**Contrat de Recherche relatif à la propagation de la marée en estuaire**

**N° 57/2016 version 3 du 6 mars 2017**

**Contrat de recherche n° 16CP09**

# Programme scientifique

## Mise en place d’une configuration barotrope (estuaire simplifié)

L’objectif de cette tâche consiste à définir et mettre en place une configuration estuarienne simplifiée, mais néanmoins reproduisant les principales caractéristiques d’un estuaire réel, pour le modèle hydrodynamique HyCOM et T-UGOm.

## Géométrie de l’estuaire simplifié

La configuration estuarienne sera construite sur la base de 3 compartiments :

* Façade côtière
* Estuaire aval (ouvert)
* Estuaire supérieur (fluviale)

La première étape consistera à définir un trait de côte et de berges simplifiés. L’estuaire sera dimensionné de façon réaliste :

* Estuaire aval : longueur environ 100 km et largeur de 20 km à 1 km
* Estuaire supérieur : longueur environ 100 km et largeur de 1 km à 500 m

La **bathymétrie** simplifiée variera de 50 mètres aux frontières ouvertes de la façade côtière à environ 10 mètres dans l’estuaire aval pour se réduire entre 10 et 5 mètres dans le compartiment supérieur. On pourra au besoin représenter un chenal de navigation (10 mètres) dans la partie peu profonde de l’estuaire. Sauf indication contraire, l’estuaire ne comportera pas de zones découvrantes.

La **topographie du fond** sera représenté dans un système de référence de type géoïde (altitude), seul compatible avec le niveau de référence intrinsèque des modèles numériques. Ce système de référence sera choisi pour coïncider avec le niveau au repos de la surface libre du modèle. Une pente sera appliquée à la bathymétrie du modèle (1m/100km en estuaire aval, 5m/100km pour l’estuaire fluviale) afin de représenter une dénivellation réaliste de l’estuaire. La représentation de cette pente est indispensable à l’amortissement complet de la marée à la frontière ouverte amont du fleuve et ainsi de s’affranchir au niveau de la condition aux limites du couplage marée/débit.

(figure)

## Génération des grilles numériques

Le LEGOS développe des outils de générations de grilles structurées et non structurées. Pour les grilles structurées, ces outils permettent la génération de grilles curvilignes orthogonales.

(figure)

La résolution numérique évoluera de 1 km dans le compartiment côtier à O(10) mètres dans la partie fluviale.

## Zonage de la rugosité du fond

Le zonage sera inspiré de celui déterminé empiriquement pour l’estuaire de la Gironde. Il sera décrit sous forme de champs 2D (format netcdf).

## Condition aux limites de la marée

On fait le choix de négliger les marées diurnes et se concentrer sur la marée semi-diurne et ses harmoniques non-linéaires (pour celles dont l’amplitude est susceptible d’être significative aux frontières ouvertes côtières). Le spectre définitif sera établi en s’inspirant de simulations de marée non-linéaires (i.e. time-stepping) du plateau européen.

## Données de validation

Une configuration simplifiée ne peut représenter à l’analogue la dynamique d’un estuaire réel, et par conséquent une comparaison directe des simulations avec des données observées ne peut être envisagée. Deux stratégies sont possibles :

* Extraire de données réelles des indicateurs statistiques ou synthétiques, et comparables à ceux obtenus à partir de simulations numériques
* Générer un jeu de pseudo-données à partir d’un des deux modèles déployé pour cette étude

Le choix entre ces deux stratégies (ou une combinaison des deux) sera étudié puis soumis pour accord au SHOM.

## Simulations numériques

* Condition standard: simulation HyCOM et T-UGOM time-stepping
* Marée seule : : simulation HyCOM, T-UGOM time-stepping et T-UGOm spectral
* Fleuve seul: simulation HyCOM et T-UGOM time-stepping

## Délivrables

* La description de la géométrie du modèle simplifié.
* Les 2 grilles HYCOM cartésienne régulière et curvilinéaire, en estuaire simplifié.
* Les résultats du modèle en éléments finis, dans la même configuration d’estuaire simplifié (simulation réalisée par le titulaire).
* Un rapport de synthèse de fin de tâche sera rédigé et regroupera l’ensemble des travaux réalisés :
  + La méthodologie des traitements et les données traitées.
  + Synthèse de la quantification de l’erreur (modèle Hycom et éléments finis) pour les simulations réalisées
  + Synthèse des paramètres ajustés pour le modèle dynamique sur le modèle Hycom.

## Etude de la déformation de l’onde de marée en fonction du débit fluvial (estuaire simplifié)

L’objectif de cette tâche consiste à étudier la déformation de la marée estuarienne sous l’effet du débit fluvial.

## Conditions aux limites fluviales

Les conditions aux limites fluviales peuvent être prescrites à la frontière amont en termes d’élévation de la surface libre fluviale et/ou de débit entrant. Le choix optimal entre la condition en élévation, en débit ou une combinaison des deux varient suivant les modèles hydrodynamiques :

* La condition en élévation, agissant sur le gradient de pression, permet un spin-up rapide de la simulation. Dans les modèles aux éléments finis, souvent formulés en équation d’onde (T-UGOm, Télémac, ADCIRC), cette formulation est la plus naturelle. Elle permet d’exploiter directement les observations hydrologiques les plus standards (hauteurs limnigraphiques). Elle requiert une description géométrique réaliste de la géométrie du fleuve amont pour fonctionner correctement.
* La condition en débit permet un contrôle précis du volume fluvial injecté. C’est aussi la formulation la plus naturelle pour les modèles structurés à grille Arakawa « C ». Elle a l’inconvénient d’être dépendante des courbes de tarage utilisées pour convertir les hauteurs limnigraphiques en débit.
* La condition en débit peut être enrichie d’une information additionnelle en élévation afin de stabiliser la condition aux limites, dont la surface libre peut se situer à plusieurs mètres au-dessus du niveau de la mer.

Une formulation adéquate sera recherchée pour le modèle HyCOM.

## Simulations numériques

Les situations étudiées en détail se limiteront aux conditions de crue et d’étiage. Néanmoins nous suggérons d’y adjoindre une simulation sans débit fluvial (marée seule), une simulation débit seule (sans marée) et une simulation à débit fluvial standard afin de raffiner l’analyse des simulations en condition de crue et d’étiage, en particulier afin de mieux séparer la déformation du eau frottement de fond de celle liée au débit. Ces simulations seront disponible à l’issue de la tâche 1.

Afin de permettre une utilisation pertinente de l’analyse harmonique, les débits retenus seront maintenus constants durant les simulations.

* Condition de crue : simulation HyCOM et T-UGOM time-stepping
* Condition d’étiage: simulation HyCOM et T-UGOM time-stepping

Nous proposons d’exploiter les simulations time-stepping pour déterminer une surface moyenne de l’estuaire, et de réaliser les simulations spectrales correspondantes.

## Diagnostiques

* Constantes harmoniques (marée astronomique et marée non-linéaire)
* Courbes de tarage aux sections de contrôles
* ...

## Délivrables

* Les champs de forçage de marée en condition de mortes eaux, de vives eaux, interfacés pour le modèle HYCOM en estuaire, sur la grille de calcul qui aura été sélectionnée au cours des tâches précédentes (cartésienne régulière ou curvilinéaire).
* Les résultats des tests de déformation de l'onde de marée en fonction du débit du fleuve et des conditions de marnage de marée (vives et mortes eaux). Comparaison aux mesures marégraphiques disponibles.
* La comparaison des simulations HYCOM avec les simulations du modèle en éléments finis, opérés dans les mêmes conditions de simulations.
* Un rapport d'étude.

## Prise en compte du frottement (estuaire simplifié)

L’objectif de cette tâche est de proposer et valider une stratégie permettant de calibrer les paramètres numériques liés au frottement du fluide sur les parois de l’estuaire (frottement de fond et latéral, diffusion verticale et horizontale). Cette calibration se fera sur la base d’un zonage reproduisant peu ou prou les variations des conditions de frottement en fonction de la nature des fonds et des berges dans un estuaire naturel.

## Paramétrisation de la friction de fond

Sauf à employer des méthodes inverses d’identification de paramètres, généralement couteuses, la calibration par zone du frottement se fait par des méthodes empiriques nécessitant de nombreuses simulation-test.

En configuration estuarienne, la modélisation de la marée demeure la plus efficace pour identifier les coefficients de frottement optimaux en comparant les simulations avec les données marégraphiques disponibles. Pour garantir la bonne représentation des interactions non-linéaires des ondes, un spectre suffisamment fourni doit être pris en compte, ce qui impose des durées de simulations de l’ordre du mois à l’année pour chaque essai afin de satisfaire aux contraintes de l’analyse harmonique (séparation des fréquences).

Dans l’hypothèse où l’on néglige les effets de baroclinicité sur la marée et l’écoulement fluvial (hypothèse réaliste en zone estuarienne), on peut considérer qu’au premier ordre le gradient de la surface libre et le frottement équilibrent l’accélération temporelle du fluide. Que ce soit dans un modèle shallow-water ou dans un modèle 3D, l’effet intégré du frottement et de la viscosité verticale se résume à la tension de fond :

où représente la vitesse frictionnelle. Dans un modèle numérique, cette vitesse friction est paramétrée sous la forme :

où représente la vitesse du fluide moyenne (shallow-water) ou sur la couche du fond (modèle 3D). On comprend aisément que le coefficient de frottement ne peut être identique en shallow-water et en 3D, cependant la vitesse frictionnelle reste comparable.

La stratégie consiste donc à chercher une calibration optimale des coefficients de frottement à partir de simulations spectrales, à vérifier leur pertinence en shallow-water time-stepping, puis à déterminer les coefficients de frottement 3D permettant de reproduire les vitesses frictionnelles issues des simulations shallow-water.

## Délivrables

* Un rapport détaillant la méthodologie de la mise en oeuvre de l’optimisation du frottement sur le fond.
* Les jeux de données nécessaires à la mise en oeuvre de la paramétrisation du paramètre Cd.
* Les jeux de coefficients (Cd) testés et optimisés pour la configuration simplifiée, définie pour l’étude.
* Un rapport d’étude pour cette tâche sur la prise en compte du frottement dans le modèle simplifié.

## Paramétrisation de la friction horizontale

L’objectif de cette tâche consiste à évaluer l’impact des conditions aux limites latérales et de la diffusion horizontale (numérique, implicite ou explicite) sur la dynamique estuarienne.

Dans la partie fluviale de l’estuaire, les dimensions horizontales systèmes se réduisent fortement, la bathymétrie passe sous le seuil de 10 mètres et la résolution est généralement augmentée. Les effets de couches limites latérales peuvent commencer à être partiellement résolus, les inégalités de bathymétries (par exemple en présence d’un chenal de navigation) impactent fortement l’écoulement, générant des cisaillements horizontaux importants qui vont eux-même activer une diffusion horizontale significative, et souvent excessive. Ces effets de diffusion sont plus ou moins dissipatif suivant la condition limite latérale (free-slip, no-slip, frottement latéral) et peuvent rapidement amortir les ondes de marée.

L’expérience nous a montré que la paramétrisation des effets de friction/diffusion latérales doit être ajustée. La difficulté principale réside d’abord dans l’existence de diffusion numérique (non-explicite) difficilement contrôlable, et que la diminution de la diffusion horizontale peut avoir un impact négatif sur la stabilité numérique.

## Délivrables

Un rapport détaillant la méthode et les résultats des simulations mises en oeuvre pour analyser l’effet de la paramétrisation de la friction latérale sur la dynamique du modèle en estuaire.

## Prise en compte de la nature du fond sur le frottement

Il nous parait difficile de mener cette étude en dehors d’un cadre réaliste afin de pouvoir disposer de données de calibration et de cartes de nature des fonds réelles. Nous proposons donc d’intégrer cette étude en tâche 4 (estuaire réaliste)

## Modèle d’estuaire réaliste

La configuration réaliste proposée est celle de l’estuaire de la Gironde. Les raisons de ce choix résident dans la disponibilité préalable à cette étude d’un modèle de terrain très précis (résolution 10 m) pour l’estuaire, des conditions aux limites amont (fournie par la DREAL) et côtières (extraites de simulations NEA réalisés par le LEGOS), ainsi que l’expérience du LEGOS dans la modélisation précise de cet estuaire (dans le cadre du programme altimétrique SWOT).

## Configuration Gironde

La configuration réaliste représentera l’estuaire de Gironde et les parties fluviales de la Dordogne et de la Garonne jusqu’à leur limite tidale (Pessac sur Dordogne te La Réole).

## Trait de côte et de berge

Le trait de côte sera extrait de la base de données TChistolit (SHOM). Le trait de berge en estuaire sera extrait de la base de données BDTopo (IGN).

## Bathymétrie et modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain est extrait de topographie fluviale (Port Autonome de Bordeaux) et de la base HOMONYM (SHOM). Dans un premier temps, les élévations seront réduites dans le système IGN69, puis ramener (par translation) à un référentiel géodésique coïncidant avec le niveau moyen océanique en s’appuyant sur des mesures marégraphiques géo-référencées (SONEL).

## Simulations numériques

Un minimum de 1 an sera simulé afin de reproduire les différentes conditions estuariennes (marée de mortes eaux-vives eaux, crues, étiages, tempête, etc…). L’année retenue sera choisie en fonction de la disponibilité des observations marégraphiques et limnigraphiques.

Les forçages atmosphériques (vent et pression) seront extraits des produits d’analyse LWA du centre européen ECMWF (resolution ~1/8eme de degré, échéance à 3h). Si les produits Arôme (Météo France) ont une résolution spatio-temporelle supérieure, ils présentent l’inconvénient de ne pas couvrir la configuration NEA qui sera utilisée pour déterminées les conditions aux limites côtières et donc on peut redouter une incohérence entre les conditions aux limites de la configuration estuarienne et de ses forçages intérieurs.

## Prise en compte de la nature du fond sur le frottement

La nature du fond, sa granulométrie et son relief, voire sa sculpture par la houle dans le cas de sédiments, conditionne l’intensité du frottement. Dans le cas extrême de présence de crème de vase, le frottement change de nature pour devenir linéaire, modifiant ainsi significativement la réponse dynamique du fluide. On utilise souvent en modélisation une formulation tenant compte de la seule granulométrie (sous forme d’une longueur équivalente de rugosité) afin de déterminer le coefficient de frottement à appliquer au courant à une immersion donnée. Cette formulation a été établie pour un fond plat et un écoulement uniforme à l’équilibre dont le coefficient de viscosité est proportionnel à la distance au fond (profil logarithmique de vitesse).

Bien que ces hypothèses soient très critiquables en conditions estuariennes réelles, on peut chercher une relation empirique et statistique entre les coefficients numériques optimaux et la nature des fonds.

## Délivrables

* Les coefficients de frottement de fond Cd le long de l'estuaire,
* Les tableaux de friction de fond déduite du coefficient de frottement local,
* Un rapport contenant a minima
  + les résultats de validation harmonique des simulations obtenues avec différentes paramétrisations du coefficient de frottement en fonction de la nature du fond de l'estuaire
  + la comparaison des simulations HYCOM avec celles issues d'un modèle en éléments finis.

## Délivrables

* Le modèle HYCOM barotrope (2DH) en configuration fluviale réaliste; modèle projeté sur le niveau de référence verticale.
* Les champs de forçages : bathymétrie actualisée pour les besoins de l'étude, forçage de marée aux frontières dont la limite amont du modèle (limite fluviale) et autres champs utiles à la simulation.
* Un rapport d'étude sur l'écart de hauteur entre un ellipsoïde de référence, le géoïde le long du fleuve et l’expression des résultats du modèle HYCOM par rapport au niveau moyen et par rapport à un géoïde référencé sur ellipsoïde.
* Si utilisé, le solveur spectral de la marée devra être interfaçable avec le modèle HYCOM. Les

interfaces Fortran des développements seront vérifiées en utilisant le compilateur INTEL (dont intel64).

* Le jeu de paramètres de frottement de fond optimisés pour l'estuaire en condition réaliste.
* Les résultats des simulations pour différentes conditions de marée et de débits fluviaux, définis en tâche 5.2, pour le modèle HYCOM et le modèle en éléments finis.
* Un rapport de validation et un manuel utilisateur des méthodes, programmes et scripts.