

Chapitre 7

Conclusion et perspectives

Ce travail de thèse avait pour objectif de mieux comprendre la dynamique de la matière particulaire et les mécanismes d'échanges côte/large, en automne et en hiver, et d'estimer les quantités de matière particulaire exportée vers le large.

L'étude réalisée a bénéficié d'un contexte d'échanges fructueux avec des expérimentateurs possédant une grande expérience sur la zone d'étude et avec des modélisateurs expérimentés. De plus, elle s'appuie sur le modèle hydrodynamique SYMPHONIE, plusieurs fois validé sur les principaux processus rencontrés dans le Golfe. L'étude conjointe de la modélisation et des observations a permis d'atteindre les objectifs fixés et de renforcer les connaissances des processus physiques et du transport particulaire dans le Golfe du Lion.

7.1 Conclusion

7.1.1 Développement et validation des modules de transport sédimentaire

Des modules de transport sédimentaire, inspirés du modèle de *Courtney Harris* [Harris et Wiberg, 2001], ont été développés et couplés au modèle d'océan côtier SYMPHONIE (chapitre 3). Ces modules permettent de différencier la remise en suspension des particules sur les fonds cohésifs et non cohésifs ainsi que de prendre en compte le processus de pavage et l'évolution de la rugosité du fond. Des données granulométriques, récoltées au cours de plusieurs campagnes en mer, ont permis d'initialiser le sédiment de fond.

Les modules de transport sédimentaire ont ensuite été confrontés aux observations afin de les valider (chapitres 4 et 6). Toutefois, cette validation a nécessité au préalable celle de la circulation (chapitres 4 et 5). En effet, un effort particulier a été fait pour s'assurer de la bonne représentation de l'hydrodynamique, nécessaire pour celle du transport sédimentaire. Des observations *in situ* récoltées lors de deux campagnes à la mer ont été utilisées pour ces exercices.

Le premier jeu de données correspond aux observations réalisées pendant l'expérience VENT, dans une région pré-littorale, en période automnale, et permet de documenter une tempête exceptionnelle. Nous avons montré que le modèle reproduisait bien la remise en suspension de particules fines lors de cette grosse tempête. Toutefois, la comparaison des sorties du modèle avec les observations est limitée spatialement au seul point de mesure. Cette étude permet aussi de souligner l'impact majeur de la tempête de vent marin sur l'ensemble de la baie. La houle est responsable de la resuspension près des côtes et les forts courants générés par le vent affectent les zones plus profondes. De plus, cette étude met

7.1 Conclusion

en évidence l'apport non négligeable de matière particulaire originaire des régions situées au Nord de la baie, influencées par des apports fluviaux. Enfin, ce travail montre l'importance du raffinement des forçages atmosphériques et de houle pour une meilleure représentation de la circulation et du transport sédimentaire dans les régions littorales.

Le second jeu de données consiste en des suivis temporels des caractéristiques hydrodynamiques et sédimentaires en un point du plateau et en tête de sept canyons sous-marins, de novembre 2003 à mai 2004 (expérience EUROSTRATAFORM), complétés lors de trois campagnes à la mer par des transects ADCP et CTD. Le modèle restitue de façon satisfaisante les processus saisonniers (plongée d'eau dense) et "événementiels" (tempête, crue), observés sur le plateau et sur la pente.

Il faut noter que la comparaison observations/modèle est difficile pour cette période. En effet, les instruments de mesure sont localisés dans des canyons sous-marins qui représentent des systèmes géomorphiques complexes, car notamment très étroits, et au sein desquels les caractéristiques hydrologiques et courantologiques peuvent fortement varier spatialement. Notamment, dans les chapitres 5 et 6, nous avons montré que les plongées d'eau dense et les panaches turbides associés s'écoulent préférentiellement sur le flanc sud dans le canyon du Cap Creus. Il est donc difficile d'aller au-delà d'une validation qualitative de la modélisation, celle-ci nous permettant de nous assurer de la représentation des principaux processus dans la simulation.

Après validation, la modélisation a fourni une vision globale des phénomènes, a permis de mieux interpréter les données et, par conséquent, d'améliorer la compréhension des processus physiques et du transport sédimentaire sur la zone d'étude. Elle est de plus apparue suffisamment précise pour permettre de quantifier les flux aux différentes interfaces.

7.1.2 Mécanismes physiques contrôlant les échanges côte/large

La période de l'expérience EUROSTRATAFORM a été marquée par deux fortes tempêtes de vent marin. Cette expérience a alors offert l'opportunité d'étudier le rôle des forts vents de sud-est dans les échanges côte/large (chapitre 5).

La modélisation a permis de montrer que les tempêtes de sud-est induisent la convergence et l'accélération du courant dans la partie sud-ouest caractérisée par un rétrécissement du plateau et favorisent par conséquent l'exportation d'eau du plateau dans les canyons du Cap Creus et de Lacaze-Duthiers, situés dans cette région.

Lors de la tempête automnale, la stratification de la colonne d'eau limite l'advection des eaux légères,

chaudes et peu salées, du plateau à 300 m de profondeur, ce qui explique l'exportation privilégiée en surface simulée.

Les conditions hivernales génèrent des différences dans les processus d'exportation pendant la deuxième tempête qui a lieu en février. En effet, celle-ci interagit avec les plongées d'eau dense, formée lors de coups de vent de nord associés à d'intenses pertes de chaleur. L'eau du plateau est alors essentiellement exportée le long du fond vers les parties plus profondes des canyons.

Par ailleurs, nous avons montré que les tempêtes étaient responsables de l'évacuation d'une grande quantité d'eau du plateau et notamment que les quantités d'eau dense exportée pendant ces événements brefs et intenses sont du même ordre de grandeur que celles transférées par le processus de plongée d'eau dense qui s'étale sur plusieurs semaines, au cours l'hiver étudié.

Ce travail a donc montré que les tempêtes de sud-est avaient une influence significative sur le renouvellement des eaux du Golfe du Lion.

7.1.3 Transport sédimentaire dans le Golfe du Lion

Les tempêtes de sud-est

Cette étude a également mis en évidence l'impact majeur des tempêtes de sud-est sur le transport et le remaniement sédimentaires sur l'ensemble du plateau (chapitre 6).

Lors de ces épisodes énergétiques, l'interaction houle/courant est responsable de la remise en suspension de particules jusqu'à 50 m de profondeur tandis que les intenses courants sur le plateau externe génèrent la resuspension près de la bordure du plateau. Les quantités de matière particulaire remise en suspension par les tempêtes automnale et hivernale sont estimées respectivement à 5 et 10 M de tonnes.

Une partie de la matière remise en suspension est ensuite advectée par la circulation cyclonique dans la partie sud-ouest du Golfe. Les flux calculés à travers la pente montrent que les canyons situés à l'Ouest représentent des conduites naturelles de la matière vers le large. En particulier, le canyon du Cap Creus apparaît comme la voie d'exportation privilégiée.

Bilan sur la période d'étude

Finalement, ce travail a permis d'estimer le budget de matière du plateau aux différentes interfaces sur une période de huit mois.

A la fin de la période d'étude, environ 5 M de tonnes de matière particulaire ont été apportées par

7.2 Perspectives

le Rhône (figure 7.1). Une grande partie de cette matière s'accumule majoritairement à l'Est au niveau du prodelta et une seconde partie est exportée vers le large par le panache de surface. Le budget érosion/dépôt correspond à un déficit global de 6 M de tonnes de matière, en incluant le dépôt des apports par les rivières. Nous avons cependant montré que l'érosion a lieu principalement pendant les fortes tempêtes et qu'elle est localisée surtout sur les plateaux interne et externe, pendant cette période. Enfin, nous avons estimé l'exportation de matière du plateau à 9 M de tonnes au cours de cette période (5.5 M t vers le large, 3.5 M t vers le plateau espagnol). La matière est exportée en grande partie dans la région sud-ouest vers le large à travers le canyon du Cap Creus (3.5 M de tonnes) et le long de la côte vers le plateau espagnol (3.5 M de tonnes).

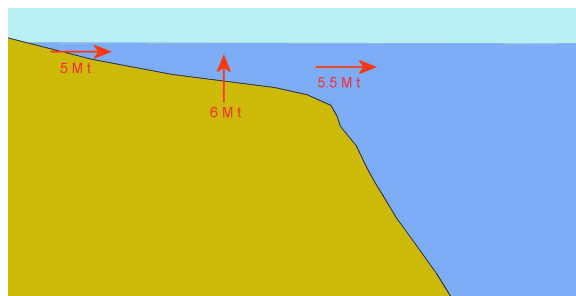


Fig. 7.1 – Schéma des flux aux différentes interfaces : eau/sédiment, eau/continent et plateau/large obtenus à travers la modélisation pour la période de l'expérience EUROSTRATAFORM.

Toutefois, ces quantités sont calculées pour une période, marquée par une crue du Rhône exceptionnelle et par un grand nombre d'épisodes de vent marin.

7.2 Perspectives

Ce travail offre des perspectives à court terme et à plus long terme. Il s'agit dans un premier temps d'améliorer la modélisation de l'hydrodynamique et du transport sédimentaire, en la reliant toujours aux observations, puis de continuer à exploiter l'outil mis en place pour l'étude d'autres processus et/ou régions. Dans un second temps, cette modélisation des processus physiques et sédimentaires pourrait être couplée à la modélisation des processus biogéochimiques, benthique et pélagique, afin de mieux reproduire et prédire le fonctionnement de l'écosystème côtier et quantifier les bilans des éléments biogéniques.

7.2.1 Vers plus de réalisme

Le modèle de transport sédimentaire mis en place a permis d'obtenir des résultats satisfaisants mais de nombreuses améliorations peuvent y être apportées. Nous présentons ci-après les problèmes soulevés lors de ce travail et proposons des perspectives d'amélioration.

Meilleure représentation du sédiment de fond

La représentation du sédiment de fond pourrait être améliorée par l'ajout de nouvelles données granulométriques représentatives du plateau externe. En effet, les données utilisées dans le cadre de ces travaux n'ont pas permis de bien représenter la fraction de sable relique dans cette région [Monaco et Aloisi, 2001]. L'estimation des flux de matière dans les canyons situés à l'Ouest et au centre du Golfe s'en trouverait améliorée.

La variabilité spatiale de la porosité, horizontalement et verticalement dans le sédiment, permettrait également d'obtenir une représentation plus réaliste du sédiment. Ceci nécessiterait de prendre en compte les processus de consolidation et de liquéfaction du sédiment.

Couplage houle/courant

Près de la côte et en conditions de mer développée, la circulation interagit avec la houle. En effet, les études de modélisation de l'expérience VENT (chapitre 4) et de l'expérience EUROSTRATAFORM sur le prodelta de la Têt (chapitre 5) ont mis à chaque fois en évidence pendant les épisodes de vent du large des écarts d'intensité de courant entre les observations et les sorties du modèle dans des régions situées entre 20 et 30 m de profondeur. Les travaux de thèse de Cléa Denamiel (Laboratoire Dynamique de la Lithosphère) devraient permettre de mieux prendre en compte cette interaction qui a des conséquences sur la resuspension et la dispersion des particules en suspension.

Meilleure représentation des processus d'agrégation

Le processus d'agrégation joue aussi un rôle important sur la dispersion des particules fines et leur exportation vers le large. En effet, lorsque des particules fines s'agrègent entre elles, leur vitesse de chute augmente. Ce processus a été implémenté de manière très empirique dans cette étude. Il est sûrement important de mieux quantifier la fraction d'agrégats dans le modèle, au niveau des rivières, du plateau et des canyons, à travers une modélisation du processus d'agrégation et l'utilisation de données telles

7.2 Perspectives

que les observations caméra sur le prodelta de la Têt pendant l'expérience EUROSTRATAFORM, ou issues d'expériences en laboratoire (*Laurenz Thomsen de l'Université Internationale de Bremen*).

Apports particuliers

Il faudrait prendre en compte les apports de matière atmosphérique et les apports biologiques issus de la production primaire qui influencent les flux de matière dans le Golfe du Lion [*Monaco et al., 1990*], ceci afin de réaliser des cycles annuels. Par ailleurs, la resuspension induite par le chalutage pourrait être également intégrée dans les bilans de matière sur la base des travaux de *Bénédicte Ferré* [2004].

Estimation des erreurs

Enfin, il paraît essentiel de réaliser des validations plus quantitatives du modèle et d'estimer les erreurs sur les résultats du modèle.

Les erreurs du modèle hydrodynamique ont été et sont étudiées dans la zone d'étude par *Francis Auclair* (LA) [*Auclair et al., 2002*] et *Claire Dufau* (LEGOS), respectivement, à travers des simulations d'ensemble. Celles-ci sont nettement plus faibles que celles des modules de transport sédimentaire : d'une part, ces derniers reposent sur de nombreuses paramétrisations, d'autre part, les incertitudes du modèle hydrodynamique viennent se superposer aux erreurs liées à ces paramétrisations. Il faut également préciser que les processus biogéochimiques complexes peuvent transformer la matière particulaire et par conséquent augmentent les incertitudes des résultats de ces modules.

Dans le chapitre 4, des études de sensibilité ont été réalisées afin de mieux apprécier les incertitudes liées aux paramètres d'érosion. Il a été montré que les résultats du modèle étaient très sensibles au paramètre d'érosion E_0 . Des simulations d'ensemble sur les différents paramètres des modules et sur les données d'entrée (granulométrie du sédiment, débit solide des rivières) permettraient d'approfondir cette étude préliminaire des erreurs.

7.2.2 Autres utilisations pour l'étude de la dynamique sédimentaire

Les résultats satisfaisants des modules de transport sédimentaire, obtenus au cours de ces travaux, permettent d'envisager leur utilisation pour l'étude d'autres processus et/ou d'autres régions.

Etude d'autres processus

Le modèle a permis d'étudier des processus automnaux et hivernaux pour une période caractérisée par des événements exceptionnels. Il serait maintenant intéressant d'estimer des bilans de matière pour une période automne/hiver plus "classique". Par ailleurs, une expérience réalisée par les équipes européennes et nord américaines impliquées dans EUROSTRATAFORM lors de l'hiver 2004/2005 dans le Golfe du Lion donne la possibilité d'appliquer ces modules à une période marquée par d'intenses plongées d'eau dense qui ont atteint le fond du bassin.

Il serait aussi intéressant d'étudier le transport sédimentaire lié aux processus estivaux. L'expérience MOOGLI2, dont la modélisation hydrodynamique est actuellement effectuée par *Claire Dufau* (POC), a été réalisée au cours de l'été 1998 et représente alors l'opportunité d'évaluer l'impact d'autres mécanismes physiques, tels que les ondes internes, sur le transport de la matière particulaire.

Enfin, une modélisation pluri-annuelle de l'ordre de 5 à 10 ans (période de retour des tempêtes du large et des formations intenses d'eau dense) permettrait d'éclaircir certaines questions qui restent en suspens et en particulier le transfert de la matière issue du Rhône vers l'Ouest du domaine. En effet, différents travaux montrent que les apports du Rhône s'accumulent sur le prodelta à l'Est du Golfe. Par ailleurs, la matière exportée est largement érodée dans la partie sud-ouest du Golfe. Il serait intéressant de voir sur une grande échelle de temps comment se font les transferts de matière entre la partie est et la partie ouest du domaine.

Etude d'autres régions

Les modules de transport sédimentaire pourraient être aussi appliqués à des régions méditerranéennes où des processus similaires sont rencontrés mais avec des intensités différentes (Golfe de Thermaïkos), puis d'autres régions où la dynamique sédimentaire est complexifiée par des mécanismes tels que la marée (Golfe de Gascogne). Une modélisation réaliste de l'hydrodynamique dans les deux régions citées précédemment a déjà été menée [*Estournel et al.*, 2005] ou est en cours de développement au Pôle d'Océanographie Côtière [*Pairaud*, 2002]. La modélisation du transport sédimentaire nécessiterait de réunir des informations sur la nature du sédiment dans ces deux régions.

Enfin, les outils étant au point, on pourrait les appliquer à des systèmes plus importants quantitativement à condition d'accompagner cette modélisation d'une demande expérimentale comme il a été fait dans EUROSTRATAFORM qui s'est avérée un succès de ce point de vue. Un bilan global de la

7.2 Perspectives

contribution de la zone côtière méditerranéenne au bassin profond pourrait être modélisé. De même, une zone comme l'Amazonie qui draine les plus grosses quantités de matière continentale devrait faire l'objet d'étude de ce type dans le cadre du projet Amandes déposé à l'OMP à l'ANR.

Suggestions pour la mise en place d'une stratégie d'observations

L'outil mis en place pourrait aider à l'élaboration de futures expériences.

La modélisation met en évidence l'érosion de matière sur le plateau externe, en particulier dans la région sud-ouest, pendant les tempêtes de vent marin. Il serait intéressant de placer des instruments mesurant les courants, la turbidité et l'évolution du niveau de sédiment sur le plateau externe. Par ailleurs, plus d'1/3 de la matière exportée transite sur le plateau vers le mer Catalane. Un mouillage fixé entre le Cap Creus et le canyon permettrait de faire des mesures dans la région où les flux simulés sont les plus importants.

Ces travaux ont également montré qu'en automne, saison où le nombre de tempêtes est statistiquement le plus important [Ferré *et al.*, 2005], une grande quantité de la matière était exportée vers le large près de la surface en raison de la stratification. Pour évaluer les flux de matière, il serait alors intéressant de placer les instruments de mesures dans la couche de surface au niveau du canyon du Cap Creus. D'autre part, la modélisation montre qu'une grande quantité de matière et d'eau froide advectées dans le canyon du Cap Creus s'écoule sur son flanc sud, puis sur la pente espagnol jusqu'au canyon de La Fonera. Là aussi, des instruments fixés dans cette partie du canyon et de l'interfluve, entre les isobathes 200 et 500 m, permettraient de vérifier ces résultats.

Aide à la résolution de problèmes environnementaux

Cet outil pourrait être aussi utilisé pour aider à résoudre des problèmes environnementaux comme le devenir des contaminants liés à la matière particulaire ou sous leur forme dissoute. On pourrait envisager alors cette étude à travers par exemple un couplage des modules développés avec une modélisation du cycle des contaminants chimiques.

7.2.3 Vers une meilleure représentation du fonctionnement de l'écosystème

Ce travail pourrait aider à une meilleure modélisation et compréhension de l'écosystème côtier.

Couplage du modèle hydrodynamique avec un modèle biogéochimique

Cette étude a mis en évidence l'impact majeur des tempêtes sur l'exportation de la matière particulaire vers le large. De plus, les épisodes de vent de sud-est modérés qui ont lieu au printemps pourraient être responsables de l'exportation vers le large de blooms phytoplanctoniques. L'utilisation des sorties du modèle hydrodynamique pour la modélisation de la biogéochimie, réalisée par des collègues du Centre d'Océanologie de Marseille, associée à l'analyse du matériel recueilli dans les pièges à particules, pourrait alors nous renseigner sur le transfert vers le large de matière organique associé aux vents de sud-est.

Couplage des processus hydro-sédimentaires-biogéochimiques

Nous avons montré l'effet essentiel des tempêtes sur la resuspension de particules sur le plateau du Golfe du Lion. Or, la resuspension est associée à un relargage significatif de matière organique et inorganique dans la colonne d'eau qui peut influencer la production primaire et bactérienne. Inversement, les processus biologiques, biogéochimiques et physico-chimiques peuvent affecter le transport sédimentaire dans la colonne d'eau en période de bloom phytoplanctonique sous l'effet de la neige marine par exemple, et dans le sédiment, à travers la dégradation de la matière organique ou la bioturbation.

Un couplage du modèle hydro-sédimentaire avec des modèles pélagiques et benthiques permettrait alors d'intégrer les interactions entre les différents processus. L'intérêt de ce couplage résiderait dans une meilleure prévision de l'impact des facteurs naturels et anthropiques sur l'écosystème et d'une quantification du rôle de la marge côtière sur le carbone et sa séquestration.