

Fiches descriptives des modélisations sur la Loire, de la Maine à la mer



La Loire et son estuaire, quel fonctionnement demain ?

Une demi-journée scientifique organisée par le GIP Loire Estuaire
8^{ème} édition

Concepteur de la modélisation

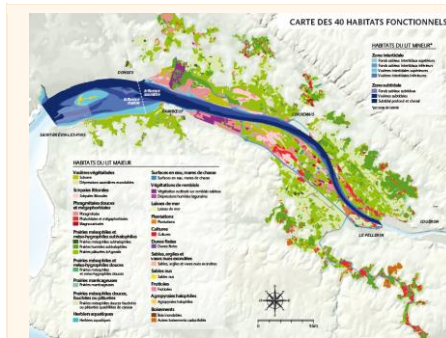
Anne-Laure Barillé, Frédéric Bioret,
Loïc Marion, Didier Montfort (maîtres d'œuvre)
GIP Loire Estuaire (maître d'ouvrage)

Outil utilisé

ArcGis

Date d'édition

2006



Emprise géographique

Vallée alluviale et lit mineur de Couëron à Saint-Nazaire

Objectif

Etablir la distribution des fonctions écologiques majeures de l'estuaire de la Loire, basées sur la relation espèce/habitat, pour des espèces d'oiseaux, de la macrofaune vagile (poissons, crevettes et crustacés planctoniques) et du peuplement benthique (vers, crustacés et mollusques des sédiments de l'estuaire).

Principes - construction

Géométrie du modèle : une cartographie de 40 habitats fonctionnels :

- 26 habitats terrestres, en procédant à des regroupements sur la centaine d'habitats Natura 2000, d'après l'inventaire 2001-2002 de la DREAL Pays de la Loire et du GIP LE ;
- et 14 habitats du lit mineur issus du croisement de la bathymétrie 2002 du GPMNSN, des sédiments (données granulométriques) et de la salinité.

Données de forçage : parmi les espèces les plus représentatives du fonctionnement écologique estuarien, 20 espèces du peuplement benthique, 18 espèces de la macrofaune vagile et 65 espèces d'oiseaux.

Cartographie au moyen d'un Système d'Information Géographique, de l'utilisation de l'estuaire par ces espèces à l'échelle des habitats fonctionnels. Sites d'accueil effectif et/ou potentiel des espèces déterminés selon les périodes de l'année et par fonction, telle alimentation, nourricerie, reproduction, migration, repos. Certaines fonctions assurées par les milieux, effectivement observées, d'autres évaluées comme fortement probables, au regard des exigences biologiques et des préférences écologiques des espèces considérées.

Pour chaque habitat et chaque espèce :

- un indice de patrimonialité a été construit,
 - une indication de la sensibilité écologique à différents facteurs abiotiques, fournie ;
- et uniquement pour chaque habitat :
- un indice de naturalité a été attribué.

Principales limites

Outil renseigné avec de la donnée issue d'observations et non de la donnée mesurée. Impossibilité de procéder à une analyse de la distribution quantitative des effectifs des espèces.

Les dates des cartographies des habitats :

- l'inventaire Natura 2000 date de 15 ans, sur le périmètre de 2001-2002, et le périmètre a été étendu de 1500 ha en 2007 ;
- une bathymétrie d'ensemble a été acquise en 2008, des données granulométriques, en 2008, 2010 et 2013 du GIP LE.

L'impact sur les habitats fonctionnels ou sur les espèces vis-à-vis de la variation des facteurs abiotiques n'a pas de valeur prospective.

Paramètres de sortie

- Cartes de répartition par espèce ou groupe d'espèces et par fonction et par période de l'année ;
- Cartes de synthèse par somme de fonction(s) ;
- Cartes d'impact sur les habitats fonctionnels selon la variation de l'intensité des facteurs abiotiques.

Principaux résultats

Un outil d'évaluation spatialisée des fonctionnalités environnementales de l'estuaire de la Loire, permettant de qualifier, voire hiérarchiser, l'importance des différents secteurs de l'estuaire, vis-à-vis d'un ou de groupe(s) d'espèce(s).

Une première approche de la sensibilité des milieux et des espèces, à court terme et par relation directe, grâce à la qualification de la relation entre la variation de l'intensité des facteurs abiotiques et l'impact sur les habitats fonctionnels.

Exemple de mobilisation

Evaluation de scénarios de restauration de l'estuaire aval, GIP LE, 2007-2013.
Projet d'extension d'installations portuaires sur le secteur de Donges-Est, GPMNSN, 2007.

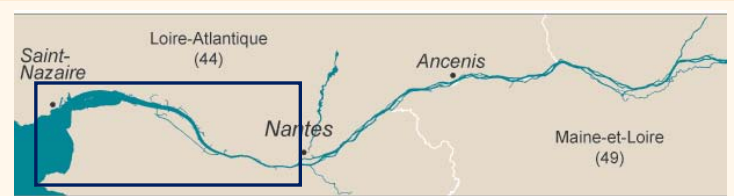
Concepteur de la modélisation

GIP Loire Estuaire

Outils utilisés : Modèle Ecopath, développé par Polovina puis repris par Christensen et Pauly. Modélisation qualitative et semi-quantitative : principe des boucles de Levins et travaux de Dambacher et S.Rochette.

Date d'édition

2009



Emprise géographique

Lit mineur de la Loire de Nantes à Saint-Nazaire

Objectifs : Identifier les processus majeurs et les espèces-clés du réseau trophique ainsi que les compartiments biologiques et les interactions structurants au sein de l'écosystème.

Principes - construction

Trois approches sont développées :

- **Une modélisation quantitative** avec le modèle Ecopath basé sur le principe d'une analyse inverse afin de quantifier les flux trophiques à partir de la connaissance des composantes du réseau, sans connaître les flux eux-mêmes. Conception d'un modèle annuel à l'échelle de l'estuaire.
- **Une modélisation qualitative** partant de la construction d'une matrice de communauté qui caractérise les effets directs entre les compartiments biologiques. Conception de modèles saisonniers et sectoriels (2 saisons et 2 secteurs halins).
- **Une modélisation semi-quantitative**, plus précise que la méthode précédente par la définition de classes d'interactions qui permet de résoudre le problème de l'incertitude sur le signe des interactions et de mieux prendre en compte l'intensité des impacts.

Principales limites

- **La méthode quantitative** nécessite beaucoup de données qui ne sont pas toujours disponibles (notamment pour les compartiments à la base de la chaîne trophique dans le cas de l'estuaire de la Loire). Non prise en compte des disparités sectorielles et saisonnières de l'estuaire.
- **Modélisation qualitative :** résultat imprécis et peu fiable. Ne tient pas compte des biomasses et ne permet donc pas de conclure sur les compartiments clés du réseau.
- **Modélisation semi-quantitative :** ce sont les mêmes données de biomasse et régime alimentaire qui sont rentrées dans les matrices saisonnières, c'est juste la présence ou absence d'un compartiment qui diffère.
- **Les 3 méthodes** sont basées sur l'hypothèse d'état stable (ou d'équilibre de masse) alors qu'il n'est probablement pas correct de considérer un estuaire comme un écosystème stable, et de négliger ainsi la part des échanges avec les écosystèmes adjacents.

Paramètres de sortie

Ecopath quantifie les flux trophiques d'un écosystème et calcule différents indices écologiques qui permettent de le caractériser, notamment un indice d'impact trophique.

Modélisations qualitative et semi-quantitative : analyse de sensibilité identifiant les interactions importantes à étudier. Le gain de précision est très important avec la méthode semi-quantitative.

Principaux résultats

L'organisation du réseau serait basée principalement sur la matière organique et sur la production primaire en second lieu. Le compartiment des copépodes constitue ensuite le maillon qui reçoit et transfère le plus d'énergie aux niveaux trophiques supérieurs.

Exemple de mobilisation

Détermination des habitats-clés de l'estuaire de la Loire à l'aide de l'outil fonctionnalités écologiques

LIGNES D'EAU DE CRUES DANS L'ESTUAIRE DE LA LOIRE

Concepteur de la modélisation

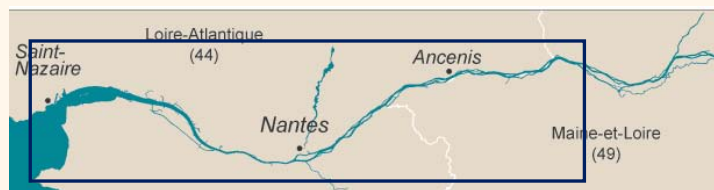
Hydratec (maître d'œuvre)
GIP Loire Estuaire (maître d'ouvrage)

Outil utilisé

Logiciel HYDRARIV (Hydratec)

Date d'édition

2010

**Emprise**

La Loire entre Montjean-sur-Loire et Saint-Nazaire

Objectifs : Reconstituer les phénomènes de propagation des ondes de crues et des ondes de marées dans la vallée de la Loire entre Montjean-sur-Loire et Saint-Nazaire afin d'améliorer la compréhension des niveaux extrêmes le long de la Loire estuarienne en situation actuelle et dans le futur, dans un contexte de changement climatique et de restauration du lit du fleuve. Caractérisation de l'aléa associée aux niveaux d'eau de l'estuaire

Principes - construction

- **Géométrie du modèle** : Modèle Numérique de Terrain Unifié (MNTU) de 2002 et 2008 du GIP LE, profils en travers de 1995.
- **Phase 1** : établir les corrélations possibles entre les différents facteurs concourant aux niveaux extrêmes de Loire en vue de construire des événements synthétiques représentatifs d'une période de retour (méthode des courbes enveloppes).
- **Phase 2** : caractérisation statistique d'un niveau d'eau extrême le long de l'estuaire. Simuler les événements synthétiques construits à l'aide d'un modèle hydraulique (HYDRARIV) qui reconstitue les phénomènes de propagation des ondes de crue et de marée : calcul de la hauteur maximale atteinte pour chaque événement.
- **Phase 3** : tester l'évolution des niveaux d'eau extrêmes en fonction de scénarios de changement climatique et d'évolution morphologique du lit de la Loire.

Les scénarios morphologiques ont été construits à l'échéance 50 ans, les évolutions climatiques ont été estimées à échéance 50 ans et 100 ans.

Principales limites

- Calage approximatif pour les bas débits : non prise en compte explicite des épis dans le modèle (effet des épis calés pour les cotes de crue et non les niveaux d'étiage), les fluctuations de la bathymétrie affectent surtout les lignes d'eau en périodes de basses et moyennes eaux. Ecarts importants entre mesures et calculs à basse mer, pouvant atteindre 40 cm à Cordemais.
- Hypothèses des scénarios de changement climatique et d'évolution morphologique : hypothèses du GIEC 2007 utilisées pour l'élévation du niveau de la mer non régionalisées ; chiffres retenus pour l'horizon 100 ans incertains ; vent extrême, surcotes et débit de crue de la Loire : pas d'analyse mobilisable à l'échelle du bassin de la Loire (hypothèses construites par analogie)
- La méthode ne peut s'appliquer que si l'hypothèse de simultanéité des variables est vérifiée. Or les valeurs extrêmes annuelles de débit de la Loire et de cotes à St Nazaire ne sont pas corrélées (une perturbation océanique peut être accompagnée ou non de précipitations importantes).

Paramètres de sortie

Quantification des niveaux d'eau extrêmes de crue en tout point de l'estuaire pour trois périodes de retour : 50, 100 et 200 ans.

Principaux résultats

Mise en évidence de l'impact du changement climatique sur les niveaux d'eau en aval de Nantes. En amont les niveaux d'eaux extrêmes restent déterminés par les situations dominées par les crues, les écarts entre les niveaux extrêmes sont alors plus directement liés aux hypothèses sur l'évolution morphologique du lit de la Loire.

Exemple de mobilisation

Plan de Prévention des Risques Inondations de la Loire aval dans l'agglomération nantaise (2014)

Concepteur de la modélisation

Artélia (maître d'œuvre)
GIP Loire Estuaire (maître d'ouvrage)

Outil utilisé

Telemac-3D

Date d'édition

2012

**Emprise géographique**

Lit mineur d'Ancenis à l'estuaire externe jusqu'à 40 km au large et la plaine alluviale entre Le Pellerin et Donges

Objectif

Représenter en trois dimensions, le fonctionnement hydraulique, la dynamique des sédiments fins (vase) et la variation de la salinité de l'estuaire de la Loire, leurs interactions, ainsi que les phénomènes régissant ces processus.

Principes – construction

Géométrie du modèle : Modèle Numérique de Terrain Unifié (MNTU) de 2008 du GIP LE.

Données de forçage : la marée, le débit à Montjean-sur-Loire, la houle à partir du modèle Prévimer et le vent au Croisic, la variation des niveaux moyens dus aux conditions météorologiques, les apports de matières en suspension (MES) de l'amont et de l'océan.

Calage du modèle : avec des données mesurées de débit, de hauteur d'eau, de courant, de conductivité (salinité), sur les sédiments (telle vitesse de chute, quantité crème de vase, flux de MES). Il a ensuite été validé pour la situation actuelle avec les données du réseau de mesure en continu SYVEL.

La turbulence est représentée, ainsi que les processus sédimentaires, tels le dépôt, le tassement, la remise en suspension.

Un scénario tendanciel a été soumis à des conditions hydroclimatiques estimées, selon les travaux du GIEC de 2007, à l'horizon 2040.

Ce modèle global développé à l'échelle de l'estuaire de la Loire est disponible également, en version raffinée entre Donges et Cordemais sur les milieux terrestres, pour représenter les submersions et les échanges hydrauliques entre la plaine alluviale et le lit mineur.

Principales limites

La quantité de MES provenant de l'océan est estimée et non mesurée. Des incertitudes sur le comportement hydrosédimentaire des vasières.

Ne sont pas pris en compte, entre autres :

- les sables ;
- la dynamique horizontale de la crème de vase sur le fond du chenal de navigation.

Le scénario tendanciel a été développé avec l'hypothèse haute du GIEC de 2007, une réduction marquée des débits moyens et d'étiage d'après le projet ICC-Hydroqual (Université de Tours), et sans prendre en compte les dragages d'entretien du chenal, ni les clapages à la Lambarde.

La durée de calcul pour représenter une année : environ 7 jours pour le modèle global et 15 jours pour le modèle raffiné.

Paramètres de sortie

Niveaux d'eau, zones en eau, vitesse moyenne, vitesse au fond et en surface, salinité, turbidité, épaisseur et volume de crème de vase, durée de dépassements de seuils pour les paramètres modélisés. Résultats calculés en profils en long, sur la verticale, des vues en plan, des évolutions sur le court ou le long terme.

Principaux résultats

- Représentation de la dynamique sédimentaire pour une large gamme de débits, de la crue avec l'expulsion du bouchon vaseux, à sa reconstitution dans l'estuaire interne par débit moindre ;
- Représentation des phénomènes de stratification haline et des mécanismes sédimentaires qui en résultent.

Le modèle permet ainsi d'étudier le fonctionnement hydrosédimentaire de l'estuaire de la Loire dans sa situation actuelle (calage simple), et dans le futur (calage couplé), pour évaluer les effets de scénarios d'intervention, tel le projet de récréation de vasières et de comblement de fosses du chenal de navigation, ou ceux liés au changement climatique.

Exemple de mobilisation

Elaboration du scénario tendanciel et de scénarios de restauration de l'estuaire aval, GIP LE, 2007-2013.

Etude sur la propagation de la houle, pour le GPMNSN, 2010.

Etude sur le profil de vulnérabilité des plages entre La Plaine-sur-Mer et Saint-Michel-Chef-Chef, CC de Pornic, 2010.

Etude sur la création d'un port de pêche et de plaisance à Paimboeuf, CC Sud-Estuaire, 2010.

Rénovation de prises d'eau de la centrale électrique de Cordemais, EDF, 2012.

Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires, Artelia/Ifremer/UBO/GIP LE, 2012-2014.

MODELE HYDROSEDIMENTAIRE SABLE

Concepteur de la modélisation

Hydratec (maître d'œuvre)
GIP Loire Estuaire (maître d'ouvrage)

Outil utilisé

Hydrariv

Date d'édition

2013



Emprise géographique

Lit mineur de la Loire, des Ponts-de-Cé au Pellerin

Objectif

Représenter en deux dimensions les transferts de sable le long des différents bras de Loire, à court et à long terme.

Principes - construction

Géométrie du modèle : bathymétrie de VNF, de 2009-2010.

Données de forçage :

- module hydraulique basé sur les paramètres de débit à Montjean-sur-Loire (simplifié par palier de débits), cote d'eau et vitesse ;
- module sédimentologique sable, pour calculer le débit solide mobilisable à l'aide d'une loi empirique de transport, et le transport par convection-déposition-arrachement. Ce module est intégré dans le précédent.

Des calculs hydrauliques et sédimentaires sont ainsi couplés, à des pas de temps différents :

- de l'ordre de l'heure, au plus, pour les calculs hydrauliques ;
- et de plusieurs jours pour les calculs d'évolution des fonds.

Un algorithme temporel a été adapté en conséquence pour concilier cette différenciation temporelle.

Trois types de schématisation coexistent dans le modèle :

- filaire pour les bras principaux et secondaires de Loire ;
- maillage 2D pour la zone occupée par les épis ;
- système de casiers pour le lit majeur inondable par crue débordante.

Schématisation des échanges entre le lit vif et le domaine occupé par les épis, par des liaisons latérales.

Principales limites

C'est un outil global qui ne prétend pas décrire finement les processus détaillés d'échanges sédimentaires à l'échelle locale.

L'influence de la marée dans le bief fluvio-maritime, soit à l'aval d'Ancenis, n'est pas explicitement modélisée sur des simulations sur plusieurs années. Elle est cependant prise en compte à la condition en limite aval simplifiée, en remplaçant les cycles de marée au Pellerin par des niveaux d'eau constants par paliers de débit équivalents en termes de transport solide.

Les données d'entrée sur la bathymétrie sont anciennes et présentent des fonds plus bas que ceux mesurés en 2013 par le GIP LE. Sur les débits, les chroniques choisies, parmi 40 années, sont sur une hydraulité moyenne et faible. Des tests de sensibilité ont été effectués pour une hydraulité plus forte.

L'hypothèse de transport solide est la plus basse des estimations.

En période d'étiage, lorsque le tirant d'eau dans les bras secondaires est du même ordre de grandeur que la fluctuation de la cote du fond sédimentaire, les variations des paramètres hydrauliques ont été bridées.

Paramètres de sortie

- Calcul dans chaque maille des volumes de sédiment déposés ou arrachés en fond de lit, et donc, des paramètres géométriques du modèle : sections géométriques pour les tronçons filaires du modèle, cote de fond pour les zones occupées par les épis.
- Sorties diverses : profils en long des fonds, bilans sédimentaires, hauteurs d'eau, lignes d'eau.

Principaux Résultats

Transferts de sable reproduits le long des différents bras de Loire, sur une échelle de temps comprise entre :

- quelques semaines, par analyse des perturbations engendrées par des épisodes de crues ;
- à plusieurs dizaines d'années, par analyse de la tendance d'évolution du lit suite à une perturbation majeure de l'équilibre morpho sédimentaire : telle la chenalisation du lit mineur, les dragages dans le lit vif, la modification de lois de partage des débits entre bras.

Ont été testés :

- un scénario tendanciel à long terme sans intervention dans le lit du fleuve ;
- et des scénarios avec des projets d'interventions.

Exemple de mobilisation

Stratégie de reconquête du lit de la Loire entre Les Ponts-de-Cé et l'agglomération nantaise, 2012-2020, GIP LE, 2013.
Contrat pour la Loire et ses annexes, VNF, 2015-2021

MODELISATION DE L'EVOLUTION MORPHOLOGIQUE D'UN LIT ALLUVIAL : APPLICATION A LA LOIRE MOYENNE

Concepteur de la modélisation

Université François Rabelais de Tours, thèse
d'Audrey Latapie

Outil utilisé

RubarBE (Paquier et El Kadi Abderrezzak)

Date d'édition

2011



Emprise géographique

La Loire de Nevers à Montjean-sur-Loire

Objectif

Proposer des méthodes pour améliorer la compréhension des processus d'évolution d'un long cours d'eau et la modélisation à long terme.

Principes - construction

- Caractérisation des tronçons avec des paramètres hydro-sédimentaire, dont des paramètres obtenus avec une modélisation hydraulique unidimensionnelle. Chaque tronçon est caractérisé par une géométrie simplifiée.
- Test de simplification des chroniques de débits, pour se limiter à la modélisation des événements qui influencent le transport des sédiments et façonnent le lit du cours d'eau.
- Ces simplifications sont introduites dans RubarBE pour être comparées aux résultats obtenus avec la géométrie détaillée et la chronique de débits complète.

Principales limites

- Incertitude sur la validité des formules classiques de transport solide et absence d'un volume de données historiques suffisant.
- Approches de classification en tronçons : les paramètres morphologiques fournissent des valeurs moyennes à cette échelle et donc des tendances générales d'évolution ; ce qui rend difficilement compte des évolutions différentes chenal principal/bras secondaires.
- En aval des Ponts-de-Cé : géométrie simplifiée non pertinente car les sections réelles présentent des géométries complexes. Ce problème se répercute sur la modélisation des évolutions du lit.

Paramètres de sortie

Bilans sédimentaires par tronçons.

Principaux résultats

Les simplifications effectuées permettent une modélisation des évolutions du lit pertinente tout en réduisant le temps de calcul.

Confluence Cher/Loire à Montjean-sur-Loire sur 1996-2006: secteur relativement stable avec légère tendance au dépôt entre Montsoreau et Saint-Mathurin ; confirmation des tendances observées par l'analyse géomorphologique des données. En revanche, à l'aval de Saint-Mathurin, le modèle donne de l'incision tandis que du dépôt était visible sur l'analyse des évolutions de la ligne d'eau d'étiage. Les tronçons présentant de l'incision sont localisés pour la plupart à l'aval des ouvrages.

Exemple de mobilisation

Le modèle pourrait être utilisé pour prédire les tendances d'évolution future dans le cadre du changement climatique.

Concepteur de la modélisation

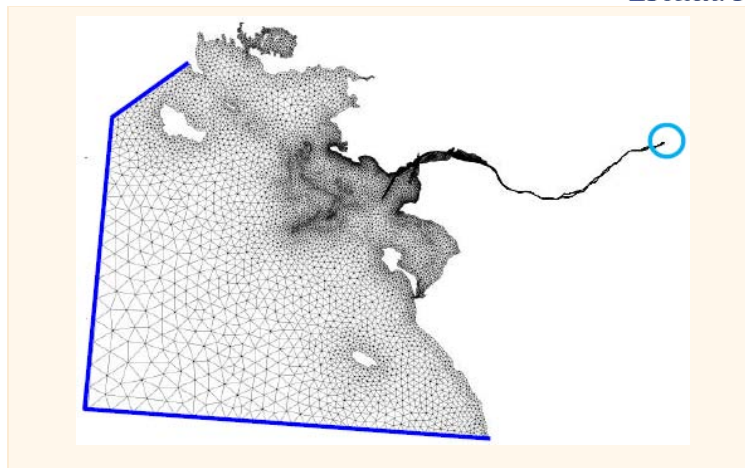
Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)

Outil utilisé

TELEMAC-3D, développé par le LNHE d'EDF-R&D

Date d'édition

2013

**Emprise géographique**

Littoral des Pays-de-la-Loire incluant l'estuaire de la Loire

Objectif : représenter correctement la propagation de la marée, et le courant induit sur toute la colonne d'eau, du large à la côte sur le littoral de la région des Pays-de-la-Loire et dans l'estuaire.

Principes - construction

- La modélisation hydrodynamique repose sur le système de modélisation aux éléments finis TELEMAC-3D qui permet de simuler le courant côtier et notamment sa répartition et distribution verticale.
- Taille des mailles varie entre 7 km au large, et 50 à 100 m à l'approche du littoral des Pays de la Loire et dans l'estuaire de la Loire.
- Géométrie du modèle : Modèle Numérique de Terrain Unifié (MNTU) de 2008-2010 du GIP LE.
- Données de forçage : marée (niveaux d'eau issus du modèle de marée cstFRANCE du SHOM) et débit (débit réel de la Loire issu des données de la Banque Hydro). Le frottement sur le fond est pris en compte.
- Calage du modèle réalisé à la fois en niveau d'eau et vitesse sur une période réelle (octobre 2011).

Principales limites

- Signal de marée issu du modèle cstFRANCE, élaboré à partir de résultats de modèles de propagation de marée et de mesures marégraphiques.
- Amont du Pellerin difficile à modéliser en raison notamment de la période de calage en étiage :
 - difficulté pour reproduire les conditions de frottement en période d'étiage ;
 - lit des fleuves très incisé à cette période alors que le MNTU de cette zone ne correspond pas à une bathymétrie d'étiage ;
 - maillage pas assez raffiné pour intégrer une telle morphologie incisée du fond (cela augmenterait considérablement le temps de calcul).

Paramètres de sortie

Informations de vitesse et de direction du courant en vives eaux moyennes (coefficient de marée égal à 95) et mortes eaux moyennes (coefficient de marée égal à 45) à 850 m³/s; sur un cycle de marée, heure par heure ; pour trois niveaux de profondeurs : surface, mi-profondeur et fond.

Principaux résultats

La propagation de la marée est bien représentée sur la partie maritime du modèle. Jusqu'à la partie aval de Cordemais les mesures aux marégraphes sont bien simulées. L'évolution de l'intrusion marine est bien reproduite sur le bief qui contribue le plus au stockage d'eau, de Saint-Nazaire à Cordemais. En amont du Pellerin, l'onde de marée perd en amplitude, les basses mers sont difficilement atteintes contrairement aux pleines mers.

Exemple de mobilisation

L'application la plus pertinente d'un tel modèle est l'évaluation du potentiel hydrolien d'une région. Nouvel atlas des courants de marée des côtes de France N°566 - Pays de la Loire, allant de la presqu'Île de Quiberon à l'Île d'Yeu, 2015

Ce document est destiné à être enrichi au fur et à mesure de la construction de nouvelles modélisations ou de la mise à jour de celles existantes.

N'hésitez pas à nous transmettre les informations sur vos projets impliquant la réalisation d'un modèle recoupant notre territoire, la Loire, de la Maine à la mer.

Les fiches descriptives seront mises à disposition sur notre site internet

www.loire-estuaire.org



Cette opération est cofinancée par l'Union européenne.

L'Europe s'engage sur le bassin de la Loire avec le Fonds Européen de Développement Régional

