bouchon vaseux sur des cycles hydrologiques variés (de l'étiage à la crue). Ce modèle est notamment capable de reproduire une année complète de dynamique de bouchon vaseux, en incluant son expulsion par une forte crue et sa reconstitution dans l'estuaire interne par la suite (Walther *et al.*, 2012). Toujours en phase d'exploitation, le modèle permet d'étudier le fonctionnement de l'estuaire de la Loire, dans sa situation actuelle, dans des configurations variées ou futures de l'estuaire, en tenant compte par exemple des effets du changement climatique.

Ce modèle a notamment été utilisé dans le cadre de projets de recherches et d'aménagements :

- Élaboration du scénario tendanciel et de scénarios de restauration de l'estuaire aval, pour le GIP LE, 2007-2013.
- Étude sur la propagation de la houle, pour le GPMNSN, 2010.
- Programme de recherches « Conséquences du changement climatique sur l'éco-géomorphologie des estuaires (C3E2) », Ifremer/Artelia/UBO/GIP LE, 2012-2014, programme de recherche du GICC (Le Hir, 2014).
- Étude « Impacts socio-économiques des changements environnementaux des complexes prairiaux de l'estuaire de la Loire : approche prospective (ICEPEL) », UBO/IFREMER/Artelia, Projet de recherche financé par la fondation de France. Programme : Quels littoraux pour demain ?

Développement et mise au point du modèle

Le développement du modèle s'effectue en trois étapes majeures que sont sa construction, sa calibration et sa validation.

a. Construction du modèle

La construction du modèle consiste à définir une emprise sur laquelle les processus

hydrauliques sont calculés. Les éléments extérieurs, appelés forçages, sont imposés ; c'est le cas de la marée, à l'aval de système, ou encore du débit, à l'amont. Ces limites sont généralement assez éloignées de la partie dynamique de l'estuaire, afin de pouvoir imposer plus facilement les forçages : par exemple, à l'amont d'Ancenis, la salinité est toujours nulle et la marée dynamique n'est plus ressentie, seul le débit de la Loire et son contenu sédimentaire peuvent être imposés.

À l'intérieur du modèle, un maillage est construit. Il contient de nombreux points (appelés nœuds du maillage) sur lesquels sont attribuées ou calculées les variables physiques : cote du fond, hauteur d'eau, vitesse, salinité, concentration des matières en suspensions, dépôts de vase.

Pour le modèle 3D, le même procédé est mis en œuvre, mais cette fois, verticalement, c'est-à-dire que sous chaque nœud, la hauteur d'eau est sous-divisée en un certain nombre de nœuds verticaux sur l'ensemble de l'emprise considérée.

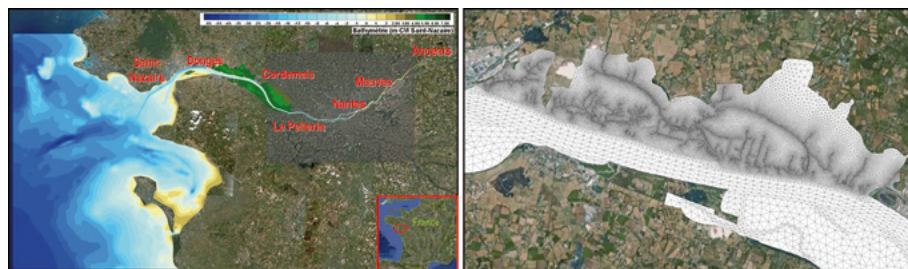
Le modèle calcule alors en chaque nœud, avec un pas de temps de l'ordre de quelques secondes, la variation de chaque variable physique en réponse à la variation des différents forçages extérieurs (marée, débit...).

Dans notre cas, le modèle hydro-sédimentaire couvre un champ géographique large, intégrant le lit mineur entre Saint-Nazaire et Ancenis, la plaine alluviale submersible entre Le Pellerin et Donges et le domaine maritime jusqu'à quarante kilomètres au large [1]. Les différentes données de forçage aux limites du modèle, nécessaires pour le faire fonctionner, sont : marée, niveau moyen (incluant la décote/surcote atmosphérique), houle, vent, salinité, débit de la Loire et apports de sédiments de la Loire. Le maillage de ce modèle a été raffiné (densification des nœuds de calcul) sur les zones submersibles entre Rohars et Donges dans le cadre du projet de recréation de vasières étudié par le GIP Loire Estuaire afin de freiner la progression de la marée montante.

b. Calibration du modèle

Les processus physiques implantés dans le modèle sont régis par des équations (formulations de comportements

3. Le bouchon vaseux est une zone de turbidité maximale, naturellement présente dans les estuaires à fort marnage. Sa position, sa forme, son étendue, son volume et sa densité évoluent au rythme des marées et des débits fluviaux.



[1] *Emprise, bathymétrie et maillage du modèle 3D*

hydro-sédimentaires) qui sont calculées à l'intérieur du domaine en chaque nœud. La plupart de ces équations ont cependant besoin d'être paramétrées. Il est alors nécessaire d'effectuer un certain nombre de mesures in situ afin de calibrer chaque paramètre.

Ce modèle a bénéficié d'importantes campagnes d'acquisition de données qui ont permis de caler l'ensemble des paramètres du modèle. Ces paramètres sont la plupart du temps liés à un secteur géographique (rugosité des fonds en fonction de la couverture sédimentaire, vitesse de chute des vases, seuil de mise en mouvement des vases, consolidation des vases...).

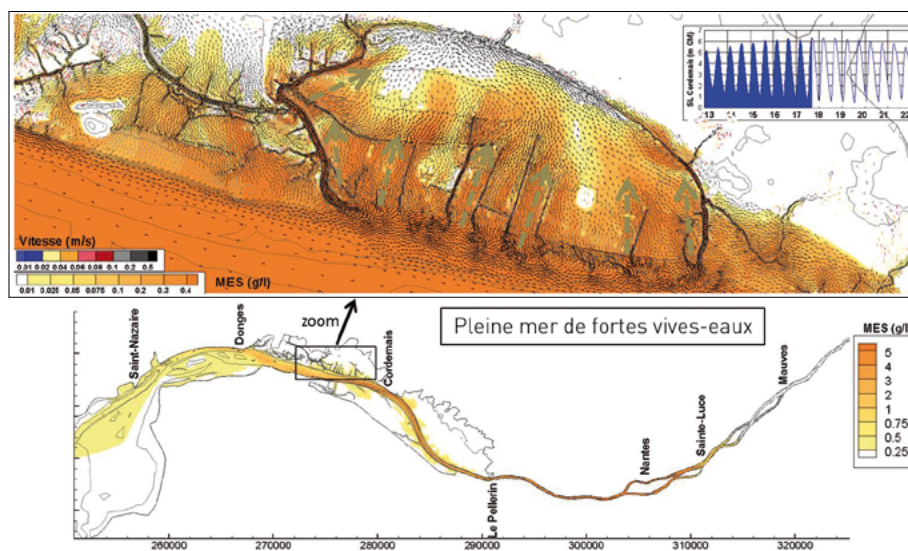
Une fois le paramétrage de chaque processus physique effectué, le modèle est capable de calculer, en chaque point du maillage, une variation de chaque variable physique, en réponse à une instabilité

interne au modèle ou à une modification des forçages extérieurs. La figure [2] donne un exemple de réponse du modèle à un forçage par une marée de vives-eaux qui provoque un débordement sur les zones submersibles avec des flux chargés de matières en suspension.

Le modèle étant calibré sur un nombre limité de mesures et pour des conditions de forçages déterminées, il est nécessaire de valider le modèle, afin de vérifier son fonctionnement pour des conditions de forçages variées et de déterminer des limites.

c. Validation du modèle

Le principe de la validation est d'utiliser le modèle tel que paramétré suite à la phase de calibration et de le faire fonctionner sur une période assez longue de telle sorte que la variabilité des forçages imposée soit conséquente.



[2] *Exemple de débordement modélisé en période de vives-eaux*

Les résultats du modèle sont alors comparés aux mesures effectuées sur cette même période. La différence obtenue pour chaque variable physique est alors quantifiée spatialement et temporellement, afin de déterminer le domaine de validité du modèle.

Les longues séries marégraphiques du Grand port maritime de Nantes Saint-Nazaire et les données du réseau de mesures en continu SYVEL du GIP Loire Estuaire sont mobilisées pour vérifier et valider le comportement du modèle sur des variations réalistes et longues des forçages en niveau d'eau, salinité et concentration de matières en suspension.

La dynamique de la crème de vase⁴ dans l'estuaire a aussi pu être vérifiée : les dépôts de crème de vase sur le fond du chenal sont régulièrement mesurés par le Grand port maritime de Nantes Saint-Nazaire. Ces données sont classées en fonction du débit moyen de la Loire au cours des dix jours précédents et indiquent qu'il n'y a pas de crème de vase dans le chenal de navigation en amont du point kilométrique 30, pour un débit supérieur à 500 m³/s. Cette caractéristique remarquable a été reproduite avec le modèle numérique lors d'une simulation de 8 mois. Pendant les conditions de forts débits, la crème de vase est située en aval, puis se déplace en amont du point kilométrique 30, lorsque le débit des dix derniers jours est inférieur à 500 m³/s.

L'exploitation du modèle peut s'effectuer de plusieurs manières, suivant l'objectif souhaité. Pour évaluer l'impact de variations majeures dans les forçages ou dans la configuration de l'estuaire, il faut laisser assez de temps au système estuarien pour répondre et s'adapter à ces variations. Une simulation sur une année dite moyenne en termes de forçages est mise en œuvre. Il a donc été imposé, pour cette année représentative, une chronologie des débits qui suit des variabilités annuelles réalistes (crues, étiages) et qui respecte le nombre moyen d'apparitions de chaque classe de débit pour une année. Il en est de même pour la série chronologique de houle.

Ces forçages moyens annuels ont été appliqués, sur le modèle avec la bathymétrie de 2010-2012. Les résultats de ce modèle sont représentatifs de l'état

actuel de l'estuaire, ils deviendront donc la référence à laquelle les résultats d'autres tests seront comparés.

Développement d'une méthodologie pour une simulation à long terme (2010 à 2070)

L'étude de l'impact du changement climatique sur l'évolution morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Loire est effectuée sur la période 2010-2070 en tenant compte de diverses hypothèses de changement climatique sur les paramètres principaux. Cette période a été fixée comme un objectif raisonnable en termes de simulation autant pour les temps de calculs que pour la confiance à accorder aux résultats.

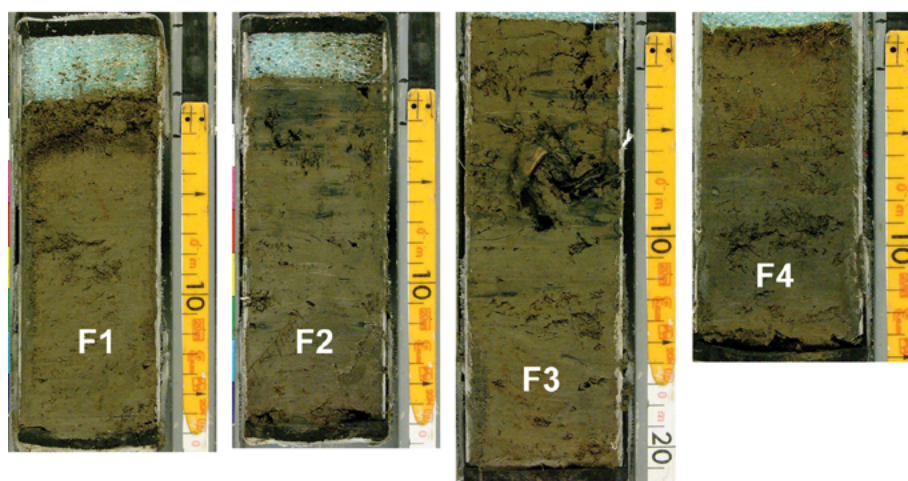
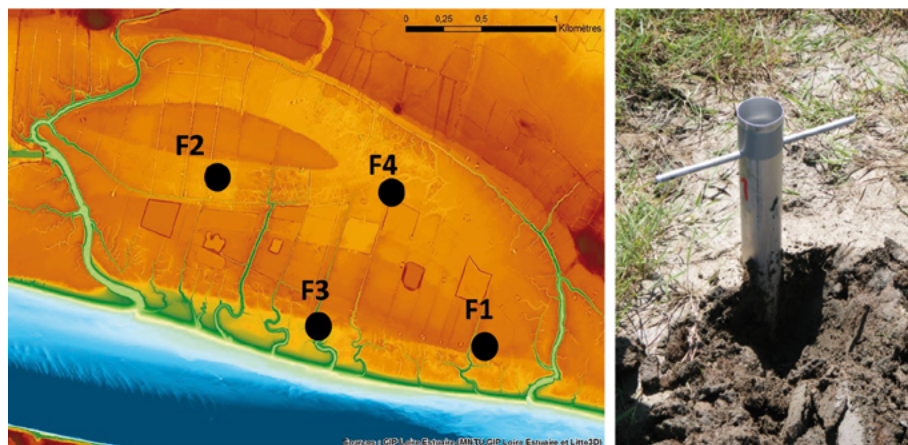
Étant donnés les temps de calculs importants pour pouvoir simuler une année en 3D (environ 12 jours de calculs), une méthode d'extrapolation a été élaborée afin de simuler une année tous les 5 ans : un calcul hydro-sédimentaire 3D simule la dynamique des sédiments fins de l'estuaire sur une période représentative d'une année moyenne et cela tous les 5 ans entre 2010 et 2070. Entre chaque calcul, la chronologie des forçages qui tiennent compte du changement climatique est remise à jour. Le lit mineur est remis à son état initial entre chaque calcul afin de tenir compte de l'entretien actuel du chenal de navigation par dragage.

Cette méthodologie a notamment été validée dans le cadre du projet C3E2 puisque les dépôts mesurés par carottages et datés à 20 ans ont été retrouvés par simulation sur la zone de l'ancienne île de Pipy comprise entre les étiers de Lavau et Rohars [3].

Impact du changement climatique en 2070 dans le lit mineur (dynamique estuarienne)

Étant donnés les temps de calculs importants pour pouvoir simuler la période 2010-2070 en 3D, deux scénarios contrastés sont simulés. Le scénario dit « sans changement

4. Les sédiments déposés dans le chenal forment sur le fond un tapis de vase, appelé crème de vase. Sous l'action des courants de marée ou de crue, ces sédiments sont mis en suspension dans la colonne d'eau et constituent alors le bouchon vaseux.



[3] Carottes prélevées sur le site Lavau-Pipy à des fins de datation pour évaluation des taux de sédimentation

climatique » est un scénario de référence pour lequel les forçages actuels ne sont pas modifiés jusqu'en 2070. Le scénario dit « avec changement climatique » est un scénario qui inclut à la fois une prévision d'élévation du niveau moyen de l'océan de +0,70 mètre à échéance de 2070 et un allongement des étiages. Les forçages en vent et houle restent inchangés dans le scénario « avec changement climatique ». Pour les apports de sédiments provenant de la Loire, par manque de connaissance actuelle sur le sujet, une formule a été appliquée, en fonction des apports liquides (débit).

Sur la base de ces scénarios, plusieurs paramètres sont analysés, dont les niveaux d'eau, la salinité et les sédiments fins.

Comme ces paramètres varient spatialement et temporellement, la comparaison chronologique est délicate. Aussi, des paramètres intégrateurs comme le temps de dépassement ou le percentile (valeurs d'une variable quantitative qui divisent les données triées en groupes par centième) sont utilisés le long de l'estuaire. La comparaison entre chaque scénario est alors plus aisée. La référence pour les comparaisons est le scénario « sans changement climatique » en 2070, représenté en bleu sur les graphiques.

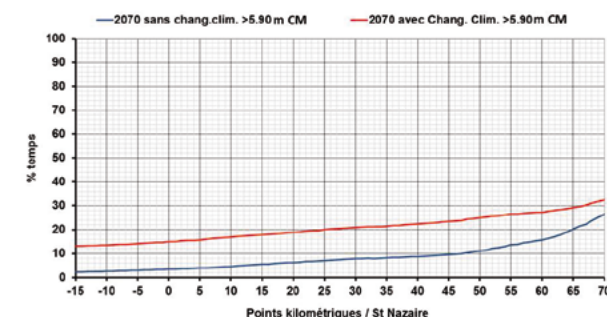
a. Niveaux d'eau dans le lit mineur

La Loire déborde sur la plaine alluviale quand elle atteint la cote 5,90 mètres

CM (CM pour « cote marine »), ce qui représente en moyenne 4 pleines mers sur 10, soit entre 220 et 330 débordements suivant l'année. Pour le scénario « avec changement climatique », les temps de débordement (sur l'année) sont augmentés d'environ 12% de l'embouchure, à Saint-Nazaire, jusqu'à Nantes [4].

b. Salinité dans le lit mineur

Le scénario « avec changement climatique » induit une intrusion plus importante de la salinité dans l'estuaire, principalement du fait de l'allongement des étiages. Le front salin à 0,5 g/l est décalé d'environ 5 à 7 kilomètres vers l'amont en 2070 [5].



[4] Fraction de temps de dépassement à la cote de débordement 5,90 m CM

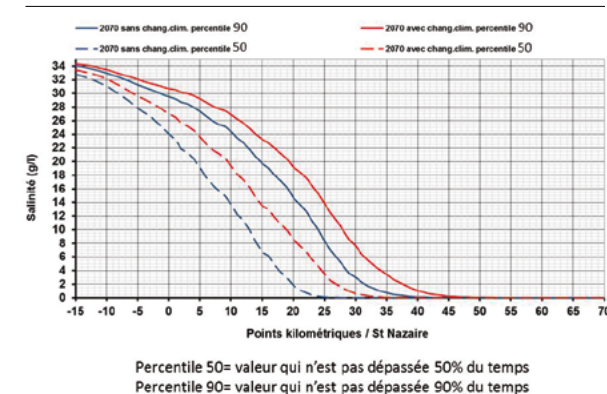
c. Concentration des matières en suspension (MES) dans le lit mineur

Pour les matières en suspension, le comportement diffère entre les percentiles 50 et 90. Le percentile 50 correspond à la médiane des valeurs observées (valeur atteinte au moins 50 % du temps dans l'année). Le graphique montre que pour le scénario « avec changement climatique », le système turbide tend à progresser plus en amont dans l'estuaire, d'environ 3 à 7 kilomètres en 2070, comme pour la salinité.

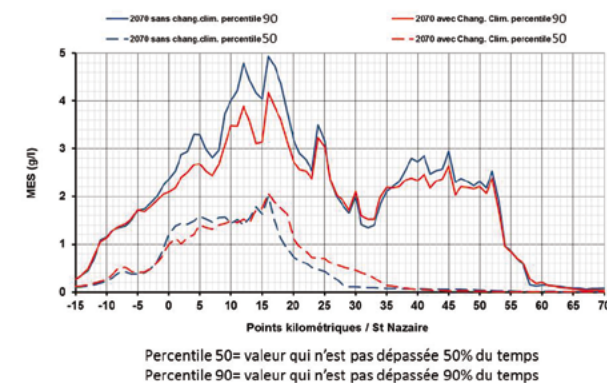
Le percentile 90 correspond plutôt aux maximums observés (valeur atteinte 10% du temps dans l'année). Le graphique montre que pour le scénario « avec changement climatique », les maximums sont atteints aux mêmes endroits mais avec des valeurs plus faibles que dans le scénario « sans changement climatique ». Ceci est certainement explicable par le fait que les plus fortes concentrations sont normalement observées pour les plus grandes marées, celles pour lesquelles il y a beaucoup plus de débordements dans le scénario « avec changement climatique ». Ces débordements plus fréquents contribuent à diminuer les concentrations maximales en matières en suspension présentes dans le lit mineur [6].

d. Masse du bouchon vaseux dans le lit mineur

La taille du bouchon vaseux est analysée suite à la crue de début de chronologie. En effet, la crue initiale a pour but d'expulser une grande partie du bouchon vaseux. Par la suite, l'estuaire reconstitue un bouchon vaseux en important les sédiments



[5] Distribution longitudinale des percentiles 90 et 50 de la salinité (moyenne verticale)



[6] Distribution longitudinale des percentiles 90 et 50 de la MES (moyenne verticale)

principalement de l'aval. Il existe aussi un apport important de l'amont, mais la plus grande partie a été débitée pendant la crue, lorsque l'estuaire expulse encore le sédiment dans l'estuaire externe proche.

Suite à la crue, l'estuaire se recharge donc en sédiment, et la masse maximale de sédiment qu'il a pu importer est liée à sa capacité à piéger du sédiment provenant de l'amont.

La diminution des apports amont de 50 % dans le scénario « avec changement climatique » permet quand même la formation d'un bouchon vaseux quasi similaire, ce qui signifie que dans ce cas, l'estuaire exporte moins de sédiment vers le large, ce qui est cohérent avec l'allongement des étiages. Lors des grandes marées, la diminution des pics de matières en suspension pour le scénario « avec changement climatique » peut être mise en relation avec le piégeage des sédiments par débordement sur les zones submersibles de prairies [7].

Conclusion

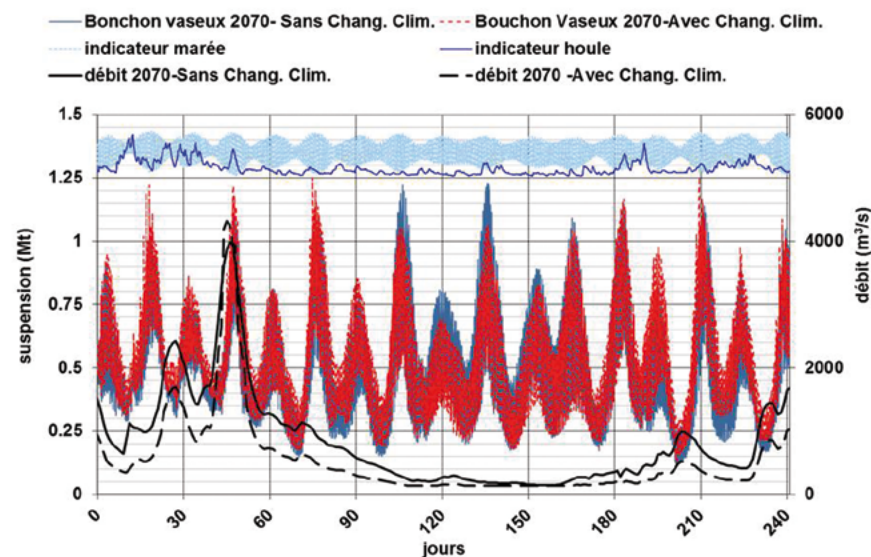
Le modèle 3D hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Loire est un outil performant

capable de simuler une grande diversité de scénarios. Les simulations sont d'autant plus fiables que les données sont nombreuses et suivies sur le long terme.

Dans un contexte de changement climatique, il est indispensable d'affiner les hypothèses concernant les paramètres de forçage pour estimer au plus près les tendances d'évolution des grands paramètres estuariens ; toute modification de ces paramètres étant susceptible d'engendrer des changements sur les habitats, sur la gestion, les usages (Le Dez *et al.*, 2017).

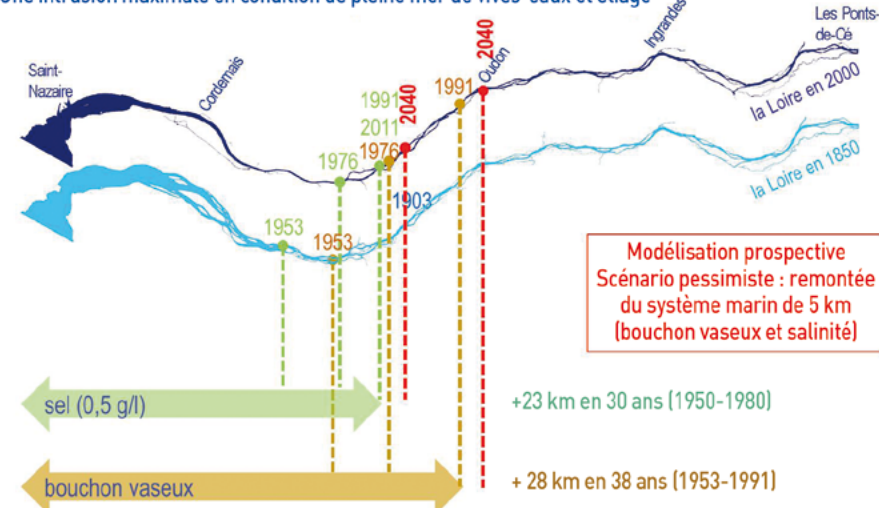
Tous les résultats ne sont pas présentés dans cet article. Des simulations ont également été conduites sur le lit majeur, entre Rohars et Donges. Elles montrent, entre autres, que les zones submersibles, dans le scénario « avec changement climatique », à échéance de 2070, piègent les sédiments et offrent des salinités plus élevées à proximité du lit mineur [8].

En comparant les modifications constatées au cours du XX^e siècle et celles prédites à échéance de 2070, les évolutions passées sont plus importantes que les évolutions attendues sous l'effet du changement climatique, à même échelle de temps, et ce, en l'état actuel des connaissances. ■



[7] Évolution temporelle de la masse du bouchon vaseux

Une intrusion maximale en condition de pleine mer de vives-eaux et étiage



[8] Mise en perspective avec les évolutions passées

Bibliographie

GIEC 2007 – Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'Experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, Suisse, 103 pp.

LE DEZ M., SAWTSCHUK J., WALTHER R., LE HIR P. & BIORET F. 2017 – Anticiper les impacts des changements climatiques dans l'estuaire de la Loire, *Norais*, 4 : 15-28.

LE HIR P. 2014 – Rapport final des résultats du programme de recherche C3E2 (Conséquences du Changement Climatique sur l'Écogéomorphologie des Estuaires). Programme Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC), Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, partie 1 et 2, 285 p.

MOATAR F., VIDAL J.-P. & BILLEN G. 2010 – Présentation du projet ICC HYDROQUAL : Impact du changement climatique sur l'hydrosystème

Loire : HYDROlogie, régime thermique, QUALité, <http://www.plan-loire.fr/fileadmin/pce/PFRDI/Reunions/Docs/Presentations/presentationICC-Hydroqual090210.pdf>

WALTHER R., SCHAGUENE J., DAVID E. & HAMM L. 2012 – Coupled 3d modeling of turbidity maximum dynamics in the Loire estuary, ICCE 2012, Santander. *Coastal Engineering Proceedings*, sediment.22. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.sediment.22>

Régis WALTHER, Ingénieur spécialisé en modélisation hydro-sédimentaire, Artelia eau & environnement

Stéphanie AUMEUNIER, responsable coordonnatrice technique et scientifique du Groupement d'Intérêt Public (GIP) Loire Estuaire