



**MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DE L'ETANG DE
BERRE ET DES MILIEUX ANNEXES**

**NOTE SUR LE LOGICIEL TELEMACH3D ET SUR LES POSSIBILITES
ET LIMITES DU MODELE DE L'ETANG DE BERRE**

RAPPORT

**ALT - N° 1740286
MAI 2006**

SOMMAIRE

1. Le logiciel TELEMAC3D	2
1.1. Les equations et les variables	2
1.1.1. Equations de l'hydraulique	2
1.1.2. Maillage2	
1.1.3. Traceurs	3
1.1.4. Autres phénomènes pris en comptes	3
1.2. Les conditions aux limites	3
2. Retour d'expérience sur d'autres etudes.....	5
2.1. Introduction.....	5
2.2. Descriptif des études réalisées	5
2.2.1. Hydrodynamique	5
2.2.2. Aménagement portuaire et touristique.....	6
2.2.3. Rejets Urbains.....	6
2.2.4. Rejets Industriels.....	7
2.3. Retour d'expérience	8
3. Le modèle de l'Étang de Berre	9
3.1. Objectifs du modèle.....	9
3.1.1. Objectifs généraux	9
3.1.2. Particularités	9
3.2. Capacité de telemac3d face à ces objectifs	10
3.3. Construction du modèle en fonction de ces elements	11
3.4. Limites du modèle	12
3.4.1. Paramétrisation	12
3.4.2. Précision	12
3.5. Synthèse	13
Annexe	13

1. LE LOGICIEL TELEMACH3D

Ce chapitre a pour objet de rappeler l'essentielle des bases, hypothèses, fonctionnalités intégrantes de TELEMACH-3D qui serviront de support à l'évaluation de ses possibilités dans le cadre de son application à l'étang de Berre.

1.1. LES EQUATIONS ET LES VARIABLES

1.1.1. EQUATIONS DE L'HYDRAULIQUE

Le logiciel TELEMACH-3D résout les systèmes d'équations aux dérivées partielles de la mécanique des fluides à trois dimensions que sont les équations de Navier Stokes et l'équation de transport-diffusion de traceurs. La méthode employée est une discrétisation par la méthode des éléments finis sur la base de maillages non-structurés constitués de triangles de tailles et de forme variables.

Les équations de Navier Stokes peuvent être résolues de manière complète avec l'équation de la pression qui fournit à son tour l'évolution de la surface libre. Il est possible de simplifier les équations sous l'hypothèse d'hydrostaticité et l'équation de la surface libre évolutive au cours du temps est alors résolue comme pour TELEMACH-2D. Une présentation détaillée des équations est fournie en annexe.

1.1.2. MAILLAGE

La structure de maillage associée à TELEMACH-3D n'est pas pleinement tridimensionnelle. En effet, le maillage horizontal est composé de triangles comme pour TELEMACH-2D, mais verticalement, le maillage est recopié un certain nombre de fois (dit plans). La structure verticale est donc régulière et la structure complète est formée de tétraèdres réguliers. Cette limitation vient à l'origine du fait que TELEMACH-3D ne fonctionnait que sous l'hypothèse d'hydrostaticité qui conduit notamment à négliger en première approximation les vitesses verticales par rapport à celles horizontales. Les écoulements étaient donc supposés quasi-bidimensionnels par couches, hypothèses parfaitement valables en mer ou dans des lacs mais pas à petite échelle, près d'obstacle. A priori, l'étang de Berre répond au critère de pression hydrostatique, comme l'a déjà exploitée le LNHE dans son modèle de l'Etang.

Comme pour la modélisation bidimensionnelle par TELEMACH-2D, la constitution du modèle numérique de terrain, composé du maillage horizontal et de la bathymétrie associée aux nœuds, revêt une importance primordiale pour l'obtention de la qualité optimum de la solution par les algorithmes des logiciels de simulation, tant en ce qui concerne la précision que la rapidité des calculs. Le logiciel de maillage, MATISSE, possède la possibilité de structurer les données bathymétriques à l'aide de la notion de lignes de contraintes (lignes 3D sur laquelle le maillage s'appuiera).

Les plans horizontaux définissant la troisième dimension dans TELEMACH-3D sont répartis entre la cote du fond et la surface. La notion de plans se traduit aussi par le fait qu'en chaque point bidimensionnel, le même nombre de points est répartis entre la surface et le fond quelque soit la profondeur d'eau. Cette technique se nomme les « coordonnées sigma ». La répartition peut suivre différentes possibilités : on peut par exemple densifier le nombre de plans près de la surface pour bien prendre en compte l'effet du vent ou près du fond pour représenter plus finement les effets de frottement. On peut encore les densifier à une certaine cote pour améliorer la précision à une interface comme une halocline ou thermocline.

1.1.3. TRACEURS

Les variations de la densité de l'eau induisent des forces génératrices sur les écoulements, présent en compte dans TELEMAC-3D sous l'hypothèse de Boussinesq. TELEMAC-3D propose la possibilité que la densité de l'eau soit fonction ou pas de la température et de la salinité (voir même de la concentration en sédiment).

La température ou la salinité de l'eau sont alors définis comme traceur passif (qui n'influence pas les écoulements) ou actif (qui génère une force agissant sur les écoulements).

C'est en particulier le cas si le milieu présente un important gradient de température/salinité (et donc de densité) entre les couches. L'action de ce fort gradient (tel que la thermocline/halocline) sur les courants est prise en compte par le logiciel TELEMAC3D. Verticalement, ce gradient agit comme une barrière en limitant les échanges entre les couches supérieures et inférieures. Horizontalement, elle peut provoquer la formation de courants secondaires par différentiel de densité. Ce type de force, bien que nommée secondaire ici, est responsable en particulier des courants géostrophiques parcourant la méditerranée ou encore génère le Gulf Stream ! De manière générale, la thermocline apparaît lorsque le mélange causé par la marée et/ou le vent est insuffisant pour détruire la stabilité de la colonne d'eau induite par les flux de chaleur en surface.

Usuellement, la salinité quand elle est exprimée en g/l présente une force 3 à 3,5 fois supérieure à la température exprimée en degrés. C'est-à-dire qu'une différence de 1g/l induit une différence de densité équivalente à celle d'une différence de 3 à 3,5 °C en température.

1.1.4. AUTRES PHENOMENES PRIS EN COMPTES

Dans le cadre des équations de la mécanique des fluides, des phénomènes physiques ou des forces complémentaires peuvent être prise en compte. Dans TELEMAC-3D les phénomènes suivants sont intégrés :

- Frottement sur le fond (variable en l'espace)
- Gestion zones découvrantes
- Force de Coriolis (variable ou non en espace)
- Phénomènes météorologiques : vent et pression atmosphérique
- Echange thermique avec l'atmosphère
- Termes sources de masse ou de mouvement
- Modélisation de la turbulence
- Possibilité transport de matières en suspensions (sédiments fins et Métaux lourds -> librairie SEDI3D)

Une description détaillée des principaux phénomènes est présentée en annexe 1.

1.2. LES CONDITIONS AUX LIMITES

Sur chaque frontière les conditions aux limites qui peuvent être imposées sont les suivantes :

Pour les niveaux :

- Frontière solide (mur)
- Niveau libre
- Niveau imposé

Pour les vitesses :

- Frontière solide avec ou sans frottement
- Vitesse libre
- Vitesse imposée
- Débit imposé (calcul de la vitesse en fonction de la hauteur d'eau afin de respecter une contrainte de débit total)

D'autres conditions aux limites peuvent être appliquées :

Au fond : imperméabilité ou flux imposé (apports souterrains, rejets)

En surface : flux de température, évaporation, pluie, entraînement par le vent, ...

2. RETOUR D'EXPERIENCE SUR D'AUTRES ETUDES

2.1. INTRODUCTION

Nous présentons ci-après des exemples d'application de TELEMACH-3D à SOGREAH regroupées selon le type d'études. Cette étape a pour objet de présenter l'état de l'art actuel de l'utilisation de TELEMACH_3D à SOGREAH.

TELEMACH-3D est employé depuis 1993 à SOGREAH. L'expérience de SOGREAH sur TELEMACH-3D est aussi longue que celle de TELEMACH-2D. Le nombre d'études réalisées est cependant moins conséquent : environ 25 sur TELEMACH-3D contre plus de 100 avec TELEMACH-2D.

Ces études sont listées au chapitre suivant

2.2. DESCRIPTIF DES ETUDES REALISEES

2.2.1. HYDRODYNAMIQUE

2006 (en cours) – Estuaire de la Loire : Etude numérique de la l'estuaire de la Loire et de la Loire aval sur plus de 100km, en hydrodynamique, salinité et sédimentologie. Etude multi-disciplinaire par modélisation d'appui et d'expertise pour le compte de la CMB afin de tester les propositions de scénario alternatif dans le cadre du Programme Interrégional Loire Grandeur Nature

- ↳ Etude par modélisation tridimensionnelle hydrodynamique, haline et sédimentologique des scénarios alternatifs. Analyse des impacts respectifs.

2005 – Estuaire de la Seine : Réalisation d'un outil opérationnel de calcul des courants côtiers à partir de telemach3D.

- ↳ Etude des courants tridimensionnels dans l'estuaire sous l'influence des vents, de la marée et des apports d'eau douce de la Seine. Comparaison aux mesures disponibles au SHOM.

2005 – Estuaire de la Loire : Réalisation d'un outil opérationnel de calcul des courants côtiers à partir de telemach3D.

- ↳ Etude des courants tridimensionnels dans l'estuaire sous l'influence des vents, de la marée et des apports d'eau douce de la Loire. Comparaison aux mesures disponibles au SHOM et à la CMB.

2005 – Mer Iroise : Réalisation d'un outil opérationnel de calcul des courants côtiers à partir de TELEMACH-3D.

- ↳ Etude des courants tridimensionnels la mer d'Iroise, incluant thermocline et halocline. Analyse de la destruction de la thermocline au niveau du plateau. Comparaison aux mesures disponibles au SHOM.

2004 – Estuaire de la Gironde : Projet de Recherche et Développement SANDPIT – Evolution morphologique des zones de prélèvement de sable et processus de transports en zone côtière : SAND PIT.

- ↳ Modélisation tridimensionnelle des processus de transport des sables et évolution morphologique de la partie terminale de l'Estuaire de la Gironde. Développement et amélioration des techniques de prédiction des évolutions morphologiques, dans TELEMACH-3D avec couplage avec la houle.

2002 – Lac du Bourget : Projet de Recherche et Développement MATE – Contribution au développement et validation d'un prototype de système d'alerte pour les proliférations de cyanobactéries toxiques dans les lacs (SACYTOX) : diagnostic et prévision.

- ↳ Modélisation tridimensionnelle des circulations dans le lac incluant le panache des rivières.

2002 – Lac d'Annecy : Projet de Recherche et Développement MATE – Contribution au développement et validation d'un prototype de système d'alerte pour les proliférations de cyanobactéries toxiques dans les lacs (SACYTOX) : diagnostic et prévision.

- ↳ Modélisation tridimensionnelle des circulations dans le lac incluant le panache des rivières.

1999 – Lac d'Annecy : Etude de la vulnérabilité de la ressource en eau potable de la ville d'Annecy :

- ↳ Modélisation tridimensionnelle de la circulation des eaux dans le lac. Etude des modes de transfert entre les sources potentielles de pollution accidentelle et les captages.

1998 – Mer Caspienne : Projet de Recherche et Développement EU- Etudes hydrologiques et hydrodynamiques et prédictions de l'élévation du niveau de la Mer Caspienne. Impact des facteurs climatiques et des activités humaines - Projet CASSEAS

- ↳ Modélisation tridimensionnelle des circulations saisonnière dans la mer caspienne avec prise en compte du bilan de masse et de chaleur à l'interface air-eau. Impact des modifications du climat sur la circulation.

1995,1997– Monaco : Etude numérique du fonctionnement hydrodynamique des eaux territoriales monégasques

- ↳ Modélisation tridimensionnelle de la circulation des eaux littorales sous l'action des courants et des vents. Extension d'Antibes jusqu'à Vintimille.

2.2.2. AMENAGEMENT PORTUAIRE ET TOURISTIQUE

1999 – Port du Verdon : Projet de construction de Terminal Méthanier au Port du Verdon - Gironde.

- ↳ Modélisation tridimensionnelle hydrodynamique et sédimentaire des impacts de la construction d'un terminal LNG au Verdon.

1998 – Ghalib : Etude de la construction d'une marina à Port Ghalib – Egypte. Etude de renouvellement des eaux de la marina.

- ↳ Modélisation tridimensionnelle hydrodynamique du renouvellement des eaux dans la marina. Dimensionnement d'un système de circulation forcée par pompage et rejet dans la marina par méthode des points sources/puits.

2.2.3. REJETS URBAINS

2004 – Rabat : Etude d'impact des deux futurs émissaires en mer des villes de Rabat et Salé sur l'environnement naturel d'un point de vue qualité des eaux.

- ↳ Modélisation tridimensionnelle de la dynamique littorale et de la dispersion des effluents (eau douce) en fonction des conditions de marée et de vent. Optimisation des rejets – positions et diffuseurs.

2004 – Tanger : Etude d'impact du futur émissaire en mer de Tanger sur l'environnement naturel d'un point de vue qualité des eaux, sédimentologie, faune et flore des fonds marins, navigation..

- ↳ Modélisation tridimensionnelle de la dynamique littorale et de la dispersion des effluents (eau douce) en fonction des conditions de marée et de vent. Optimisation des rejets – positions et diffuseurs.

2004 – Tetouan : Etude d'impact du futur émissaire en mer de Tetouan sur l'environnement naturel d'un point de vue qualité des eaux, sédimentologie, faune et flore des fonds marins, navigation..

- ↳ Modélisation tridimensionnelle de la dynamique littorale et de la dispersion des effluents (eau douce) en fonction des conditions de marée et de vent. Optimisation des rejets – positions et diffuseurs.

2002 – Ajaccio : Etude du rejet des effluents d'une unité de traitement des eaux usées d'Ajaccio via un émissaire en mer afin de déterminer les impacts au niveau des sites touristiques (plages). En fonction de ces caractéristiques prévisionnelles, on détermine les niveaux de concentration maximale en coliformes admissible à l'émission.

- ↳ Modélisation tridimensionnelle de la dispersion des effluents (eau douce) en fonction des conditions de vent et de circulation (TELEMACH-3D)

2001 – Portigliolo: Etude du rejet des effluents d'une unité de traitement des eaux usées du secteur de Portigliolo via un émissaire en mer afin de déterminer les impacts au niveau des sites touristiques (plages).

- ↳ Modélisation tridimensionnelle de la dispersion des effluents (eau douce) en fonction des conditions de vent et de circulation (TELEMACH-3D)

1998 – Monaco : Etude du devenir des eaux usées issues de la station de pré-traitement des eaux usées de Monaco

- ↳ Modélisation tridimensionnelle de la dynamique littorales et de l'évolution des eaux usées issues de la station de pré-traitement des eaux usées de Monaco sous l'action des courants et des vents.

2.2.4. REJETS INDUSTRIELS

2002, 2004 – Asaluyeh : Etude hydrodynamique du système de refroidissement par eau de mer de du nouveau complexe industriel pétrochimique de SHELL à Asaluyeh – Golfe persique.

- ↳ Modélisation tridimensionnelle de la circulation thermique en mer issue des différentes installations sur le site, en fonction des conditions maritimes et du vent.

2002 – Dunkerque : Etude hydrodynamique du système de refroidissement par eau de mer de la future unité de production électrique combinée située dans le port Est de Dunkerque.

- ↳ Modélisation tridimensionnelle de la circulation thermique dans le port de Dunkerque sous l'action des apports fluviaux, maritimes et du vent.

2002– Ras Laffan : Etude numérique de la recirculation du rejet thermique pour le système de refroidissement par eau de l'unité de production électrique du complexe industriel de Ras Laffan, de l'unité de dessalement des eaux et de la prise d'eau.

- ↳ Modélisation tridimensionnelle de la circulation thermique, haline et de chlore issue des différentes installations sur le site, en fonction des conditions maritimes et du vent.

2002– Oman : Etudes hydrauliques et environnementales du réseau de prise d'eau et de rejet de l'eau de refroidissement du complexe de production d'engrais OMIFCO.

- ↳ Modélisation tridimensionnelle du rejet et étude de la recirculation thermique, en fonction des conditions maritimes et du vent.

1998-2002– Manjung : Etude du rejet de la centrale thermique de Manjung. Optimisation du rejet – position et diffuseurs.

- ↳ Modélisation hydrodynamique bi et tridimensionnel du régime des écoulements au droit du site, en fonction des conditions maritimes et du vent.

1998– Hoping : Etude du rejet de la centrale thermique de Hoping - Taiwan. Optimisation du rejet en position.

- ↳ Modélisation hydrodynamique tridimensionnelle du régime des écoulements au droit du site, en fonction des conditions maritimes et du vent.

1996– Yemen : Etude du terminal méthanier de Bal Haf. Etude numérique de la recirculation du rejet thermique et de la prise d'eau de l'usine de liquéfaction.

- ↳ Modélisation tridimensionnelle du rejet et étude de la recirculation thermique, en fonction des conditions maritimes et du vent.

2.3. RETOUR D'EXPERIENCE

L'ensemble de ces études nous a permis d'acquérir un savoir faire important quant à l'utilisation de TELEMAC-3D sur étude. Nous présentons ci-après, en synthèse, ce que nous pouvons estimer des capacités de TELEMAC-3D et ces limites :

- TELEMAC-3D permet de réaliser des études opérationnels complexes ou non pour des clients privés ou publiques tels que l'impact d'aménagement, dimensionnement de rejet, études d'impact, étude de recirculations, ...
- TELEMAC-3D permet de modéliser des domaines de l'ordre d'un bassin à une grande baie ou une mer.
- TELEMAC-3D permet de modéliser des domaines avec des variations d'échelle des mailles de l'ordre de la centaine voir du millier.
 - *La contrainte repose sur l'art de réalisation du maillage selon les contraintes du domaine d'étude. Notamment, le rapport de maille entre deux mailles consécutives ne doit pas dépasser raisonnablement 1,5 à 2, sauf cas particulier.*
- TELEMAC-3D permet de représenter efficacement les mouvements hydrauliques induits par les principales forces naturelles, à savoir la marée et le vent, couplés ou séparés, sans aucune difficultés. Des méthodologies spécifiques ont été développées en ce qui concerne par exemple les contraintes sur le maillage vertical pour la représentation des effets du vent.
 - *Les études sur lacs et bassins nous ont montré que la variabilité spatiale du vent peut jouer un rôle important sur les caractéristiques de cette dynamique. Une estimation de cette variabilité faite de mesures adéquates est parfois nécessaire, par exemple pour la comparaison aux mesures.*
- TELEMAC-3D permet de prendre en compte des stratifications haline et thermique. Cela implique des choix paramétriques pour leur stabilisation qui sont maîtrisés à SOGREAH.
 - *On observe parfois des détériorations de la stabilité de ces pycnoclines proche de la côte par effet numérique (problème liée au traitement du système de coordonnées sigma verticales induisant des inconsistances hydrostatiques). Il convient de vérifier pour cela la cohérence des résultats obtenus par rapport à cette problématique précise.*
- TELEMAC-3D permet d'effectuer des études hydro-sédimentaire et morphologique complexe a la fois pour les sables fins et la vase.
 - *L'utilisation de la librairie sédimentaire SEDI-3D reste cependant difficile et parfois instable. Elle est en pratique surtout utilisée dans les études de Recherches et Développement ou les études prospectives.*
- TELEMAC-3D permet d'utiliser les méthodes de points sources et puits en terme de masse, quantité de mouvement et traceurs (y compris salinité et température).
- TELEMAC-3D permet de prendre en compte une description fine du bilan de masse et thermique à l'interface air-eau afin de modéliser les variations saisonnières.
 - *Des données précises et complètes sont nécessaires tels que les flux solaires, albedo, couverture nuageuse, ... pour être appliquée.*
- TELEMAC-3D permet des études de qualité des eaux de type renouvellement des eaux, suivi bactériens, bilans organiques et oxygène dissous.
- TELEMAC-3D permet de représenter les écoulements estuariens avec influence des apports de la rivière.
 - *Les comparaisons faites avec les mesures in situ ont montré que les variations de salinité étaient bien représentées sauf en cas de stratification forte en marée de faible morte-eau. Le gradient de salinité était alors sous estimé.*

3. LE MODELE DE L'ÉTANG DE BERRE

3.1. OBJECTIFS DU MODELE

3.1.1. OBJECTIFS GENERAUX

Le modèle construit par SOGREAH a pour objectif de représenter le plus précisément possible tous les processus hydrodynamiques des écoulements présents dans l'Étang de Berre, l'étang de Bolmon, le Golf de Fos, le canal du Rove. Ces écoulements sont générés et/ou influencés par :

- Le vent
- Les zones d'échanges que sont les débits de l'Arc, la Touloubre, la Cadière, et le rejet de l'Usine de St Chamas
- La topographie et le frottement sur le fond
- La salinité
- La température de l'eau

Chacun de ces éléments, ainsi que son influence sur l'écoulement doivent donc pris en compte dans le modèle.

3.1.2. PARTICULARITES

Nous listons ci-après les particularités de la zone d'étude en identifiant les difficultés potentielles de chaque phénomène spécifique pour la modélisation :

- L'Étang de Berre se trouve dans une zone pouvant être fortement soumise au vent, les courants générés par le vent peuvent être prépondérants en termes d'hydrodynamique.
 - ↳ Les vents ne sont pas constants spatialement. Cette variabilité peu influencer à son tour l'hydrodynamique locale de l'étang. Ceci peut constituer une limite du modèle dans sa représentation quantitative et qualitative de cette dynamique.
- Certaines particularités de la zone d'étude que sont les zones d'échanges doivent être regardées avec une attention particulière. Il s'agit notamment des écoulements dans le chenal de Caronte, et le canal du Rove mais aussi les échanges de masse d'eau et de salinité par les ouvertures se trouvant entre Berre et Bolmon et entre Bolmon et le Rove.
 - ↳ L'intérêt premier ne se situe pas dans la dynamique locale autour des zones d'échanges mais bien dans l'évaluation des quantités salines et douces apportées à l'Étang qui doivent être aussi proches que possible de la réalité
- L'Étang de Berre reçoit des apports d'eau salée par le chenal de Caronte et de l'eau douce par ses affluents (l'Arc, la Touloubre, la Cadière, et le rejet de l'Usine de St Chamas). L'interface entre ces deux eaux de densité différente, et les courants ainsi générés devront être bien représentés.
 - ↳ Il convient cependant de relativiser ce point. En effet, comme énoncé sur le point précédent, l'objet essentiel pour l'étang ne réside pas dans la description fine de la dynamique locale dans les chenaux et aux abords immédiats (zones d'échanges) mais bien dans la représentation la plus fidèle possible des apports des quantités salines et douces apportées à l'Étang.
- Le chenal Caronte est large, avec une bathymétrie complexe et irrégulière. Pour obtenir une bonne représentation de courants dans ce chenal, chaque élément pouvant faire obstacle à l'écoulement, le favoriser ou le guider doit être représenté.
 - ↳ En effet les évaselements ou obstacle amortissent la propagation de la marée. Une bonne représentation de la dynamique dans l'étang passe par cette étape.

- Le canal du Rove et le canal de navigation passant au sud de l'Étang de Berre (joignant les trois frères à Martigues), ne posent pas de réels problèmes de modélisation, leurs sections sont assez simples. Cependant leur largeur relativement faible ne doit pas faire apparaître de trop nombreux petits éléments.
 - On s'attachera comme pour le canal de Caronte à bien maîtriser les déformations internes de ces canaux afin de pouvoir apprécier au mieux la propagation du niveau du plan d'eau.
- Les fenêtres et bourdigues entre Berre et Bolmon et entre Bolmon et le Rove, sont très étroites et d'une configuration géométrique très simple. La difficulté vient donc de leur petite taille et de leur grande importance en terme d'échange. Il faut parvenir à représenter correctement le phénomène, sans introduire dans le modèle de trop nombreux petits éléments qui lui feraient perdre sa fonctionnalité.
 - ↳ Leur petite taille transversale pose un problème en terme de maillage du fait de la nécessité d'augmenter sensiblement le nombre de points de calculs
 - ↳ leur importance se situe en terme d'échange entre les zones concernées. Pour parvenir à représenter correctement le phénomène sans induire de contrainte de maillage, une schématisation s'impose par une méthode de points source/puits.
- De la même manière les débouchés des différents cours d'eau (l'Arc, la Touloubre, la Cadière, et le rejet de l'Usine de St Chamas) sont de petites tailles par rapport à l'ensemble du modèle.
 - ↳ Une schématisation s'impose par une méthode de points source/puits
- Suivant les différentes zones du modèle, la profondeur d'eau varie :
 - 9 m au maximum dans l'Étang de Berre
 - 1.5 m au maximum dans l'étang de Bolmon
 - 11 m au maximum dans le chenal de Caronte
 - 1 m au maximum dans la zone séparant l'Étang de Berre et celui de Vaïne
 - 20 m au maximum dans le golf de Fos
 - ↳ La répartition des couches verticales devra permettre de représenter correctement les écoulements pour ces différentes profondeurs.

A l'énoncé de ces objectifs généraux et des particularités de la zone d'étude, nous présentons au chapitre suivant les capacités de TELEMACH-3D à traiter ces différents éléments.

3.2. CAPACITE DE TELEMACH3D FACE A CES OBJECTIFS

La comparaison entre le descriptif de TELEMACH-3d du chapitre 1, le retour d'expérience de SOGREAH et les objectifs du modèle de l'étang de Berre permettent de synthétiser les éléments suivants :

- ↳ TELEMACH-3D est apte à modéliser un domaine de la taille de la zone d'étude l'Étang de Berre, la partie maritime et l'étang de Bolmon compris.
- ↳ TELEMACH-3D est apte à représenter les forçages de la dynamique dans l'étang : propagation de la marée, vent, apports fluviaux, apport salins du Rove, apports de l'usine EDF.
- ↳ TELEMACH-3D est apte à représenter les équilibres de la température et de la salinité dans l'étang.
- ↳ TELEMACH-3D est apte à représenter les zones d'échanges et leur dynamique.
- ↳ TELEMACH-3D est apte à représenter les fenêtres et bourdigues par des techniques de points sources/puits en terme de masse mais aussi en terme de température et de salinité.

Le seul point qui présente un risque de dépassement des capacités du logiciel est la représentation fine des stratifications importantes en particulier dans le canal du Rove et le chenal de Caronte. Néanmoins, comme présenté au chapitre 3.1.2, l'intérêt premier de la présente étude ne se situe pas dans la représentation fine de la dynamique locale autour des zones d'échanges mais bien dans l'évaluation des quantités salines et douces apportées à l'Etang. Celles-ci doivent être aussi proches que possible de la réalité et pour cela, les gradients de salinité dans ces zones d'échanges doivent être au moins approchés à minima. Une analyse fine de ce point devra être vérifiée en cours d'étude. Les études réalisées en estuaire telle que la Loire et la Seine nous ont montré que ce processus était respecté qualitativement en condition de morte-eau, même s'il ne l'est parfois pas quantitativement.

3.3. CONSTRUCTION DU MODELE EN FONCTION DE CES ELEMENTS

Les solutions envisagées pour chacun des points présentés dans le chapitre 3.1 sont décrites ci-dessous.

- La zone d'étude inclura l'extension en mer et l'étang de Bolmon. Le maillage horizontal sera construit selon les contraintes énoncées, notamment en termes de précision et d'opérationnalité. Le nombre total de points envisagés est de l'ordre de 3000 points. Verticalement, le nombre de plans envisagé est de l'ordre de la dizaine, avec un raffinement près de la surface pour une meilleure prise en compte de l'entraînement induit par le vent et des effets de stratification en surface notamment induit par les apports d'eaux douce.
- Pour le Chenal de Caronte, la densité importante des points de bathymétrie dont nous disposons nous a permis d'avoir une bonne représentation de la bathymétrie de ce chenal et de choisir ainsi les sections les plus représentatives. Ces sections ont été simplifiées en quelques points. On obtient donc un maillage assez léger (5 à 7 points en largeur), mais qui respecte au mieux les sections et la manière dont elles se succèdent. Cette méthode permet d'obtenir des courants correspondant tout à fait à la réalité, et de faire transiter les bons volumes.
- Dans le Canal du Rove ont été levé un profil en long et 19 profils en travers. A partir de ces éléments des profils en travers simplifiés (profils en U) ont été construits, ces profils conservent la section qui se trouve réellement dans le canal, ainsi que les cotes basses. Les éléments particuliers rencontrés tels que des « talus » ou des « creux » ont également été représentés par un maillage approprié.
- Les bourdigues (ouvertures entre l'Etang de Berre et l'étang de Bolmon) et les fenêtres (ouvertures entre l'étang de Bolmon et le canal du Rove) sont représentées par un couple de points reliés par une équation. Cette équation sera écrite à partir des équations trouvées dans la littérature pour les trois fenêtres. Pour les trois bourdigues, les mesures effectuées par le cabinet Ramade permettront d'avoir une équation empirique. Ce choix de représentation permet de représenter au mieux les volumes d'eau et de salinité transitant d'un milieu à l'autre.
- Les débouchés des cours d'eau seront représentés par un point source, entouré d'un maillage suffisamment fin pour permettre à l'eau apportée de se répandre correctement dans le milieu.
- La méthodologie mise en place par EDF pour la représentation du rejet de l'usine de St Chamas sera reprise intégralement puisqu'elle a déjà fait ses preuves.

Certains points ne sont pas encore totalement fixés à ce jour et nécessiteront une analyse en cours d'étude.

- La prise en compte du vent et l'influence de sa variabilité spatiale.
- La représentation suffisamment qualitative et quantitative des échanges d'eaux de densité différentes dans le chenal de Caronte.
- La maîtrise des bilans de masse, de chaleur et de salinité dans l'ensemble du modèle et sectoriellement.

- La maîtrise des lois d'échanges des fenêtres. Les lois d'échanges pour les bourdigues étant supposée bien maîtrisée par RAMADE.

3.4. LIMITES DU MODELE

3.4.1. PARAMETRISATION

Le modèle qui sera construit est un modèle courantologique tridimensionnel prenant également en compte la salinité et la température. Il a pour objet de décrire les paramètres physiques hydrauliques du milieu, à savoir les niveaux, les vitesses, la température et la salinité. Le seul forçage physique non intégré est la houle qui ne participe pas à la dynamique générale.

Ce modèle ne permet donc pas de représenter les paramètres biologiques ou sédimentologiques. Ce modèle peut par contre évoluer par la suite dans ce sens par couplage avec des modules adéquats de la chaîne de traitement TELEMAC. Il est cependant important de signaler qu'une telle évolution nécessite de très nombreuses mesures pour son élaboration et son calage.

Le modèle sera basé sur les conditions de forçages suivantes :

- Marée
- Vent
- Débits des cours d'eau
- Débit et salinité des rejets de l'usine de St Chamas

Le modèle est déterministe, c'est-à-dire que l'utilisateur choisi les paramètres d'entrée puis analyse les résultats. Il n'intègre pas de technique d'assimilation permettant de pré-déterminer les résultats souhaités et de laisser le logiciel trouver les paramètres d'entrée nécessaires.

3.4.2. PRECISION

Ce modèle est destiné à l'étude globale de l'étang. Sa précision spatiale est liée à la taille des mailles de l'ordre de 100 mètres au minimum. Localement la taille de maille est diminuée au niveau des canaux et ports. Ainsi, ce modèle ne peut décrire avec précision les écoulements aux abords d'une plage à 5 m du bord de l'eau ou de voir l'influence d'un épi de 30 m qui n'aurait pas été spécifiquement intégré. Cependant pour une étude de détail, le modèle peut être raffiné ou servir à donner les conditions aux limites d'un modèle plus petit localisé sur la zone d'étude.

On peut voir ci contre le détail du maillage autour de la ville de Berre l'étang.



3.5. SYNTHÈSE

Il apparaît ainsi que l'ensemble des points essentiels de la modélisation des processus physiques dans l'étang de Berre ont déjà été modélisés par ailleurs par SOGREAH dans d'autres études et ne posent pas de difficultés fondamentales selon nous. Les éléments encore non fixés sont identifiés et seront suivis et analysés en cours d'étude.

ANNEXE

Equations de Navier-Stokes

Forme incompressible, non conservative, non hydrostatique :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_m \Delta U + F_x$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_m \Delta V + F_y$$

~~$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu_m \Delta W - g + F_z$$~~

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \nabla \cdot (\nu_m \nabla T) + \frac{S}{\rho}$$

Approximation de Boussinesq :

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \approx \underbrace{-\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta p}{\rho_0} \right) \frac{\partial p_{atm}}{\partial x}}_{\text{pression atmosphérique}} - \underbrace{g \frac{\partial z_s}{\partial x}}_{\text{pente surface libre}} + \underbrace{g \frac{\Delta p}{\rho_0} \frac{\partial z_s}{\partial x}}_{\text{flottabilité barotrope}}$$

$$\Delta p = p - p_0$$

Pression Hydrostatic :

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_0 g \left(1 + \frac{\Delta p}{\rho_0} \right)$$

Integration selon z

$$p = p_{atm} + \rho_0 g (\eta - z) + \rho_0 g \int \frac{\Delta p}{\rho_0} dz'$$

$$\underbrace{-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}}_{\text{flottabilité barotrope}} + \underbrace{g \frac{\partial z_s}{\partial x}}_{\text{pente surface libre}} + \underbrace{g \frac{\Delta p}{\rho_0} \frac{\partial z_s}{\partial x}}_{\text{flottabilité baroclinique}} - \underbrace{g \frac{\partial}{\partial x} \left(\int \frac{\Delta p}{\rho_0} dz \right)}_{\text{flottabilité baroclinique}}$$



... Avec l'hypothèse hydrostatique

Continuité :
$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0$$

Quantité de mouvement :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla(v \nabla U) + F_x$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla(v \nabla V) + F_y$$

Pression Hydrostatique :
$$p = p_{\text{atm}} + \rho_0 g (\eta - z) + \rho_0 g \int_z^{\eta} \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz'$$

Traceurs :
$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \nabla(v_T \nabla T) + \frac{S}{\rho}$$

Densité :
$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_c (\sigma - \sigma_0) - \alpha_T (T - T_0)]$$

$$V = \underbrace{V_m}_{\text{viscosité moléculaire}} + \underbrace{V_t}_{\text{viscosité turbulente}}$$

$$V_T = \underbrace{V_{mT}}_{\text{diffusion moléculaire}} + \underbrace{V_{tT}}_{\text{diffusion turbulente}}$$

Modèle de Turbulence

σ = salinité (mg/l)
 α_T = Coefficient de dilatation thermique
 α_c = Coefficient de contraction saline



Quelques exemples de Modèle de Turbulence $v_t = F(\text{écoulement})$

Modèles à zéro équation

- ◆ Viscosité Constante
- ◆ Longueur de Mélange (utilisée pour la direction verticale) :

$$v_{tz} = f(R_i) L_m^2 \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial z}\right)^2}$$

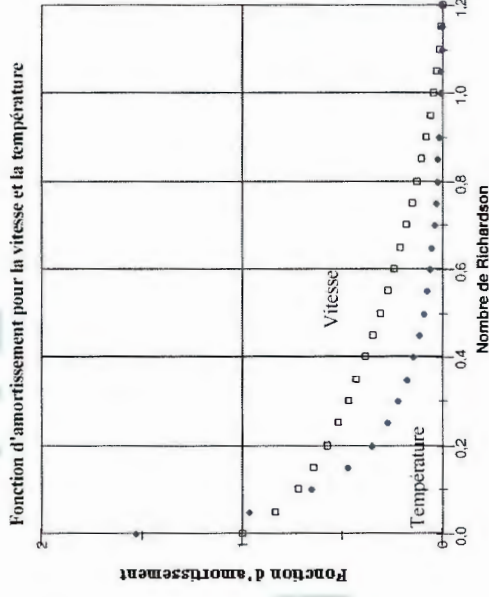
$$L_m = \kappa z$$

et

$$v_{tz} = \frac{v_t}{Pr_t} = f_r(R_i) L_m^2 \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial z}\right)^2} - \frac{g}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

Fonction d'amortissement de la turbulence :

L_m = Longueur de mélange (m)
 R_i = Nombre de Richardson
 $\kappa = 0,41$ = Constante de Karman



- ◆ Modèle de Smagorinsky horizontalement (semblable LM)



Autres forces

Force de Coriolis : $\vec{F}_c = -2\vec{\omega} \wedge \vec{U}$

$\vec{\omega}$ = vecteur rotation de la Terre (rd/s)
 $\omega = 2\pi/86164$
 $f = 2\omega =$ Coefficient de Coriolis

Frottement sur le fond : $v \frac{\partial \vec{U}}{\partial n} = -\frac{1}{2} C_f \sqrt{U^2 + V^2} \vec{U}$

C_f = Coefficient de Frottement adimensionnel
 C = Coefficient de Chézy
 K = Coefficient de Strickler

Chezy : $C_f = \frac{2g}{C^2}$ Strickler : $C_f = \frac{2g}{h^{1/3} K^2}$

Vent a la surface : $v \frac{\partial \vec{U}_s}{\partial n} = \frac{\rho_{air}}{\rho_o} K_w \|\vec{w}\| \vec{w}$

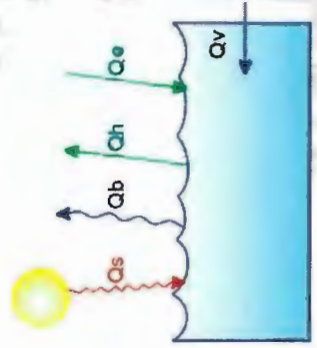
K_w = Force d'entrainement du Vent
 ρ_{air} = density de l'air = 1,29 kg/m³

Flux de chaleur a la surface (simplifiée) :

$$v_T \frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{A}{\rho_o C_p} (T - T_{air})$$

A = coefficient d'echange air / eau (W / m² / °c)
 C_p = capacité calorifique de l'eau = 4,18 J/kg / °c

Modèle interface air/eau complet : Modèle complet incluant les bilans thermiques et de masses au niveau de la surface



Flux = Qs-Qb-Qh-Qe

Qs : flux de chaleur par rayonnement solaire
Qb : flux de chaleur radiatif de grande longueur
Qh : flux de chaleur par conduction
Qe : flux de chaleur par évaporation / condensation

Variations W/m2

80 à 200
 Faibles
 0 à -40
 -50 à -160



