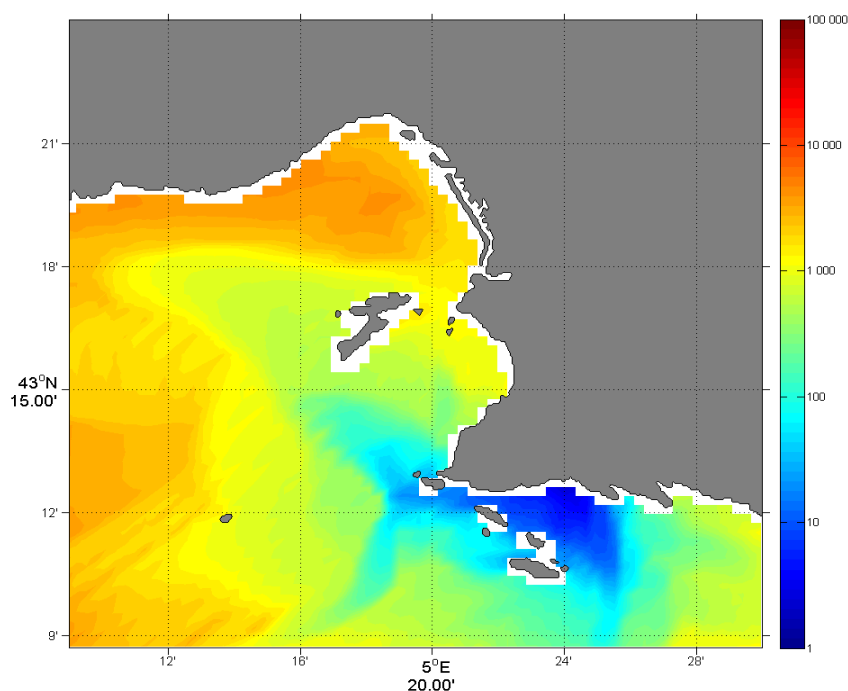


METROC : modélisation idéalisée de substances dissoutes et particulaires rejetées en rade de Marseille



METROC : modélisation idéalisée de substances dissoutes et particulaires rejetées en rade de Marseille

Fiche documentaire

Numéro d'identification du rapport : RST.ODE/LER/PAC/12-21 Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> Validé par : Bruno Andral Adresse électronique : bruno.andral@ifremer.fr		date de publication : août 2012 nombre de pages : 56 bibliographie : oui illustration(s) : oui langue du rapport : français
Titre de l'article METROC : modélisation idéalisée de substances dissoutes et particulaires rejetées en rade de Marseille		
Contrat n° - Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>		
Auteurs principaux : C. Jany I. Pairaud B. Thouvenin R. Verney	Organisme / Direction / Service, laboratoire IFREMER/LER/PAC (Toulon) IFREMER/LER/PAC (Toulon) IFREMER/ODE/DYNECO/PHYSED (Brest) IFREMER/ODE/DYNECO/PHYSED (Brest)	
Encadrement(s) :		
Cadre de la recherche : METROC		
Destinataire :		
<p>Résumé Dans le cadre du projet METROC, des simulations idéalisées de substances dissoutes et particulaires ont été réalisées à l'aide du modèle hydrosédimentaire MARS3D. Pour les substances dissoutes, des temps d'évacuation et des temps de séjour ont été calculés. On a aussi tracé des cartes de dilution minimale et percentile afin de faire le rapprochement entre la simulation et des rejets réalistes de métaux dissous. Pour les substances particulaires, des bilans de substances exportées, sédimentant ou restant en suspension dans l'eau ont été établis pour trois périodes (simulation entière 13 octobre – 31 décembre 2008, situation de crue, situation de remise en suspension). Des cartes de la rade de Marseille complètent ces informations et permettent de visualiser les zones principales de sédimentation. La poursuite de ce travail s'envisage par la modélisation d'un contaminant réel (Plomb).</p>		
<p>Abstract In the context of the METROC project, academic modelling of dissolved and particulate materials were done with the MARS3D model. Considering the dissolved materials, we calculated evacuation times and residence times. Then, we add minimal dilution and percentile maps to assimilate the modelling and the realistic dissolved metal discharge. Considering the particulate materials, we did balance sheets for material exported, sedimenting or staying in water for three different phases (whole modelling 13 October – 31 December 2008, flood situation and resuspension situation). Maps of Marseille roadstead complete that information and allow visualising the principal deposition area. We will continue this work by modelling reel material such as Lead.</p>		
Mots-clés Simulation, MARS3D, substances dissoutes, substances particulaires, matières en suspension, temps de séjour, temps d'évacuation Words keys Modelling, MARS3D, dissolved material, particulate material, suspended load, residence time, evacuation time		

sommaire

Liste des figures	5
Liste des tableaux.....	7
1. Présentation du rapport	9
2. Présentation du modèle et de la zone d'étude	10
2.1. Modèle hydro-sédimentaire MARS-3D.....	10
2.1.1. Le modèle hydrodynamique.....	10
2.1.2. Le modèle hydrosédimentaire.....	12
2.2. Conditions hydrodynamiques de la zone d'étude.....	14
3. Modélisation des substances dissoutes	14
3.1. Méthodologie.....	14
3.2. Résultats	17
3.2.1. Temps d'évacuation.....	17
3.2.2. Temps de séjour	19
3.3. Cartes de dilution	20
3.3.1. Cortiou.....	20
3.3.2. Aygalades	23
3.3.3. Déversoirs d'orage.....	25
3.3.4. Les torrents.....	26
3.4. Synthèse sur la modélisation de substance dissoute.....	27
4. Modélisation des substances particulières.....	28
4.1. Méthodologie.....	28
4.2. Résultats de l'étude des bilans.....	30
4.2.1. Courbes de bilans	30
4.2.2. Bilan sur la période entière (octobre – décembre 2008).....	31
4.2.3. Bilan sur un épisode de crue du 02/11/08 au 06/11/08.....	37
4.2.4. Bilan sur un épisode de remise en suspension du 26/11/08 au 01/12/08	46
4.2.5. Synthèse des bilans pour les 3 épisodes analysés.....	51
5. Conclusion	53
6. Bibliographie	55

Liste des figures

Figure 1 – Domaine de modélisation RHOMA et bathymétrie de la zone d'étude.	11
Figure 2 – Couverture sédimentaire initiale pour la variable SAND (sable).....	13
Figure 3 – Couverture sédimentaire initiale pour la variable MES L (légères).....	13
Figure 4 – Couverture sédimentaire initiale pour la variable MES H (lourdes).....	13
Figure 5 – Carte des rejets et de leurs emplacements dans le modèle MARS3D. Les rejets de la rade nord sont marqués d'un (N), ceux de la rade sud d'un (S) et celui de Cortiou d'un (C).....	15
Figure 6 – Zones bilans pour les simulations sur le dissous	15
Figure 7 – Exemple de différenciation entre le temps de séjour et le temps d'évacuation sur un rejet des Aygalades pour la boîte bilan de Marseille en 2008. En rouge, l'intervalle de temps pris pour le temps d'évacuation, en noir, celui pris pour le temps de séjour pour le même rejet de crue.....	16
Figure 8 – Carte de minimum de dilution pour la période avril – juillet 2007, pour le rejet de Cortiou.....	21
Figure 9 – Carte de minimum de dilution pour la période septembre – décembre 2008, pour le rejet de Cortiou.	21
Figure 10 – Carte du percentile 25 de dilution pour la période septembre – décembre 2008, pour le rejet de Cortiou.....	22
Figure 11 – Carte du percentile 50 de dilution pour la période septembre – décembre 2008, pour le rejet de Cortiou.....	22
Figure 12 – Carte du percentile 90 de dilution pour la période septembre – décembre 2008, pour le rejet de Cortiou.....	23
Figure 13 – Carte de minimum de dilution pour la période avril – juillet 2007, pour le rejet des Aygalades.....	24
Figure 14 – Carte de minimum de dilution pour la période septembre – décembre 2008, pour le rejet des Aygalades.....	24
Figure 15 – Exemple de figures bilans pour les substances lourdes sur un rejet de Bonneveine pour la boîte bilan de Marseille en 2008.....	30
Figure 16 – Hydrogramme de Cortiou du 01/11/2008 au 07/11/2008. On distingue les deux pics de l'épisode de crue le 02 novembre 2008 vers 18h et le 04 novembre 2008 vers 18h aussi.	37
Figure 17 – Stock de substances légères pour le rejet de Bonneveine avant la crue le 02/11/2008 (à gauche) et après la crue le 06/11/2008 (à droite). Les unités sont indicatives et servent uniquement à la comparaison avant/après, la simulation étant idéalisée et les concentrations en substance dans le sédiment purement théoriques.....	38
Figure 18 – Stock de substances légères pour le rejet de Cortiou avant la crue le 02/11/2008 (à gauche) et après la crue le 06/11/2008 (à droite). Les unités sont indicatives et servent uniquement à la comparaison avant/après, la simulation étant idéalisée et les concentrations en substance dans le sédiment purement théoriques.....	38
Figure 19 – Stock de substances légères pour le rejet des Aygalades avant la crue le 02/11/2008 (à gauche) et après la crue le 06/11/2008 (à droite). Les unités sont indicatives et servent uniquement à la comparaison avant/après, la simulation étant idéalisée et les concentrations en substance dans le sédiment purement théoriques.....	39
Figure 20 – Stock de substances lourdes pour le rejet de Cortiou avant la crue le 02/11/2008 (à gauche) et après la crue le 06/11/2008 (à droite). Les unités sont	

indicatives et servent uniquement à la comparaison avant/après, la simulation étant idéalisée et les concentrations en substance dans le sédiment purement théoriques.....	40
Figure 21 – Stock de substances lourdes pour le rejet de l’Huveaune au Prado avant la crue le 02/11/2008 (à gauche) et après la crue le 06/11/2008 (à droite). Les unités sont indicatives et servent uniquement à la comparaison avant/après, la simulation étant idéalisée et les concentrations en substance dans le sédiment purement théoriques.	41
Figure 22 – Variation de la hauteur significative des vagues en fonction du temps à Cortiou (d’après Verney R. 2012).....	46
Figure 23 – Stock de substances légères pour le rejet de Cortiou avant l’épisode de remise en suspension le 26/11/2008 (à gauche) et après l’épisode le 01/12/2008 (à droite). Les unités sont indicatives et servent uniquement à la comparaison avant/après, la simulation étant idéalisée et les concentrations en substance dans le sédiment purement théoriques.....	47
Figure 24 – Stock de substances légères pour le rejet de l’Huveaune au Prado avant la remise en suspension le 26/11/2008 (à gauche) et après l’épisode le 01/12/2008 (à droite). Les unités sont indicatives et servent uniquement à la comparaison avant/après, la simulation étant idéalisée et les concentrations en substance dans le sédiment purement théoriques.....	47
Figure 25 – Stock de substances lourdes pour le rejet de Bonneveine avant la remise en suspension le 26/11/2008 (à gauche) et après l’épisode le 01/12/2008 (à droite). Les unités sont indicatives et servent uniquement à la comparaison avant/après, la simulation étant idéalisée et les concentrations en substance dans le sédiment purement théoriques.	48
Figure 26 – Stock de substances lourdes pour le rejet des Aygalades avant la remise en suspension le 26/11/2008 (à gauche) et après l’épisode le 01/12/2008 (à droite). Les unités sont indicatives et servent uniquement à la comparaison avant/après, la simulation étant idéalisée et les concentrations en substance dans le sédiment purement théoriques.	48
Figure 27 – Stock de substances lourdes pour le rejet de Cortiou avant la remise en suspension le 26/11/2008 (à gauche) et après l’épisode le 01/12/2008 (à droite). Les unités sont indicatives et servent uniquement à la comparaison avant/après, la simulation étant idéalisée et les concentrations en substance dans le sédiment purement théoriques.	49

Liste des tableaux

Tableau 1 – Tableau récapitulatif des différents temps d'évacuation (en jour) selon les rejets, les boîtes considérées et les périodes.	18
Tableau 2 – Tableau récapitulatif des différents temps de séjour selon les rejets, pour la boîte de Marseille et pour les deux périodes confondues, avril – juillet 2007 et septembre – décembre 2008.	19
Tableau 3 – Récapitulatif des métaux dissous mesurés dans la rade de Marseille et liste de leur distance maximale par rapport au rejet. Rejet dans lequel a été mesurée la valeur maximale obtenue (E) Emissaire 2, (H) Huveaune, (J) Jarret. Données bibliographiques : (a) Cossa et al, 1997, (b) J.F. Chiffoleau, comm. perso. (2012), (c) Yong, Y.Y. 1994, (d) bruit de fond, Morley et al., 1997.	20
Tableau 4 – Récapitulatif des distances indicatives auxquelles peuvent être observées les différents métaux pour le rejet de Cortiou pour les périodes avril – juillet 2007 et septembre – décembre 2008 selon leur facteur de dilution théorique calculée.	21
Tableau 5 – Récapitulatif des métaux dissous mesurés dans la rade de Marseille et liste de leur distance maximale par rapport au rejet. Données bibliographiques : (a) Cossa et al, 1997, (b) J.F. Chiffoleau, comm. perso. (2012), (c) Yong, Y.Y. 1994, (d) bruit de fond, Morley et al., 1997.	23
Tableau 6 – Récapitulatif des distances indicatives auxquelles peuvent être retrouvés les différents métaux pour le rejet des Aygalades pour les périodes avril – juillet 2007 et septembre – décembre 2008 selon leur facteur de dilution théorique calculée.	24
Tableau 7 – Récapitulatif des métaux dissous mesurés dans la rade de Marseille et liste de leur distance maximale par rapport au rejet. Données bibliographiques : (a) Cossa et al, 1997, (b) J.F. Chiffoleau, comm. perso. (2012), (c) Yong, Y.Y. 1994, (d) bruit de fond, Morley et al., 1997.	25
Tableau 8 – Récapitulatif des distances indicatives auxquelles peuvent être retrouvés les différents métaux pour le déversoir d'orage Prado et le déversoir d'orage Port Autonome pour la période septembre – décembre 2008 selon leur facteur de dilution théorique calculée.	26
Tableau 9 – Récapitulatif des hypothèses de teneur en MES lourdes (H) et légères (L) dans les rejets faites pour les simulations de substances particulières présentées dans ce rapport. Certaines de ces teneurs sont liées au débit (Q) du rejet. (*DO - Déversoir d'orage).	29
Tableau 10 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte de Marseille pour la période totale simulée du 13/10/2008 au 31/12/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.	32
Tableau 11 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte de Cortiou pour la période totale simulée du 13/10/2008 au 31/12/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.	33
Tableau 12 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte Rade nord pour la période totale simulée du 13/10/2008 au 31/12/2008. Les	

masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.	34
Tableau 13 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte Rade sud pour la période totale simulée du 13/10/2008 au 31/12/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.	35
Tableau 14 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte de Marseille pour l'épisode de crue du 02/11/2008 au 06/11/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.	42
Tableau 15 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte de Cortiou pour l'épisode de crue du 02/11/2008 au 06/11/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.	43
Tableau 16 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte Rade nord pour l'épisode de crue du 02/11/2008 au 06/11/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.	44
Tableau 17 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte Rade sud pour l'épisode de crue du 02/11/2008 au 06/11/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.	45
Tableau 18 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte de Marseille pour l'épisode de remise en suspension du 26/11/2008 au 01/12/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.	50

1. Présentation du rapport

1.1. Contexte et acquis

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'action METROC - volet du projet OPRAEM piloté par l'Ifremer. METROC a pour objectif l'évaluation de la contribution des grandes métropoles à la contamination chimique de la Méditerranée Occidentale, avec comme site atelier Marseille.

Ce rapport apporte des éléments pour l'estimation des flux nets (substances dissoutes et particulaires) du champ proche vers le champ lointain, et le devenir de substances particulaires dans le champ proche, à l'aide d'une approche basée sur la modélisation hydrodynamique et hydrosédimentaire. Pour cela, nous utilisons les modèles développés par l'Ifremer, avec le soutien de l'Agence de l'Eau, dans le cadre de METROC. La phase 1 de cette action a permis de quantifier les concentrations et les flux de plusieurs substances (métaux, HAP, PCB, PBDE) dans différents types d'effluents de la ville de Marseille (réseaux hydrographiques et réseaux d'assainissement dont les débits ont été fournis grâce au soutien de l'Agence de l'Eau et de la DEA, Jany et al. 2012).

1.2. Objectifs de l'étude

Cette étude présente deux tests sur différentes substances dans la rade de Marseille grâce au modèle hydro-sédimentaire MARS-3D :

- une modélisation idéalisée de substances dissoutes conservatives, c'est-à-dire sans aucune réaction chimique avec le milieu. Les différents rejets (Aygaldes, déversoirs d'orage, émissaire...) sont distingués les uns des autres afin d'étudier leur influence de manière séparée. Ils rejettent tous la même concentration (quantité de substance dissoute par litre d'eau). Nous allons étudier les temps de séjour et d'évacuation des substances, ainsi que les cartes de dilution.

- une modélisation idéalisée de substances particulaires conservatives, sans aucune réaction chimique avec le milieu. Les différents rejets (Aygaldes, déversoirs d'orage, émissaire...) sont distingués les uns des autres afin d'étudier leur influence de manière séparée. Ils rejettent la même concentration (quantité de substance par kg de matière en suspension). Nous allons étudier les apports et la remise en suspension de ces substances particulaires ainsi que les zones d'accumulation de sédiments dans la rade de Marseille.

2. Présentation du modèle et de la zone d'étude

2.1. Modèle hydro-sédimentaire MARS-3D

2.1.1. Le modèle hydrodynamique

a) Description du modèle

Dans le cadre de cette étude sur la zone de Marseille, le modèle tridimensionnel MARS3D (3D hydrodynamic Model for Applications at Regional Scale, IFREMER ; Lazure et Dumas, 2008) est utilisé en version V8.19. Il est basé sur l'utilisation des équations primitives et des hypothèses classiques de Boussinesq et d'incompressibilité. Concernant la Méditerranée Nord-Occidentale, ce modèle a déjà été utilisé pour l'étude de la circulation océanique (André et al., 2005; André et al., 2009; Rubio et al., 2009) ainsi que pour l'étude de la dynamique sédimentaire (Dufois et al., 2008) et de la migration des larves d'anchois (Nicolle et al., 2009).

La grille horizontale est régulière, de type 'C' (Arakawa et Lamb, 1977), et des coordonnées sigma sont utilisées sur la verticale. Pour cette étude, la configuration RHOMA utilise 252x120 points de calcul sur l'horizontale, soit une résolution correspondante de 400m, sur 30 niveaux verticaux (avec raffinement de la résolution au fond et en surface). Le pas de temps des expériences présentées est fixé à 20s.

La configuration RHOMA (Rhône-Marseille) du modèle mise en place par I. Pairaud (LER PAC, IFREMER) est centrée sur la rade de Marseille et s'étend du Rhône au Cap Sicié (Figure 1). Par rapport aux études numériques relativement académiques réalisées précédemment sur la zone (par exemple dans le cadre de l'étude des récifs artificiels au large du Prado; Pradal et Millet, 2005), une attention particulière est portée ici au réalisme des simulations avec prise en compte des interactions des processus à différentes échelles. En plus de l'utilisation d'une bathymétrie réaliste, le modèle est forcé par le Rhône, l'atmosphère (vent, pluie, flux de chaleur) et la circulation générale (par une stratégie d'imbrication dans un modèle de plus grande échelle).

b) Forçage et conditions aux limites

L'état initial du modèle et les conditions aux limites sont imposés par une méthode d'emboîtement de modèles avec deux niveaux d'imbrication des grilles. Dans un premier temps, le modèle de circulation de bassin MENOR est forcé par les sorties journalières de température, salinité, courant et élévation de surface du modèle régional au 1/16° MFS (Mediterranean Forecasting System; Pinaridi et al., 2003). La configuration opérationnelle MENOR, basée sur l'utilisation d'une résolution horizontale de 1.2km et 30 niveaux verticaux, est opérée tous les jours depuis 2005. Les sorties tri-horaires de ce modèle (Nicolle et al., 2009) sont ensuite utilisées pour initialiser et forcer aux frontières la configuration RHOMA.

Le modèle est également forcé par les apports journaliers moyens en eau douce du grand Rhône déduits des mesures à la station de la Beaucaire, fournis par la Compagnie

Nationale du Rhône. L'apport moyen en eau douce sur les années 2007-2008 est de 1450 m³/s, avec des valeurs plus élevées en hiver et durant les crues de juin, novembre et décembre 2008.

Le forçage par l'atmosphère (vent, pluie et flux solaires) est fourni par le modèle MM5 (5ème génération de modèle méso-échelle PSU/NCAR, opéré par la société ACRI) toutes les 3 heures. Le choix d'un modèle à haute résolution spatiale (ici 3 à 9 kms) permet d'assurer une bonne représentation des effets orographiques sur le champ de vent et de représenter la forte variabilité des flux atmosphériques.

c) Modélisation RHOMA

Une version du modèle à 200m de résolution horizontale a été validée statistiquement sur différents jeux de données (in situ et satellitales, pour la température, la salinité et les courants) acquis en 2007-2008 (Pairaud et al., 2011 ; Pairaud et al, 2010). Les processus principaux de la zone sont reproduits par le modèle :

- upwellings sous l'action des vents de Nord-Ouest associés à des remontées d'eaux froides en été
- intrusions du panache du Rhône dans la rade de Marseille principalement au printemps
- intrusion du Courant Nord depuis le Sud du domaine.

L'étude a montré pour un cas académique de rejet dissous à Cortiou une dilution très rapide et un panache de dilution plus fin pour RHOMA que pour la simulation forçante MENOR, dont la maille plus grossière n'arrive pas à capturer la dynamique du rejet à cette échelle. Toutefois, la simulation à 200m de résolution horizontale étant très coûteuse, le forçage avec les autres modèles a nécessité de dégrader la résolution horizontale, ici à 400m, le modèle représentant toujours correctement les processus étudiés.

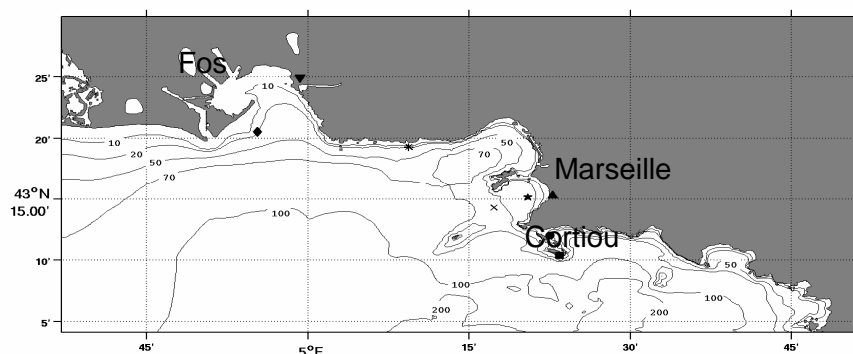


Figure 1 – Domaine de modélisation RHOMA et bathymétrie de la zone d'étude.

2.1.2. Le modèle hydrosédimentaire

La mise en place d'une configuration hydrosédimentaire nécessite la mise en œuvre d'une modélisation haute résolution des états de mer et du module sédimentaire de MARS3D adapté du modèle sédimentaire parent SiAM3D.

Le choix du modèle de vague s'est porté sur une configuration WaveWatch3 (WW3) non structurée mise en place par F. Ardhuin (IFREMER/SHOM) sur l'emprise RHOMA. Cette configuration permet d'obtenir une résolution à la côte de 150m requise pour correctement traiter l'influence des faibles profondeurs dans cette zone.

Les données de vagues sont ensuite uniquement intégrées pour calculer l'agitation au fond et les contraintes de cisaillement associées, sans calcul des tensions de radiation. Cette configuration est validée par trois jeux de données de vagues acquis durant les campagnes SCOPE07 (hiver 2007), SCOPE08 (hiver 2008) et Huveaune (printemps 2008, cf. Verney R. 2012).

Le module sédimentaire de MARS3D repose sur les différents développements réalisés successivement sur la plateforme SiAM3D. Dans le cas spécifique de la Rade de Marseille, le modèle hydrosédimentaire mise en place par R. Verney (DYNECO-PHYSED, IFREMER) n'est pas l'objectif premier mais uniquement un maillon nécessaire de la modélisation de l'écosystème et du transfert de contaminants. Il avait donc pour objectif de tourner rapidement avec un minimum de variables sédimentaires. Afin de simplifier le modèle, le sable remis en suspension à chaque pas de temps est supposé se redéposer automatiquement. Cette approximation permet d'éviter la présence de sable dans l'eau et est réaliste dans le cas de la rade de Marseille, où les courants sont faibles et la vitesse de chute des sédiments sableux est grande. Le module sédimentaire n'intègre pas de dynamique de tassement.

La configuration actuelle utilise 4 classes de sédiments :

- MES_VL : matières en suspension "très légères", caractérisées par des vitesses de chute variant entre 0.001mm/s et 0.05mm/s. Intégrées comme bruit de fond nécessaire pour les transferts atmosphériques des contaminants.
- MES_L : MES "légères", W_s variant de 0.01mm/s à 0.5 mm/s en fonction de la concentration.
- MES_H : MES "lourdes" W_s variant de 0.2mm/s à 2 mm/s en fonction de la concentration.
- SAND : variable sable non transportée en suspension.

Cependant, dans la configuration actuelle V8.19_ref, les paramètres de la floculation sont tels qu'ils n'influent que très peu sur la vitesse, celle-ci étant toujours très proche du minimum, d'où la nécessité de créer plusieurs classes de vases.

Le compartiment sédimentaire est simulé sur trois niveaux uniquement. La couverture sédimentaire du modèle est initialisée après une période de spin-up d'un an (Figure 2 à Figure 4).

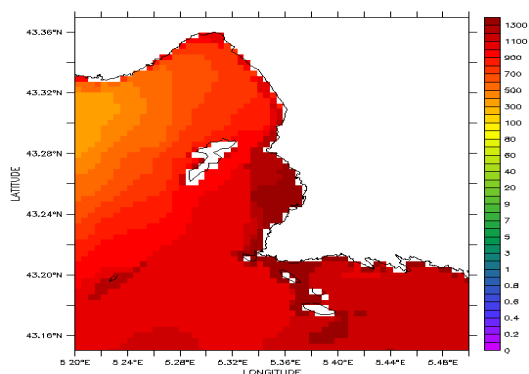


Figure 2 – Couverture sédimentaire initiale pour la variable SAND (sable).

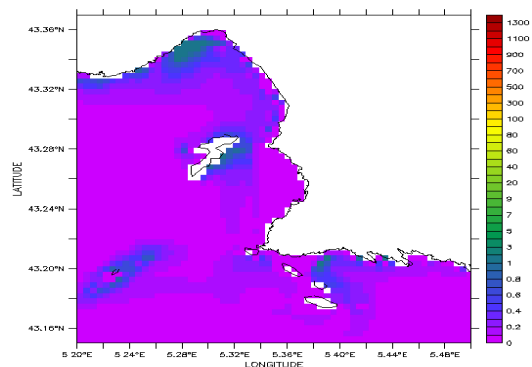


Figure 3 – Couverture sédimentaire initiale pour la variable MES L (légères).

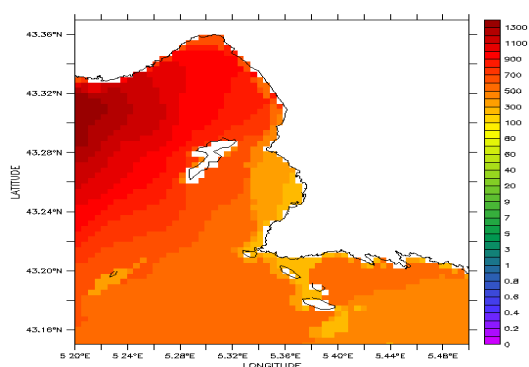


Figure 4 – Couverture sédimentaire initiale pour la variable MES H (lourdes).

Les apports sont estimés à partir des débits liquides et d'une paramétrisation des flux solides à partir des mesures éparées disponibles (Jany et Thouvenin, 2012).

Le modèle démarre toujours avec des conditions initiales par défaut ou en restart (re-démarrage à partir de données enregistrées précédemment) en fonction des besoins. Les conditions aux limites entrantes sont prises nulles pour les concentrations en MES.

Des comparaisons du modèle aux observations disponibles des campagnes SCOPE07 et SCOPE08 ont permis de calibrer le modèle, en particulier de choisir des scénarios de rejet de MES (hypothèse de concentration forte, forte proportion de MES_L) et le paramétrage de la vitesse de chute des MES.

Pour les paramètres d'érodabilité, le taux d'érosion E_0 de base a été calculé à partir des mesures d'érodabilité :

$$E_0 = 0.02155 * e^{(-0.09 * mudfrac)} \text{ en } g.m^{-2}.s^{-1}$$

et la tension critique d'érosion est de $\tau_{ce} = [0.2; 0.3 \text{ si } mudfrac > 0.6]$

2.2. Conditions hydrodynamiques de la zone d'étude

Nous avons identifié trois types de situations météorologiques distinctes qui influent sur les temps de séjour et d'évacuation des substances rejetées pour la rade de Marseille.

- Les situations de courant sud (influent sur toute la zone) : ce sont des situations associées à des vents nord ou nord-ouest qui sont parfois associés à des épisodes d'upwelling. Ces situations ont tendance à chasser les rejets loin de la côte vers le large.
- Les situations de courant nord (influent sur toute la zone): ce sont des situations associées à des vents sud ou sud-est qui font venir de l'eau extérieure dans la rade de Marseille. Ces situations viennent plaquer les rejets sur la côte nord de la rade nord ou sur la côte nord-est de la rade sud (selon s'il y a ou pas de la diffraction des courants).
- Les situations « d'intrusions du Rhône en rade de Marseille » (influent principalement sur les deux rades) : situations associées dans ce rapport à des situations d'entrée d'eau du Rhône (salinité inférieure à 36.5) à l'entrée de la rade de Marseille (cf. paragraphe 3) ou jusqu'au fond de la rade de Marseille. Elles peuvent être associées à des vents d'ouest et des courants est ou sud-est qui ramènent de l'eau extérieure (venant du Rhône ou du large) ou des substances qui sont éventuellement sorties de la boîte de Marseille auparavant. Ces situations ont une occurrence de 7 à 13 fois par an (M. Fraysse, comm. perso.) Ces masses d'eau peuvent aussi être ramenées par d'autres types de courant.

On observe parfois localement des recirculations ne correspondant pas à la situation météorologique globale (par exemple un courant globalement nord au large des deux rades peut du fait des recirculations devenir un courant sud entre le Frioul et Endoume).

3. Modélisation des substances dissoutes

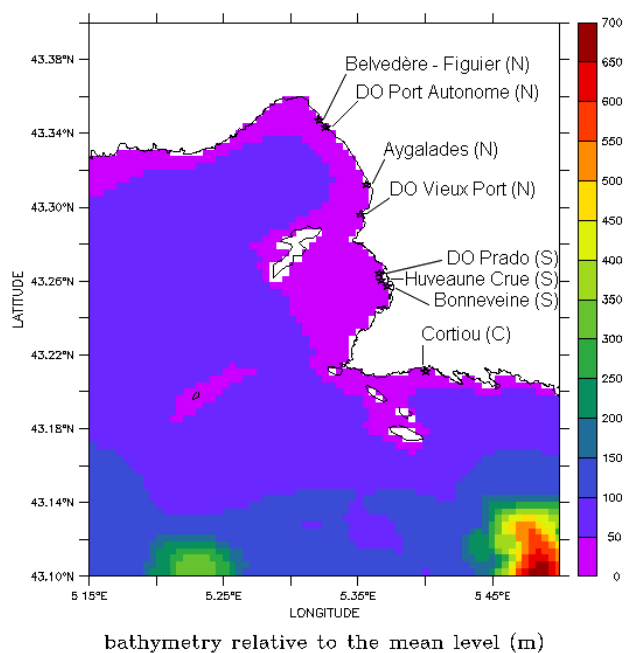
3.1. Méthodologie

Nous avons choisi de modéliser trois périodes distinctes, identifiées à partir des hydrogrammes des rejets utilisés dans nos simulations.

Ces trois périodes sont : avril à juillet 2007, septembre à décembre 2007 et septembre à décembre 2008.

La première et la dernière ont été choisies car elles regroupaient plusieurs périodes de crues qui semblaient intéressantes. La seconde (sep. – déc. 2007) a été choisie principalement pour servir de comparaison avec la même période en 2008.

Une concentration moyenne initiale dans l'eau de la rade a été fixée à 10^{-3} ng/L. A chaque rejet (voir carte des rejets **Figure 5**) est associée une concentration arbitraire de 100 000 ng/L constante ainsi qu'un fichier de débit liquide établi à partir de mesures de terrain (issues de la DEA).



bathymetry relative to the mean level (m)

Figure 5 – Carte des rejets et de leurs emplacements dans le modèle MARS3D. Les rejets de la rade nord sont marqués d'un (N), ceux de la rade sud d'un (S) et celui de Cortiou d'un (C).

Nous avons utilisé quatre zones bilan permettant de mesurer les flux entrant et sortant par les frontières des boîtes ainsi que l'évolution des stocks de substances dissoutes dans l'eau. Ces quatre zones sont les suivantes : rade nord, rade sud, Cortiou et Marseille (cf. Figure 6).

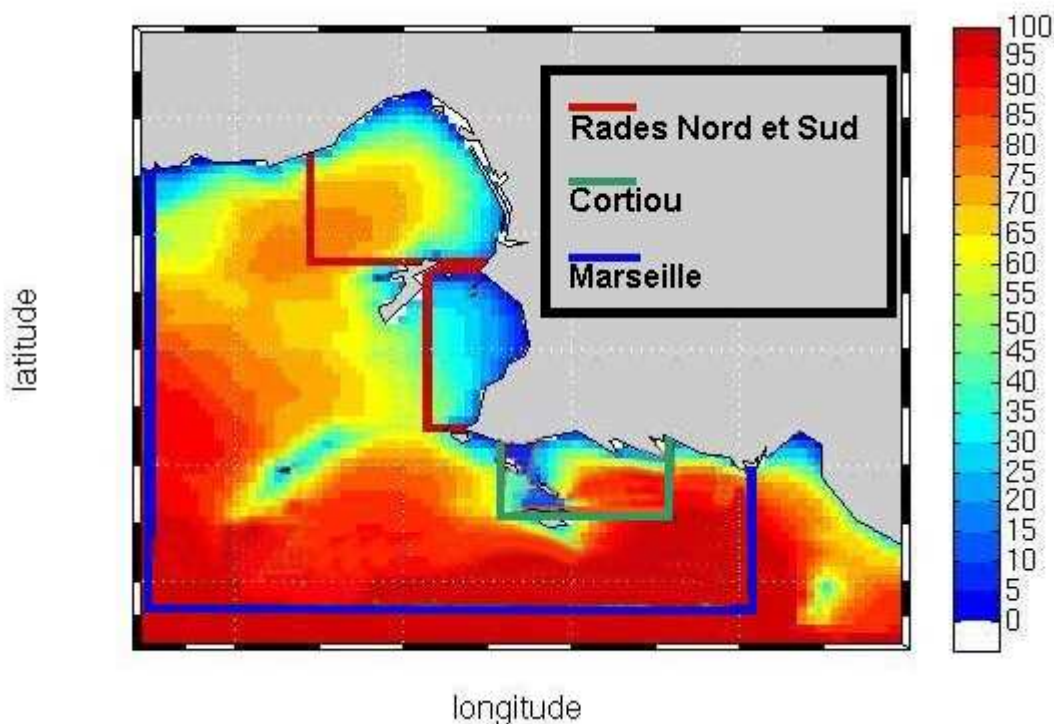


Figure 6 – Zones bilans pour les simulations sur le dissous

Dans ce travail, on définit (voir **Figure 7**) :

- le temps de séjour : c'est le temps entre le début d'un épisode de crue (variation brutale de la quantité de masse rejetée) et le début de la sortie de cette masse. Ce temps ne dépend en théorie que l'hydrodynamique pendant la période (instant du rejet, temps, vents, position du rejet...), il ne correspond pas à la définition usuelle du temps de séjour qui est calculé d'habitude à partir du rapport entre le volume considéré et le flux d'entrée (ou de sortie).
- le temps d'évacuation : c'est le temps total que met une crue à s'évacuer hors de la boîte (il dépend en plus de l'intensité de la crue et de sa durée),
- le temps de passage dans une boîte : c'est la même chose que le temps d'évacuation mais pour un rejet n'étant pas situé dans la boîte considérée (le rejet entre et sort par les limites).

Les courbes tracées sur la **Figure 7** correspondent aux différents éléments suivants :

- La courbe bleue représente la variation du stock de substance dissoute dans l'eau, par rapport au début du graphe (stock au temps t – stock à l'instant initial)
- La courbe verte le « flux cumulé » rejeté par les rivières, c'est-à-dire la quantité totale de substance dissoute rejetée par la rivière depuis le début de la simulation,
- La courbe rose représente le « flux cumulé » entrant (pente positive, ajout de substance donc entrée) ou sortant (pente négative, retrait de substance donc sortie) par les limites de la boîte considérée (on ne différencie pas ici la frontière – nord, sud, est ou ouest – par laquelle la substance entre ou sort mais on calcule la totalité, le long de toute la limite de la boîte),
- La courbe jaune représente le bilan de la substance (somme du stock et du flux rejeté moins le flux aux limites).

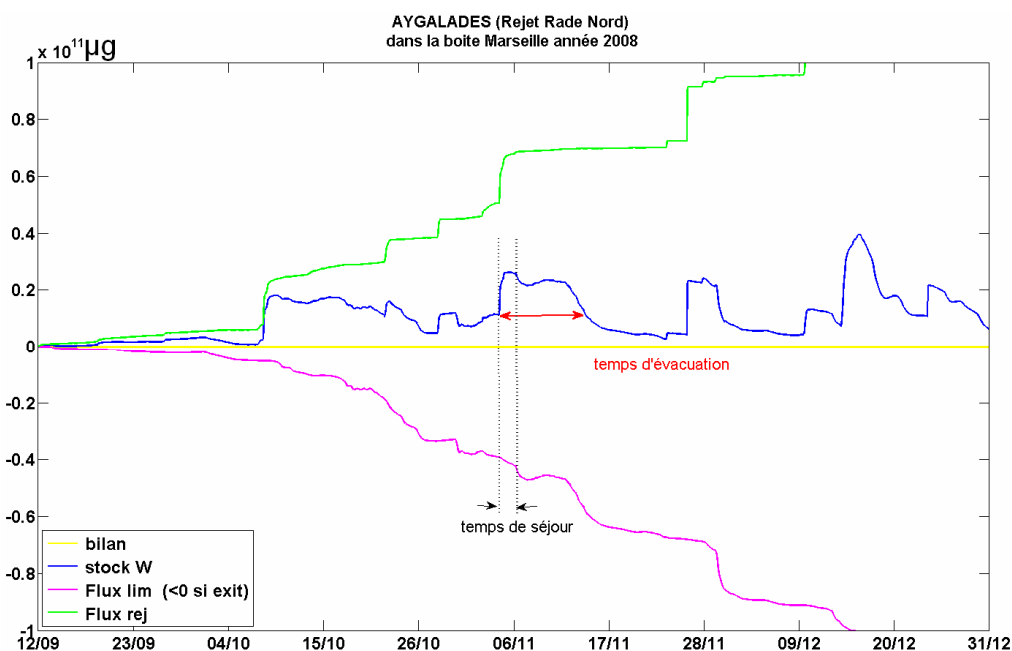


Figure 7 – Exemple de différenciation entre le temps de séjour et le temps d'évacuation sur un rejet des Aygalades pour la boîte bilan de Marseille en 2008. En rouge, l'intervalle de temps pris pour le temps d'évacuation, en noir, celui pris pour le temps de séjour pour le même rejet de crue.

3.2. Résultats

3.2.1. Temps d'évacuation

Le **Tableau 1** présente le résumé des temps d'évacuation des différents rejets pour les trois périodes étudiées. Ce tableau a été créé à partir de l'étude des figures bilan de chaque rejet pour chaque boîte et chaque période (comme **Figure 7**) qui ne sont pas présentées dans ce rapport. A la lecture du tableau, on peut faire les observations suivantes :

- Lors d'un épisode de crue dans la boîte Rade sud, le temps d'évacuation est en général d'1 à 3 jours par courant sud. Le temps d'évacuation est aussi assez court en cas de courant nord (1 à 5 jours), sauf en cas de grosse crue (jusqu'à 11 jours). En l'absence de situation météo particulière, le rejet peut être rapidement diffusé au large (après 3 jours en moyenne) ou rester plus longtemps dans la rade en cas de recirculations ou de courants faibles ou changeants qui étalent le rejet.
- Lors d'un épisode de crue dans la boîte Rade nord, le temps d'évacuation est très court en cas de courant sud (1 à 4 jours). En cas de courant nord, la substance stagne voire s'enfonce avec la masse d'eau à la côte nord et reste entre 7 et 12 jours.
- Lors d'un épisode de crue à Cortiou, la substance part vite au large en cas de courant sud (1 à 2 jours) mais peut rester plus longtemps (jusqu'à 15 jours) si le courant est changeant (est – nord – ouest).
- Pas de passage dans les boîtes Rade nord et sud d'une substance déversée à Cortiou en cas de courant sud.
- Pas de passage dans la boîte Rade nord (ou seulement 1 jour à de faibles concentrations) d'une substance issue de la rade sud en cas de courant sud.
- Pas de passage dans la boîte de Cortiou d'une substance déversée dans la boîte Rade nord en cas de courant nord ou d'une substance déversée en boîte Rade sud en cas de courant sud (et strictement sud).
- Les temps d'évacuation dans la boîte de Marseille peuvent être très courts (1 jour) en cas, par exemple, d'épisode de crue dans la boîte Rade sud lors d'un fort courant sud mais ils peuvent être aussi très longs (jusqu'à un mois) en cas d'un rejet en rade sud lors d'une période où la météo est très changeante. La substance est alors étalée (et très diluée) dans les deux rades, en surface et en profondeur, et peut rester assez longtemps, le temps qu'un long épisode de courant vienne purger les masses d'eau. Il arrive qu'une nouvelle crue arrive avant que toute la substance soit partie. On peut alors avoir des effets d'accumulation dans des zones où il y a peu de courant (à la côte ou parfois au fond).

En jours Périodes	Boîte Rade nord		Boîte Rade sud		Boîte Marseille		Boîte Cortiou	
	Avr - Juil 2007	Sept - Déc 2008	Avr - Juil 2007	Sept - Déc 2008	Avr - Juil 2007	Sept - Déc 2008	Avr - Juil 2007	Sept - Déc 2008
Port Aut DO (rejet rade nord)	0,5 7 11	1,5 - 2 4,5 - 9 11	1,5	2 7 - 7,5	6,5 15 13,5	> 5,5 15,5 - 20 11,5		5,5 0 - 2
Vieux Port DO (rejet rade nord)	1 - 1,5 8	0,5 - 1 12 8,5 - 9,5 12,5	0 - 6 0	2 - 7 0 2,5 - 17 7	6,5 18	2,5 23 6 - 18,5 13	0 - 4 0	
Aygalades (rejet rade nord)	1 - 1,5 7,5	1 8,5	2,5 9	1,5 - 3	2,5	> 4 - > 5 10		0
Belved (rejet rade nord)	4 - 4,5 1,5 9 6,5	2 - 4 11,5	1,5 13	2,5 4,5 13	9	7,5 - 20 15 6,5		0
Prado DO (rejet rade sud)	14 0 5 - 10,5	0 15 h 15 - 17	5,5 2 3 - 7,5	1,5 - 2 2,5 - 7,5	14 8 6 - 12	> 2,5 - > 4,5 17,5 - 28	0	1
Huv Crue (rejet rade sud)	0 13	0 13 2,5	1 - 1,5 1 8	2,5 - 3 11 17	1 9	3 - 4,5 13 23	10	0 1
Bonneveine (rejet rade sud)	5,5	1 12	1,5 - 3,5 1,5 5 - 8,5	1 - 2 3 - 11,5		1,5 3,5 - 17	6	2
Cortiou (rejet à Cortiou)		0 2 4,5	5,5 2,5 - 5	0 1 1,5		1,5 20	1 2,5 - 14	1 - 2 2 - 12
	Courant Sud							
	Courant Nord							
	Intrusion Rhône							
	Pas de météo ou d'épisode océanique particuliers							

Tableau 1 – Tableau récapitulatif des différents temps d'évacuation (en jour) selon les rejets, les boîtes considérées et les périodes.

3.2.2. Temps de séjour

Le **Tableau 2** présente le récapitulatif des temps de séjour pour les différents rejets pour la boîte de Marseille. Les périodes étudiées sont avril à juillet 2007 et septembre à décembre 2008 et n'ont pas été différenciées. Le tableau a été créé à partir de l'étude des figures bilans comme le tableau précédent.

En jours	Boîte Marseille	En jours	Boîte Marseille
Port Aut DO (rejet rade nord)	1,5 2 - 3,5 1 - 7 3	Huv Crue (rejet rade sud)	0,5 - 2 2 - 3 5
Prado DO (rejet rade sud)	1 - 2 2 - 5 5 - 6	Belved (rejet rade nord)	0,5 - 3 1,5 2 - 5
Vieux Port DO (rejet rade nord)	1 - 2 1,5 - 3 2 2	Bonneveine (rejet rade sud)	< 0,5 - 1,5 3 4 - 5
Aygalades (rejet rade nord)	0,5 - 3 2 5 - 7	Cortiou (rejet à Cortiou)	0,5 - 1,5 1 - 4
	Courant Sud		
	Courant Nord		
	Intrusion Rhône		
	Pas de météo particulière		

Tableau 2 – Tableau récapitulatif des différents temps de séjour selon les rejets, pour la boîte de Marseille et pour les deux périodes confondues, avril – juillet 2007 et septembre – décembre 2008.

A la lecture de ce tableau, on peut faire les observations suivantes :

- Les temps de séjour dans la boîte de Marseille sont plus courts que les temps d'évacuation. On rappelle que le temps de séjour est le temps entre le début de la crue et le début de la sortie de la boîte de la substance (alors que le temps d'évacuation est le temps que met toute la substance à sortir).

- En général pour tous les rejets, pour un courant sud (environ 25% du temps sur les périodes avril - juillet 2007 et septembre - décembre 2008), le temps de séjour est compris entre 0,5 et 3 jours (voire même quelques heures pour le rejet de Bonneveine). Cette variation est due au fait que les épisodes considérés ne présentent pas toujours la même intensité de courant.

- Pour un courant nord (environ 25% du temps sur les périodes avril - juillet 2007 et septembre - décembre 2008), on a des temps de séjour entre 1,5 et 3 jours (les rejets se plaquent contre la côte nord puis partent par l'Ouest).

- Pour un épisode océanique type intrusion du Rhône (5 épisodes en moyenne long (4 jours) dans la période avril - juillet 2007 et 5 épisodes en moyenne

courts (1j) sur la période septembre - décembre 2008), on a des temps de séjour entre 1 et 7 jours (dépendant de l'intensité des courants et de leur orientation).

- Enfin les cas où l'on n'a pas de situation océanique particulière (courant changeants pendant la période du rejet ou les jours qui le suivent) sont les cas où en moyenne les temps sont les plus longs. Entre 1 et 4 jours par exemple pour Cortiou et entre 2 et 7 jours pour les autres rejets.

3.3. Cartes de dilution

Nous souhaitons mettre en parallèle les simulations idéalisées présentées dans ce rapport avec les résultats issus de concentrations réelles dans le milieu obtenus lors des campagnes de mesures à Marseille.

Dans le rapport METROC précédent (Jany et al., 2012) nous avons listé pour chaque métal dissous les concentrations minimales, maximales et moyennes mesurées dans les différents rejets.

En prenant les concentrations maximales dans les rejets ainsi que les limites de détection connues (ou le bruit de fond en mer) de ces mêmes éléments, nous pouvons calculer (par le rapport de ces deux valeurs) une dilution théorique jusqu'à laquelle le métal dissous peut être détecté (voir **Tableau 3**). En prenant les valeurs maximales pour les mesures in-situ, ainsi que les limites de détection (qui correspondent à la concentration minimum détectable) on se place dans le cas de dilution détectable le plus défavorable possible.

3.3.1. Cortiou

Dans les mesures dont nous disposons (Jany et al., 2012, Annexe), nous avons des mesures in situ dans l'Huveaune (H), dans le Jarret (J) et dans l'Emissaire 2 (E). Ces trois rejets étant, dans notre simulation, largués à Cortiou, nous avons pris pour la valeur maximum in-situ la valeur maximale parmi ces trois (voir **Tableau 3**).

a) Cartes de minimum de dilution

Substances dissoutes	Valeur max. mesurée in situ (rivières)	Limite de détection	Dilution détectable
Hg	8.3 ng/L (E)	0.1 ng/L ^(a)	83
Co	0.97 µg/L (E)	0.006 µg/L ^(b)	161
Ni	42.7 µg/L (E)	0.011 µg/L ^(c)	3900
Cu	12.3 µg/L (H)	0.002 µg/L ^(c)	6150
Zn	74.0 µg/L (J)	0.010 µg/L ^(c)	7400
Cd	0.07 µg/L (H)	0.002 µg/L ^(c)	35
Pb	9.7 µg/L (H)	0.002 µg/L ^(d)	4850

Tableau 3 – Récapitulatif des métaux dissous mesurés dans la rade de Marseille et liste de leur distance maximale par rapport au rejet. Rejet dans lequel a été mesurée la valeur maximale obtenue (E) Emissaire 2, (H) Huveaune, (J) Jarret. Données bibliographiques : (a) Cossa et al, 1997, (b) J.F. Chiffolleau, comm. perso. (2012), (c) Yong, Y.Y. 1994, (d) bruit de fond, Morley et al., 1997.

La **Figure 8** est une carte de minimum de dilution du rejet de Cortiou pour la période avril – juillet 2007. Pour chaque point de la carte, nous avons pris le minimum de la valeur de la dilution sur toute la période. Cette carte permet d'étudier la distance maximale du rejet à laquelle peut être détecté une espèce dissoute particulière. Le **Tableau 4** permet de mettre en parallèle les dilutions théoriques calculées précédemment et la carte de dilution pour repérer la distance maximale « d'influence » que pourrait avoir le rejet considéré (ici Cortiou) pour la période considérée.

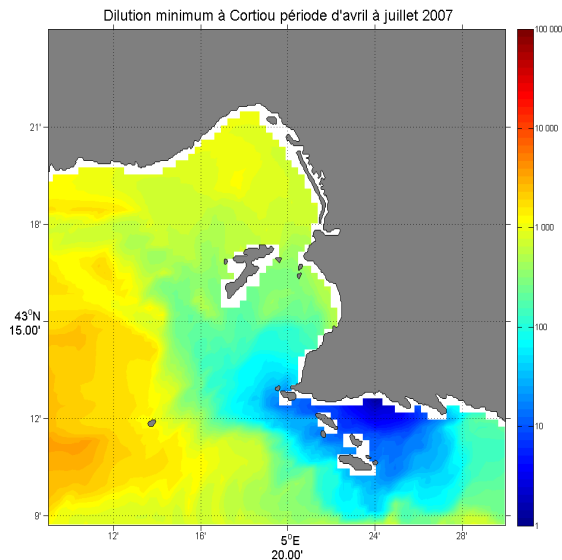


Figure 8 – Carte de minimum de dilution pour la période avril – juillet 2007, pour le rejet de Cortiou.

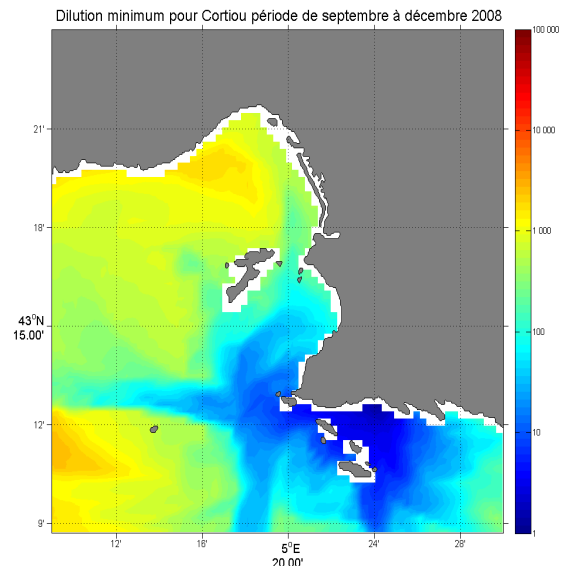


Figure 9 – Carte de minimum de dilution pour la période septembre – décembre 2008, pour le rejet de Cortiou.

Substances Dissoutes	Dilution détectable	Distance Rejet Avril - Juillet 2007	Distance Rejet Sept. – Déc. 2008
Hg	83	8 – 10 km	Jusqu'en rade sud
Co	161	Jusqu'en rade sud	Jusqu'en rade sud
Ni	3900	Jusqu'en rade nord	Jusqu'en rade nord
Cu	6150	Jusqu'en rade nord	Jusqu'en rade nord
Zn	7400	Jusqu'en rade nord	Jusqu'en rade nord
Cd	35	5 km	Jusqu'en rade sud
Pb	4850	Jusqu'en rade nord	Jusqu'en rade nord

Tableau 4 – Récapitulatif des distances indicatives auxquelles peuvent être observées les différents métaux pour le rejet de Cortiou pour les périodes avril – juillet 2007 et septembre – décembre 2008 selon leur facteur de dilution théorique calculée.

Pour la période avril – juillet 2007, on distingue (voir **Figure 8**) une zone de dilution de 1 à 80 autour de Cortiou de la calanque de Morgiou à l'île Maire en passant par le Frioul, on peut détecter dans cette zone du Hg et du Cd (voir **Tableau 4**). Dans la rade sud, on observe des dilutions jusqu'à environ 100 (limite de détection possible de Co) et plus proche de 1000 dans la rade nord. Enfin c'est à l'Ouest de l'île du Planier où les dilutions sont les plus faibles allant de 1000 à environ 5000 (limite de détection possible de Zn à 7400, de Cu à 6150).

Pour la période septembre – décembre 2008, le minimum de dilution s'étend plus loin que pour la période précédente (voir **Figure 9**) : à l'Est, la zone qui va jusqu'à une dilution de 80 se situe toujours vers la calanque de Morgiou, au sud elle va jusqu'à la limite de la boîte de Marseille et à l'Ouest on va jusque dans la rade sud. On a aussi deux chenaux, un au sud et un qui part à l'Ouest en passant au Nord de l'île Planier. Cette zone représente toujours la zone limite de détection du Hg et du Cd (voir **Tableau 4**). Le Co, qui était détectable pour 2007 de Cortiou au sud de la rade sud, l'est pour la période fin 2008 jusqu'au nord de cette dernière.

La carte de dilution pour la période septembre – décembre 2007 pour Cortiou est en annexe du rapport.

b) Cartes de percentile de dilution

Les cartes précédentes fournissent une information sur la possibilité de trouver ou non une espèce dissoute à un endroit de la rade de Marseille mais la probabilité de trouver cette espèce peut être très faible et due à une combinaison d'événements particuliers (météorologiquement parlant, plus le fait qu'on ait choisit la concentration maximale mesurée en rivières et la limite de détection atteignable pour calculer la dilution théorique). Afin de mieux entrevoir la fréquence de ces dilutions, nous avons tracé pour Cortiou des cartes de percentile 25, 50 et 90. Ces figures (**Figure 10** à **Figure 12**) présentent la dilution effective en chaque point de la carte 25% du temps (sur la durée de la simulation : septembre à décembre 2008), 50% du temps et 90% du temps.

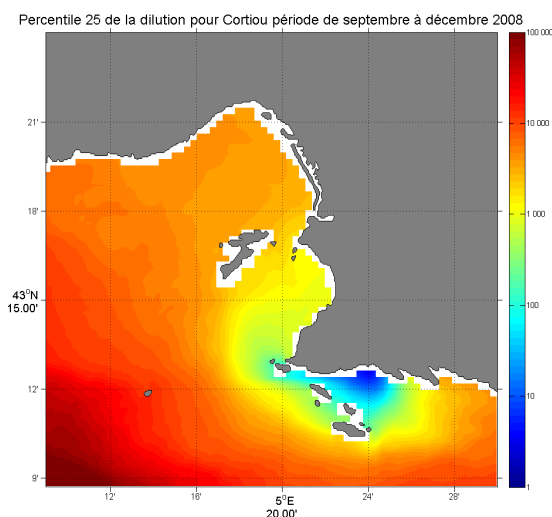


Figure 10 – Carte du percentile 25 de dilution pour la période septembre – décembre 2008, pour le rejet de Cortiou.

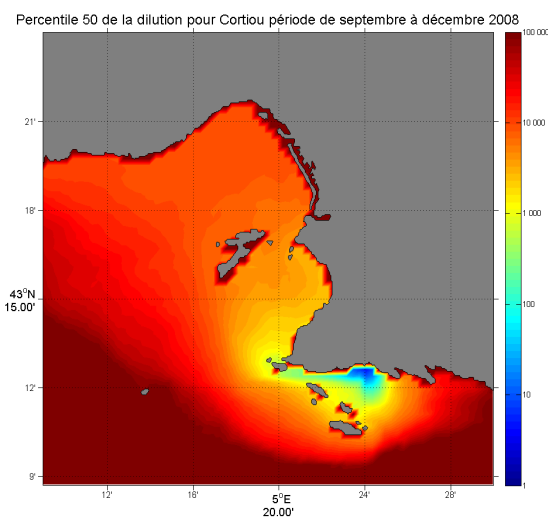


Figure 11 – Carte du percentile 50 de dilution pour la période septembre – décembre 2008, pour le rejet de Cortiou.

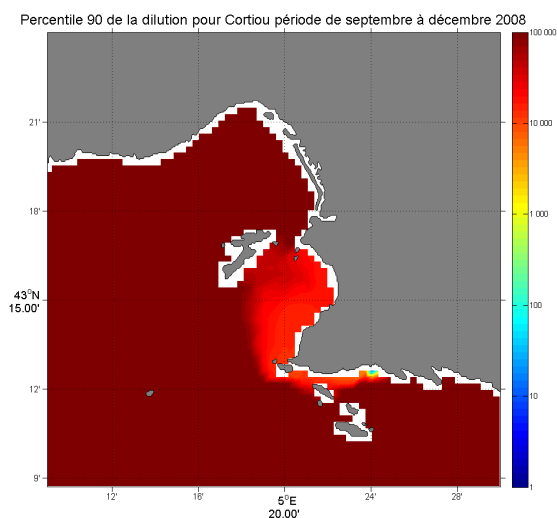


Figure 12 – Carte du percentile 90 de dilution pour la période septembre – décembre 2008, pour le rejet de Cortiou.

La dilution est bien moins étendue que sur les cartes de minimum. Par exemple le front de dilution 1000 qui atteignait l’Ouest de la boîte de Marseille en 2008 (**Figure 9**) est restreint au niveau de la rade sud et de l’île du Riou. Des dilutions de 1000 sont donc atteignables en rade nord et à l’Ouest de l’île Planier moins de 25% du temps entre septembre et décembre 2008. Elles sont la moitié du temps confinées entre l’île Maire et les îles Jaire et Calseraigne. Enfin, elles sont atteintes 90% du temps dans un champ très proche du rejet de Cortiou (moins d’un kilomètre).

3.3.2. Aygalades

On calcule de même, pour les Aygalades, la dilution détectable théorique à partir des valeurs maximales mesurées in-situ et des limites de détection (ou valeurs mesurées en mer) connues à partir de la littérature (**Tableau 5**) :

Substances dissoutes	Valeur max. mesurée in situ (rivières)	Limite de détection	Dilution détectable
Hg	62.3 ng/L	0.1 ng/L ^(a)	620
Co	0.96 µg/L	0.006 µg/L ^(b)	160
Ni	5.4 µg/L	0.011 µg/L ^(c)	490
Cu	10.1 µg/L	0.002 µg/L ^(c)	5050
Zn	102.5 µg/L	0.010 µg/L ^(c)	10250
Cd	0.19 µg/L	0.002 µg/L ^(c)	95
Pb	13.2 µg/L	0.002 µg/L ^(d)	6600

Tableau 5 – Récapitulatif des métaux dissous mesurés dans la rade de Marseille et liste de leur distance maximale par rapport au rejet. Données bibliographiques : (a) Cossa et al, 1997, (b) J.F. Chiffolleau, comm. perso. (2012), (c) Yong, Y.Y. 1994, (d) bruit de fond, Morley et al., 1997.

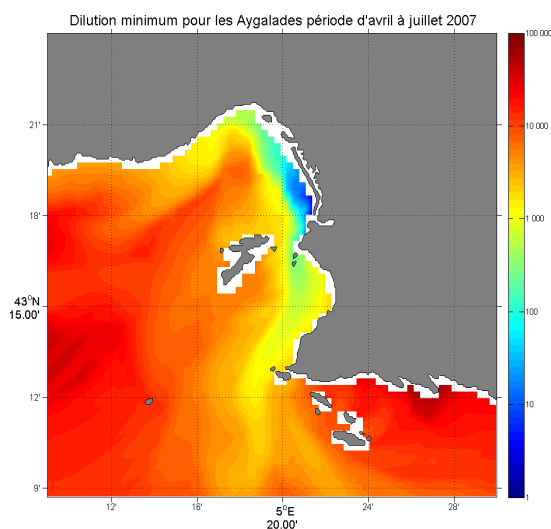


Figure 13 – Carte de minimum de dilution pour la période avril – juillet 2007, pour le rejet des Aygaldes.

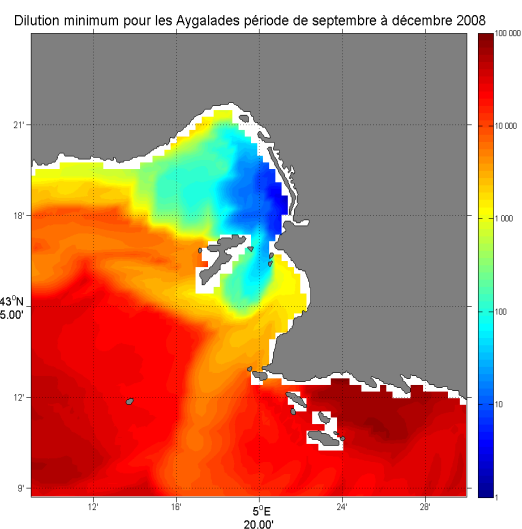


Figure 14 – Carte de minimum de dilution pour la période septembre – décembre 2008, pour le rejet des Aygaldes.

Substances Dissoutes	Dilution détectable	Distance Rejet Avril – Juillet 2007	Distance potentielle de détection Septembre – Déc. 2008
Hg	620	Jusqu'en rade sud (10 km)	Jusqu'en rade sud (13 km)
Co	160	3 km	7 km
Ni	490	7 km	Jusqu'en rade sud (12 km)
Cu	5050	Jusqu'en rade sud (12 km)	Jusqu'en rade sud (14 km)
Zn	10250	Jusqu'à Cortiou	Jusqu'en rade sud (17 km)
Cd	95	2,5 km	5 km
Pb	6600	Jusqu'en rade sud (15 km)	Jusqu'en rade sud (13 km)

Tableau 6 – Récapitulatif des distances indicatives auxquelles peuvent être retrouvés les différents métaux pour le rejet des Aygaldes pour les périodes avril – juillet 2007 et septembre – décembre 2008 selon leur facteur de dilution théorique calculée.

Pour le rejet des Aygaldes de la période avril – juillet 2007, la zone de dilution jusqu'à 100 s'étend à peine quelques km autour du rejet, du nord du port de Marseille jusqu'au nord du passage de l'île du Frioul (Figure 13). Cette zone est la zone limite de détection du Cd et du Co. Le Hg et le Ni peuvent être détectés respectivement jusqu'à des dilutions de 620 et 490 environ (Tableau 6). Cette zone s'étend du nord de la rade nord jusqu'à la moitié de la rade sud. Le Pb et le Cu peuvent être potentiellement détectés jusqu'au sud de la rade sud, voire même jusqu'au sud de la boîte de Marseille. Le Zn détectable jusqu'à une dilution d'environ 10250 peut être détecté jusqu'à Cortiou. Il y a deux zones dans lesquelles on ne peut pas détecter de métaux provenant du rejet des Aygaldes pour cette période qui sont (Figure 13) une zone (en rouge foncé) à l'Ouest de l'île Planier et les calanques de Sormiou et Morgiou.

Pour la période de septembre à décembre 2008 (Figure 14), la carte de dilution est changée. La zone de dilution de 1 à 100 (qui représente la zone dans laquelle on peut détecter du Cd et du Co) est étendue du nord de la rade de Marseille au nord de la rade sud en passant par une longitude correspondant aux îles du Frioul. La zone de détection du Hg et du Ni s'étend du

long de toute la côte nord de la boîte de Marseille à la moitié de la rade sud en passant par le Frioul. Les zones dans lesquelles il n'est pas possible de détecter de métaux provenant des Aygalades sont étendues : toute la zone de Cortiou est concernée et tout l'Ouest de l'île Planier.

Globalement, une dilution de 1000 (par exemple) sera plus proche de la côte pour la période avril - juillet 2007 (Figure 13) que pour la période septembre - décembre 2008 (Figure 14). Cette différence s'explique :

- d'une part par les situations d'intrusion du Rhône, aussi fréquentes mais dont la durée est plus grande (en moyenne 4 jours contre 1 jour) pour avril – juillet 2007. Elles amènent des eaux « propre en substance » qui vont diluer les eaux de la baie.
- et d'autres par l'intensité des courants (les situations de courant sud et nord représentant chacune une part égale de temps sur les deux périodes).

La carte de dilution pour la période septembre – décembre 2007 pour les Aygalades est en annexe du rapport. Les cartes de percentile des Aygalades sont présentées en annexe pour septembre à décembre 2008. Une dilution de 1 000 est visible sur la carte de percentile 25 des Aygalades. Les valeurs observées sur les cartes de minimum pour septembre à décembre 2008 présentées dans la partie précédente (et dans les annexes) présentent donc une occurrence inférieure à un quart du temps.

3.3.3. Déversoirs d'orage

Une seule mesure de concentrations en métaux dissous a été faite par déversoir d'orage. Nous avons pris pour le Tableau 7 les valeurs maximales observées tout déversoir d'orage confondu.

Les cartes de dilution présentées ci-dessous ne représentent que deux déversoirs d'orage (Prado et Port Autonome) pour la période septembre – décembre 2008 (période dont les crues sont les plus nombreuses et les intensités maximales par rapport aux trois périodes étudiées dans cette étude). Les cartes de dilution des autres DO et les autres périodes sont annexées à la fin de ce rapport.

Substances dissoutes	Valeur max. mesurée in situ (rivières)	Limite de détection	Dilution détectable
Co	1.3 µg/L	0.006 µg/L ^(b)	220
Ni	5.7 µg/L	0.011 µg/L ^(c)	520
Cu	3.4 µg/L	0.002 µg/L ^(c)	1700
Zn	47.3 µg/L	0.010 µg/L ^(c)	4730
Cd	0.032 µg/L	0.002 µg/L ^(c)	16
Pb	1.2 µg/L	0.002 µg/L ^(d)	600

Tableau 7 – Récapitulatif des métaux dissous mesurés dans la rade de Marseille et liste de leur distance maximale par rapport au rejet. Données bibliographiques : (a) Cossa et al, 1997, (b) J.F. Chiffolleau, comm. perso. (2012), (c) Yong, Y.Y. 1994, (d) bruit de fond, Morley et al., 1997.

Substances Dissoutes	Dilution détectable	Distance potentielle de détection DO Prado	Distance potentielle de détection DO Port Autonome
Co	220	Rade sud	Rade nord
Ni	520	Rade sud	Rade nord
Cu	1700	Jusqu'en rade nord	Rade et côte nord
Zn	4730	Jusqu'en rade nord	Jusqu'en rade sud
Cd	16	3 km	2 km
Pb	600	Rade sud	Rade nord

Tableau 8 – Récapitulatif des distances indicatives auxquelles peuvent être retrouvés les différents métaux pour le déversoir d'orage Prado et le déversoir d'orage Port Autonome pour la période septembre – décembre 2008 selon leur facteur de dilution théorique calculée.

Pour le déversoir d'orage du Prado sur la période septembre à décembre 2008, les zones de dilution théoriques sont réparties comme suit : autour du déversoir jusqu'à 3 km autour se situe la zone de dilution qui va de 1 à un peu plus de 10 (zone de détection limite du Co –**Tableau 8**), puis la zone de dilution qui va jusqu'à 600 s'étend dans toute la rade sud. On peut y détecter notamment du Co, du Ni et du Pb. Le Cu et le Zn peuvent être détectés jusque dans la rade nord. Enfin tout l'Ouest de la boîte de Marseille et la zone de Cortiou sont des zones où l'on ne pourra pas détecter de métaux issus du rejet du déversoir d'orage du Prado d'après les valeurs relevées dans le **Tableau 8**.

Pour le déversoir d'orage du Port Autonome pour la période de septembre à décembre 2008 on observe la zone de dilution de 1 à 10 autour du déversoir d'orage (environ 2 km autour). Cette zone est celle dans laquelle on peut détecter du Cd. La zone de détection du Co, du Ni et du Pb s'étend tout le long de la côte nord et dans la rade nord. Le Zn est détectable jusque dans la rade sud. L'Ouest de l'île Planier, le sud de la boîte de Marseille et la zone de Cortiou sont des zones où l'on ne peut, d'après les valeurs du **Tableau 8**, pas détecter de métaux.

Les cartes de dilution pour toutes les périodes et tous les déversoirs d'orage sont en annexe du rapport. Les cartes de percentile des déversoirs d'orage ne sont pas présentées pour septembre à décembre 2008. En effet, ces derniers ayant un mode de fonctionnement discrets (ils ne rejettent que lors d'un orage) même les cartes de percentile 25 ne montrent pas de dilution supérieures à 100 000 dans la zone.

3.3.4. Les torrents

Seul deux mesures ont été réalisées dans les torrents. La représentativité est donc assez limitée. L'analyse de Belvédère – Figuiet et de Bonneveine a donc été placée en annexe. Pour Bonneveine, les environs des exutoires affichent des dilutions proches de 1 000 entre 25 et 50% du temps alors que pour Belvédère Figuiet, les dilutions sont plus proches de 10 000 à 100 000. Les valeurs observées sur cartes de minimum pour septembre à décembre 2008 présentées en annexe présentent donc une occurrence inférieures à un quart du temps.

3.4. Synthèse sur la modélisation de substance dissoute

Les temps d'évacuation sont définis dans cette étude comme le temps total que met une crue à s'évacuer hors de la boîte où elle a été rejetée. Il dépend donc notamment de l'intensité de la crue et de sa durée. L'étude montre que les temps d'évacuation sont plus longs en hiver (à cause justement de l'intensité plus forte et de la durée plus longue des crues à cette période).

- Pour les périodes de **courant sud**, la simulation a montré que toutes boîtes confondues, les temps d'évacuation sont en général courts, c'est-à-dire entre 1 et 5 jours mais peuvent atteindre 11 jours dans les cas de fortes crues.
- Pour les périodes de **courant nord**, les temps d'évacuation sont de l'ordre de la semaine.
- Lors des simulations, certaines périodes montrent des **courants changeant** qui advectent les substances au large puis les ramènent en les diluant. Ces cas sont les plus défavorables en terme de temps d'évacuation et combinés à un épisode de fortes crues, ils peuvent mener à des temps d'évacuation de l'ordre du mois.

Le temps de séjour se définit dans cette étude comme le temps entre le début d'un épisode de crue (variation brutale de la quantité de masse rejetée) et le début de la sortie de cette masse. Il ne dépend en théorie que l'hydrodynamique pendant la période (instant du rejet, temps, vents, position du rejet) et est donc plus court par définition que le temps d'évacuation.

- Pour un **courant sud**, le temps de séjour se situe entre quelques heures et 3 jours.
- Pour un **courant nord**, le temps de séjour observé lors de nos simulations se situe entre 1,5 jours et 3 jours.
- Pour un **courant changeant**, nous avons observé des temps de séjour maximaux d'une semaine.

Pour compléter cette étude, les cartes de dilution minimum indiquent la possibilité de trouver ou non un métal dans une partie de la rade de Marseille. Ces cartes permettent de rapprocher les simulations idéalisées de cas réalistes de substances dissoutes rejetées dans le milieu. Le cas le plus défavorable possible a été considéré (c'est-à-dire que le calcul de la dilution est fait à partir du rapport du maximum de concentration observé en rivière par la limite de détection minimale possible à ce jour).

Les résultats montrent que tous les composés sont détectables jusqu'à quelques kilomètres des rejets (Cd, Co, Hg) et que d'autres peuvent être potentiellement trouvés assez loin de leur rejet (jusqu'en rade nord pour Ni et Pb provenant de Cortiou par exemple).

Les cartes de percentile permettent de nuancer ces résultats (en effet, le minimum de dilution peut n'être atteint qu'une seule fois pendant quelques heures dans la simulation étudiée). Les cartes de percentile 25, 50 et 90 représentent la dilution atteinte 25, 50 et 90 % du temps de la période simulée (13 octobre – 31 décembre 2008). Les fronts de dilution sont donc beaucoup plus rapprochés des rejets (voire aucun front pour les déversoirs d'orages à cause de leur caractère ponctuel de rejet). Pour Cortiou par exemple, on passe d'un front de dilution 1000 qui atteint toute la boîte de Marseille (dil. min.) à un front qui se réduit progressivement à l'île Maire et à l'archipel du Riou (percentile 25), puis seulement l'archipel du Riou (percentile 50) et finalement moins d'un km autour du rejet (percentile 90).

4. Modélisation des substances particulières

4.1. Méthodologie

Nous avons choisi de simuler la période du 13 octobre 2008 au 31 décembre 2008. Elle présente un nombre important de crues d'intensité pouvant être élevée, donc associées à de forts rejets de matières en suspension (MES) et de substances.

Durant la période, nous avons observé 3 épisodes courts (1 à 2 jours) d'intrusion du Rhône, 7 jours de tourbillon au large du Frioul, environ 19 jours de courant nord (24% de la période) et environ 24 jours de courant sud (30% de la période).

Dans les tests sont considérés le sable (SAND) et des MES légères (MES_L) et lourdes (MES_H). Des substances sont adsorbées sur ces MES afin de distinguer les rejets et d'étudier notamment les zones de dépôt/érosion des sédiments. Plusieurs simulations ont été réalisées afin de considérer tous les rejets séparément.

Dans le fichier initial de sédiments au début du calcul sont présents seulement SAND, MES_L, MES_H. la répartition de ces sédiments a été présentée en début de rapport (**Figure 2** à **Figure 4** page 13). Elles résultent d'un an de simulation du transport particulaire.

Le SAND n'est pas rejeté par les rivières.

Les MES_L, MES_H sont rejetés par les différents cours d'eau. Une étude précédente a permis d'établir plusieurs scénarios de rejet de MES : avec une teneur en MES dans l'eau des apports dans la gamme inférieure ou supérieure des concentrations et avec une répartition en MES lourdes et légères de 50/50 ou de 90/10. Le scénario finalement retenu correspond à l'hypothèse de concentration dans les rejets qui est la plus forte avec une répartition de 50/50 entre les MES lourdes et légères. (cf. partie 2.1.2 page 12) Le **Tableau 9** détaille ces hypothèses.

Des substances sont adsorbées sur les MES_L et les MES_H (elles sont nommées CONT_L_NomDuRejet ou CONT_H_NomDuRejet). Elles ne sont pas présentes dans le fichier initial de sédiment, ce qui veut dire que nous supposons un sédiment « propre ».

Rejet	Hypothèses concentration totale des MES ConcTot_2	Hypothèses répartition des MES Frac_2														
Aygalades	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Q (m³/s)</th> <th>MES (mg/L)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Q < 0.2</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>Q > 0.2</td> <td>$200 \cdot \log(Q) + 400 \cdot (0.1 \cdot Q + 1)$</td> </tr> </tbody> </table>	Q (m ³ /s)	MES (mg/L)	Q < 0.2	30	Q > 0.2	$200 \cdot \log(Q) + 400 \cdot (0.1 \cdot Q + 1)$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Q m³/s</th> <th>% particules légères</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Q < 0,2</td> <td>95</td> </tr> <tr> <td>0,2 < Q < 10</td> <td>$-10 \cdot \log(Q) + 90$</td> </tr> <tr> <td>Q > 10</td> <td>$-50 \cdot \log(Q) + 130$</td> </tr> </tbody> </table>	Q m ³ /s	% particules légères	Q < 0,2	95	0,2 < Q < 10	$-10 \cdot \log(Q) + 90$	Q > 10	$-50 \cdot \log(Q) + 130$
Q (m ³ /s)	MES (mg/L)															
Q < 0.2	30															
Q > 0.2	$200 \cdot \log(Q) + 400 \cdot (0.1 \cdot Q + 1)$															
Q m ³ /s	% particules légères															
Q < 0,2	95															
0,2 < Q < 10	$-10 \cdot \log(Q) + 90$															
Q > 10	$-50 \cdot \log(Q) + 130$															
DO*	150 mg/L	50% H / 50% L														
BelvédFigu (Littoral nord)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Q < 0,1</th> <th>0.1 < Q <≈ 5,82</th> <th>Q > 5,82</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4</td> <td>$500 \cdot (Q - 0.1)^{0.5} + 4$</td> <td>1200</td> </tr> </tbody> </table>	Q < 0,1	0.1 < Q <≈ 5,82	Q > 5,82	4	$500 \cdot (Q - 0.1)^{0.5} + 4$	1200	50% H / 50% L								
Q < 0,1	0.1 < Q <≈ 5,82	Q > 5,82														
4	$500 \cdot (Q - 0.1)^{0.5} + 4$	1200														
Bonneveine (Littoral sud)	200 mg/L	50% H / 50% L														
STEP Cortiou	40 mg/L	100 % L														
Emissaire 1	300 mg/L	L : 60% H : 40%														
Emissaire 2	$25 \cdot Q + 3$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Q m³/s</th> <th>% particules légères</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Q < 0,1</td> <td>95</td> </tr> <tr> <td>0,1 < Q < 6</td> <td>$-10 \cdot \log(Q) + 90$</td> </tr> <tr> <td>Q > 6</td> <td>$-50 \cdot \log(Q) + 123$</td> </tr> </tbody> </table>	Q m ³ /s	% particules légères	Q < 0,1	95	0,1 < Q < 6	$-10 \cdot \log(Q) + 90$	Q > 6	$-50 \cdot \log(Q) + 123$						
Q m ³ /s	% particules légères															
Q < 0,1	95															
0,1 < Q < 6	$-10 \cdot \log(Q) + 90$															
Q > 6	$-50 \cdot \log(Q) + 123$															
Huveaune (Prado) en crue	700 mg/L	50% H / 50% L														

Tableau 9 – Récapitulatif des hypothèses de teneur en MES lourdes (H) et légères (L) dans les rejets faites pour les simulations de substances particulières présentées dans ce rapport. Certaines de ces teneurs sont liées au débit (Q) du rejet. (*DO -Déversoir d'orage).

4.2. Résultats de l'étude des bilans

4.2.1. Courbes de bilans

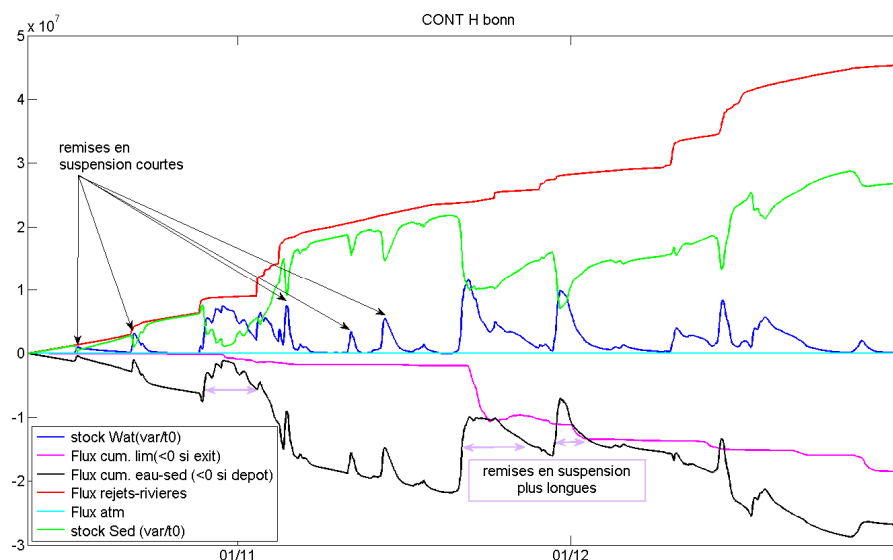


Figure 15 – Exemple de figures bilans pour les substances lourdes sur un rejet de Bonneveine pour la boîte bilan de Marseille en 2008.

Les courbes tracées sur la **Figure 15** correspondent aux différents éléments suivants :

- La courbe bleu foncé représente la variation du stock de substance particulaire dans l'eau, par rapport au début du graphe (stock au temps t – stock à l'instant initial),
- La courbe verte représente la variation du stock de substance particulaire dans le sédiment, par rapport au début du graphe (stock au temps t – stock à l'instant initial),
- La courbe rouge le « flux cumulé » rejeté par les rivières, c'est-à-dire la quantité totale de substance particulaire rejetée par la rivière depuis le début de la simulation,
- La courbe rose représente le « flux cumulé » entrant (pente positive, ajout de substance donc entrée) ou sortant (pente négative, retrait de substance donc sortie) par les limites de la boîte considérée (on ne différencie pas ici la frontière – nord, sud, est ou ouest – par laquelle la substance entre ou sort mais on calcule la totalité, le long de toute la limite de la boîte),
- La courbe bleu clair représente le « flux cumulé » de substance particulaire apporté par l'atmosphère,
- La courbe noire représente le « flux cumulé » de substance particulaire transitant entre le stock d'eau ou le stock de sédiment ; on parle de dépôt (pente négative, enlèvement de substance dans l'eau donc dépôt) ou de remise en suspension (pente positive, ajout de substance dans l'eau, donc remise en suspension).

A partir de ces figures ont été réalisés les bilans chiffrés des chapitres suivants.

4.2.2. Bilan sur la période entière (octobre – décembre 2008)

Les **Tableau 10** à **Tableau 13** présentent le récapitulatif des courbes bilan pour les 4 boîtes pour la simulation entière (du 13/10/2008 au 31/12/2008). Par exemple pour le **Tableau 10**, les lignes indiquent la masse totale de substance particulaire amenée par chaque rejet (dans les colonnes) au cours de la simulation. Les lignes suivantes indiquent la masse apportée qui s'est accumulée dans le sédiment (stocks dans le sédiment), celle qui reste en suspension dans l'eau et celle qui sort par les limites et sont exprimées en pourcentage de la masse apportée pour chaque rejet.

- Substances légères

On apprend grâce au **Tableau 10** qu'entre 84,3% (Huveaune au Prado) et 95% (DO Prado) des substances légères apportées pendant la période sont exportées au large (hors de la boîte de Marseille). Entre 4,5% et 11% sédimente dans la boîte de Marseille, le reste se trouvant toujours dans l'eau à la fin de la simulation (0,4 à 7,8%).

- Substances lourdes

La même analyse permet de distinguer deux groupes d'exutoire pour les rejets substances lourdes. Cortiou (à Cortiou), Bonneveine (dans la rade sud) et le DO Prado (dans la rade sud) sont les rejets dont les substances sont les plus exportées (40,6 à 52,5%). On peut éventuellement ajouter à ce groupe le dernier rejet de la rade sud, l'Huveaune au Prado, dont 23,4% des substances sont exportées.

Pour les autres rejets (tous en rade nord), seulement 9,2 à 16,5% de la substance particulaire apportée pendant la simulation sont exportées. Contrairement aux substances légères, très peu de substance lourdes reste dans l'eau à la fin de la simulation (0 à 1,5% de ce qui est apporté). Le reste a donc sédimenté. Les rejets de la rade nord sont donc les rejets pour lesquelles la part de sédimentation est la plus importante.

BOITE MARSEILLE		Cortiou	Aygalades	Huveaune en crue	Bonneveine	Belved	DO Port Autonome	DO Prado	DO Vieux Port
Substance adsorbée sur les MES L (légères)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 13/10/2008 - 31/12/2008	7 252	821	4 000	46	62	37	17	2
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt (positif) - remise en suspension (négatif))	4,9	8	10,6	8	7	6,2	4,5	11
	% de substance présent dans l'eau	7,8	5,1	5,1	2,9	0,4	0,6	0,5	1,3
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (négatif) Import (positif)	-87,3	-86,9	-84,3	-89,1	-92,6	-93,2	-95	-87,7
Substance adsorbée sur les MES H (lourdes)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 13/10/2008 - 31/12/2008	2 986	604	4 000	46	62	37	17	2
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt (positif) - remise en suspension (négatif))	46	89,55	76,6	59,2	88,1	90,8	50,6	83,5
	% de substance présent dans l'eau	1,5	0,05	0	0,2	0	0	0,05	0
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (négatif) Import (positif)	-52,5	-10,4	-23,4	-40,6	-11,9	-9,2	-49,35	-16,5

Tableau 10 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte de Marseille pour la période totale simulée du 13/10/2008 au 31/12/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.

BOITE CORTIOU		Cortiou	Aygalades	Huveaune en cru	Bonneveine	Belved	DO Port Autonome	DO Prado	DO Vieux Port
Substance adsorbée sur les MES L (légères)	Masse théorique (en MT) de substance particulière amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 13/10/2008 - 31/12/2008	7 252	-	-	-	-	-	-	-
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt positif) - remise en suspension (négatif)	0,2	0,01	0,02	0,05	0,02	0,02	0,07	0,04
	% de substance présent dans l'eau	0,4	0	0	0	0	0	0	0
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (négatif) Import (positif)	-99,4	0,01	0,02	0,05	0,02	0,02	0,07	0,04
Substance adsorbée sur les MES H (lourdes)	Masse théorique (en MT) de substance particulière amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 13/10/2008 - 31/12/2008	2 986	-	-	-	-	-	-	-
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt positif) - remise en suspension (négatif)	15,2	0,02	0,4	0,97	0,02	0,02	1	0,09
	% de substance présent dans l'eau	0,3	0	0	0	0	0	0	0
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (négatif) Import (positif)	-84,5	0,02	0,4	0,97	0,02	0,02	1	0,09

Tableau 11 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte de Cortiou pour la période totale simulée du 13/10/2008 au 31/12/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.

BOITE RADE NORD		Cortiou	Aygalades	Huveaune en crue	Bonneveine	Belved	DO Port Autonome	DO Prado	DO Vieux Port
Substance adsorbée sur les MES L (légères)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 13/10/2008 - 31/12/2008	-	821	-	-	62	37	-	2
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt positif) - remise en suspension (néгатif)	1,1	4,5	3,1	2,2	4	3,4	1,9	7
	% de substance présent dans l'eau	1,8	3,5	2,7	1,7	0,2	0,3	0,3	0,6
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (néгатif) Import (positif)	2,9	-92	5,8	3,9	-95,8	-96,3	2,2	-92,4
Substance adsorbée sur les MES H (lourdes)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 13/10/2008 - 31/12/2008	-	604	-	-	62	37	-	2
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt positif) - remise en suspension (néгатif)	1,7	72,7	10	6	71,5	77,1	10,2	63,8
	% de substance présent dans l'eau	0,1	0,1	0	0,1	0	0	0	0
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (néгатif) Import (positif)	1,8	-27,2	10	6,1	-28,5	-22,9	10,2	-36,2

Tableau 12 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte Rade nord pour la période totale simulée du 13/10/2008 au 31/12/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.

BOITE RADE SUD		Cortiou	Aygalades	Huveaune en cru	Bonneveine	Belved	DO Port Autonome	DO Prado	DO Vieux Port
Substance adsorbée sur les MES L (légères)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 13/10/2008 - 31/12/2008	-	-	4 000	46	-	-	17	-
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt positif) - remise en suspension (négatif)	0,7	0,12	1,7	2,2	0,07	0,1	0,3	0,2
	% de substance présent dans l'eau	2	0,04	0	0,2	0	0	0	0,01
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (négatif) Import (positif)	2,7	0,16	-98,3	-97,6	0,07	0,1	-99,7	0,21
Substance adsorbée sur les MES H (lourdes)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 13/10/2008 - 31/12/2008	-	-	4 000	46	-	-	17	-
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt positif) - remise en suspension (négatif)	2,8	0,5	29,6	16	0,4	0,5	11,5	3,4
	% de substance présent dans l'eau	0,4	0	0	0,1	0	0	0	0
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (négatif) Import (positif)	3,2	0,5	-70,4	-83,9	0,4	0,5	-88,5	3,4

Tableau 13 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte Rade sud pour la période totale simulée du 13/10/2008 au 31/12/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.

Les **Tableau 11** à **Tableau 13** présente une analyse plus fine par sous boîte (rade sud, rade nord, Cortiou).

- Substances légères

On a vu précédemment que pour les substances légères, entre 84.3% et 95% était exporté au large de la boîte de Marseille. On peut ajouter à cette information que ce qui n'est pas exporté ne reste pas dans sa boîte d'origine. En effet, 99.4% de la substance amenée par les rivières à Cortiou sort de la boîte de Cortiou (**Tableau 11**). 2,7% part dans la rade sud (environ la moitié y sédimente) et 2,9% dans la rade nord (environ la moitié y sédimente).

Pour les rejets en rade nord (**Tableau 12**), 92% de la substance amenée par les Aygalades sort de la boîte nord. Ces pourcentages sont respectivement de 95.8, 96.3 et 92.4 pour Belvédère - Figuier, le DO Port Autonome et le DO Vieux Port. Ce qui est exporté ne va ni dans la rade sud ni à Cortiou. Une grande partie sort de la boîte de Marseille et de l'ordre de quelques pourcents reste entre les sous-boîtes et la boîte de Marseille.

Pour les rejets en rade sud (**Tableau 13**), 98.3% de la substance amenée par l'Huveaune au Prado sort de la boîte sud, 97.6% pour Bonneveine et 99.7% pour le DO Prado. Une petite part de cet export (<5%) va dans la rade nord. Rien ne va à Cortiou.

- Substances lourdes

En ce qui concerne les substances lourdes de Cortiou, nous avons vu qu'environ la moitié de ce qui était rejeté s'exportait et l'autre sédimentait. 15% sédimente dans la boîte de Cortiou même ; seulement 1.7 et 2.8% sédimentent respectivement dans les rades nord et sud. Le reste sédimente donc près de Cortiou dans la boîte de Marseille.

Pour les rejets de la rade nord, nous avons vu que 83.5 à 90.8% sédimente dans la boîte de Marseille. La répartition de cette sédimentation est à peu près équivalente pour tous les rejets de la rade nord. Une très faible partie (<0.1%) se dépose à Cortiou et une faible partie le fait dans la rade sud (<1%) sauf pour le DO Vieux Port, 3.4%. Cette différence s'explique par le fait que le DO Vieux Port est beaucoup plus près de la rade sud que les autres (en face du Frioul). Enfin la majeure partie (4/5) du dépôt se fait dans la rade nord. On a donc à peu près 1/5 du dépôt qui se fait hors des sous-boîtes mais dans la boîte de Marseille.

Nous avons vu, grâce au **Tableau 13** que 50.6 à 76.6 % de ce qui est amené par les rivières en rade sud sédimente dans la boîte de Marseille dont 11.5 à 29.6 % en rade sud, 6 à 10.2% en rade nord et moins d'1% dans la boîte de Cortiou. Le reste (qui correspond à la moitié de ce qui a été amené ou un peu moins selon le rejet) sédimente donc dans une zone hors des sous-boîtes mais dans la boîte de Marseille.

4.2.3. Bilan sur un épisode de crue du 02/11/08 au 06/11/08

Cet épisode de crue est le plus fort de la période. Deux pics de crue sont présents sur l'hydrogramme de la crue (voir par exemple celui de Cortiou, **Figure 16**) pour tous les rejets le 02 novembre 2008 autour de 18h00 et le 04 novembre autour de 18h00.

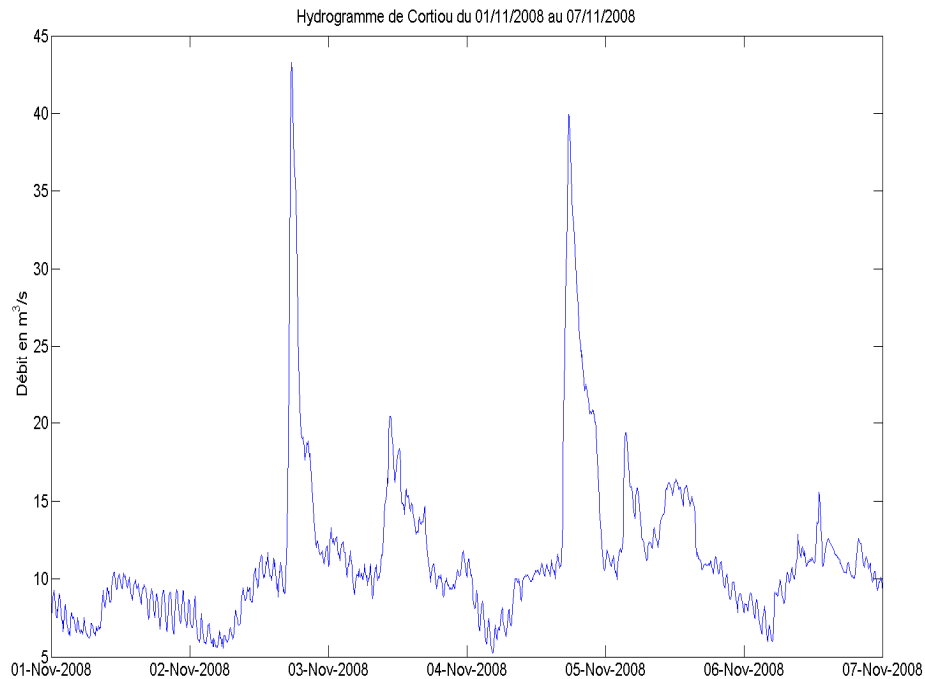


Figure 16 – Hydrogramme de Cortiou du 01/11/2008 au 07/11/2008. On distingue les deux pics de l'épisode de crue le 02 novembre 2008 vers 18h et le 04 novembre 2008 vers 18h aussi.

La quantité de substance rejetée pendant la crue représente pour Cortiou 8% du total rejeté pendant la période du 13/10/2008 au 31/12/2008. Cette part est de 13% pour les Aygalades, 15% pour l'Huveaune au Prado, 21% pour Bonneveine, 44% pour Belvédère - Figuière, 44% pour le DO Port Autonome, 48 % pour le DO Prado et 18% pour le DO Vieux Port.

a) Analyse de la boîte de Marseille

▪ Substances légères

Le **Tableau 14** permet de dire que 6.8 à 25.8% des substances légères apportées par les rivières au milieu pendant la crue sont exportées. Entre 2.7 et 4.5% (avec 7.1% pour Bonneveine et 10% pour le DO Vieux Port) sédimente pendant cette période (voir les **Figure 17**, **Figure 18** et **Figure 19** qui présente le stock de sédiment avant et après la crue pour les rejets de Bonneveine, de Cortiou et des Aygalades). Le reste est donc encore en suspension dans l'eau à la fin de la crue (70 à 90.1%).

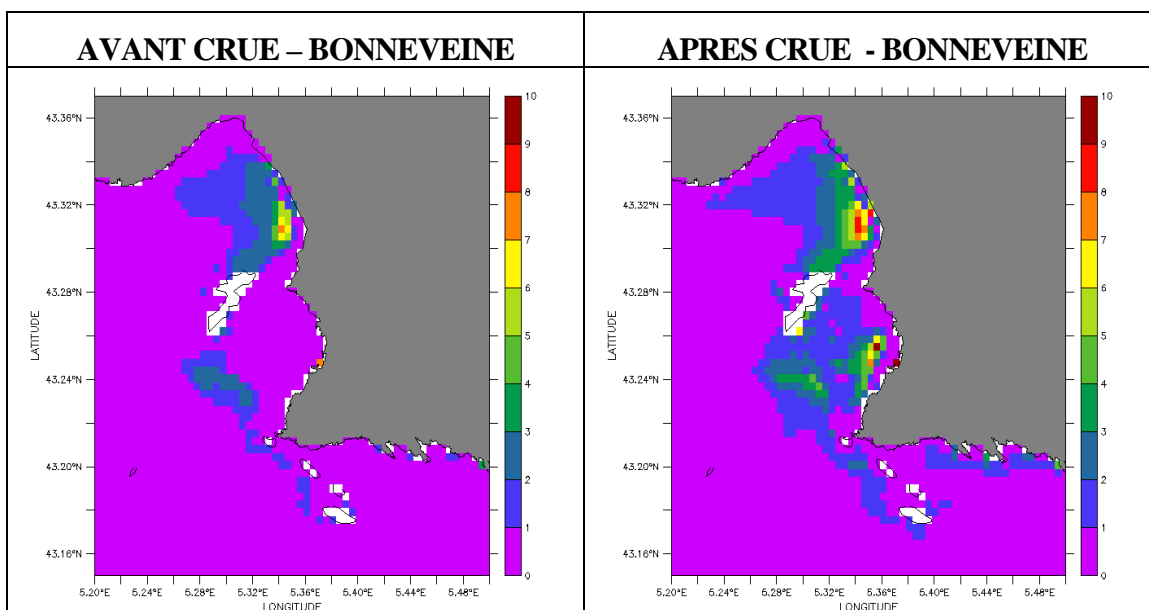


Figure 17 – Stock de substances légères pour le rejet de Bonneveine avant la crue le 02/11/2008 (à gauche) et après la crue le 06/11/2008 (à droite). Les unités sont indicatives et servent uniquement à la comparaison avant/après, la simulation étant idéalisée et les concentrations en substance dans le sédiment purement théoriques.

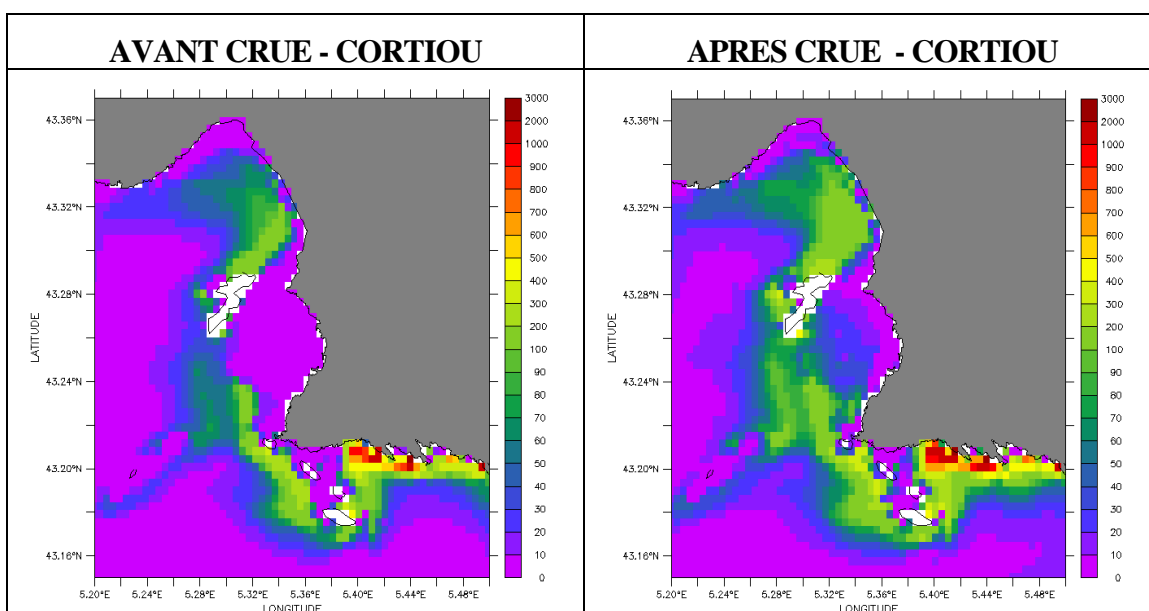
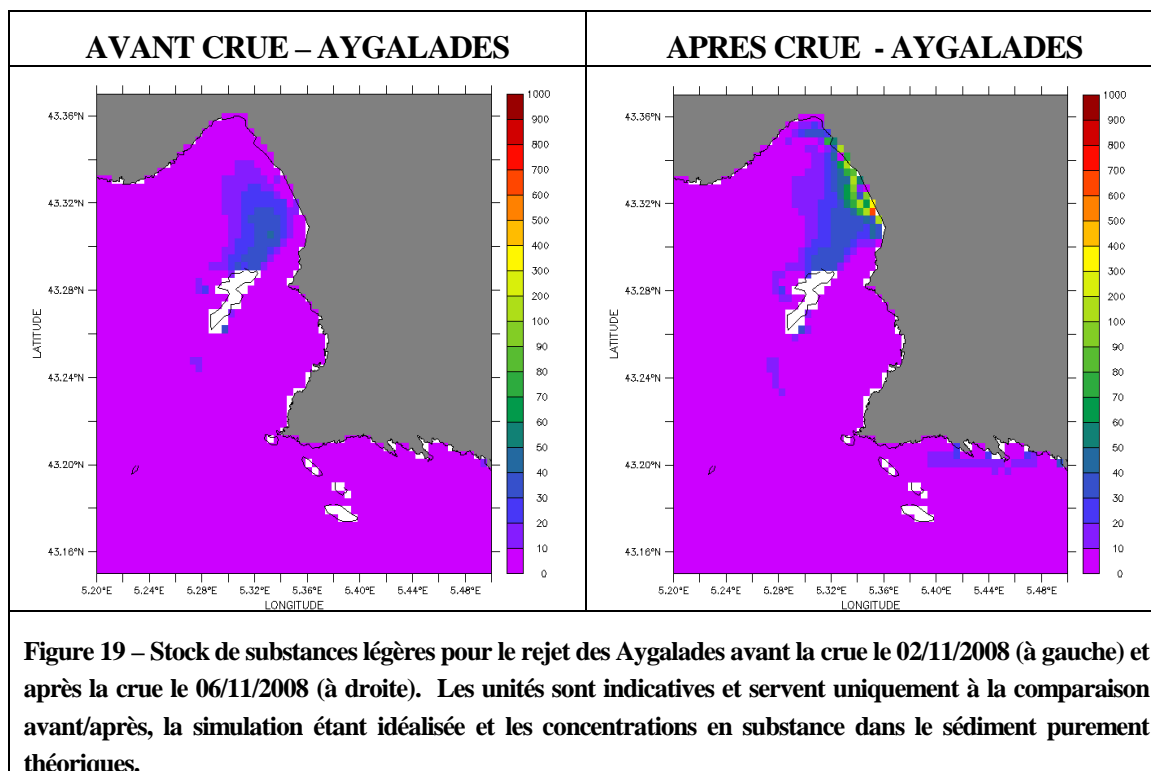


Figure 18 – Stock de substances légères pour le rejet de Cortiou avant la crue le 02/11/2008 (à gauche) et après la crue le 06/11/2008 (à droite). Les unités sont indicatives et servent uniquement à la comparaison avant/après, la simulation étant idéalisée et les concentrations en substance dans le sédiment purement théoriques.



- Substances lourdes

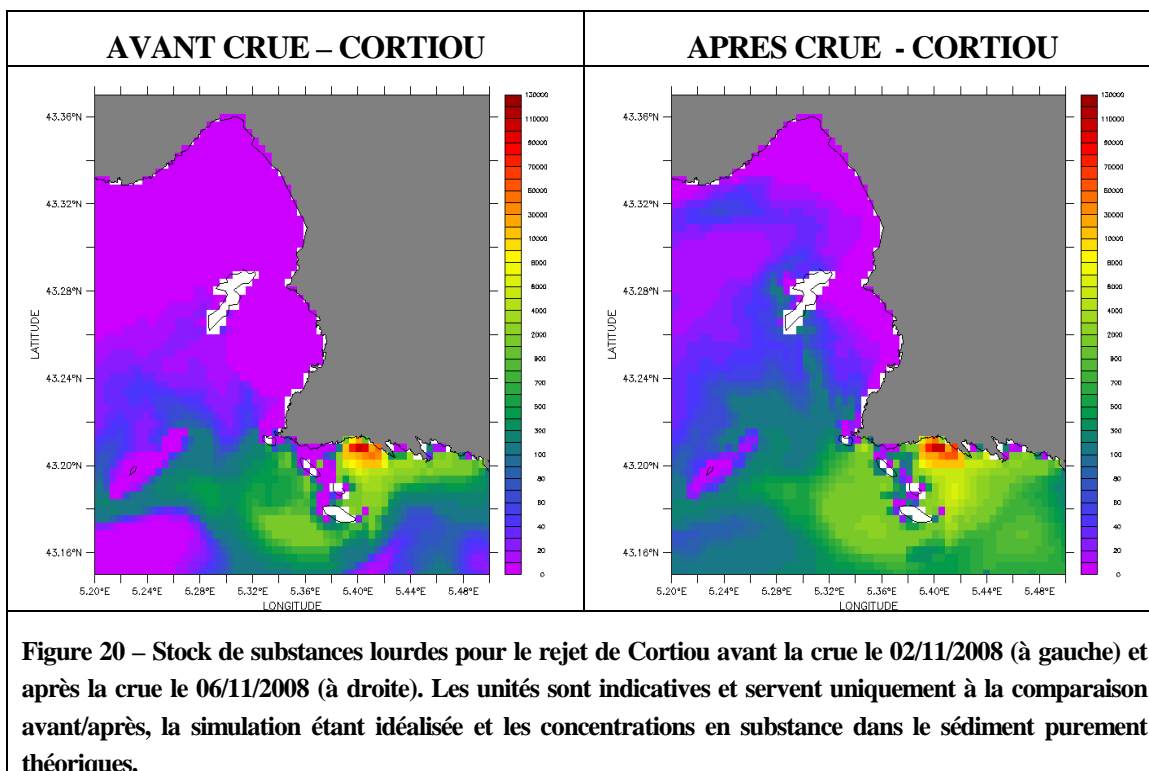
Les substances lourdes ont un comportement différent : une très forte part a tendance à sédimenter 60.1 à 85.8%. Le **Tableau 14** indique un pourcentage supérieur à 100% qui sédimente associé à un stock inférieur au stock dans l'eau au début de la crue. L'explication est simple : des substances étaient déjà en suspension dans l'eau au début de la crue (rejeté avant la crue et n'ayant pas encore sédimenter d'après les courbes bilans non présentées ici) et se sont déposées. On observe peu d'export de la boîte de Marseille pour les substances lourdes (entre 1.2 et 7.3%).

b) Analyse des sous-boîtes

Comme précédemment on peut analyser plus finement ces exports de substance à l'aide des sous-boîtes des **Tableau 15** à **Tableau 17**.

- Boîte de Cortiou (**Tableau 15**)

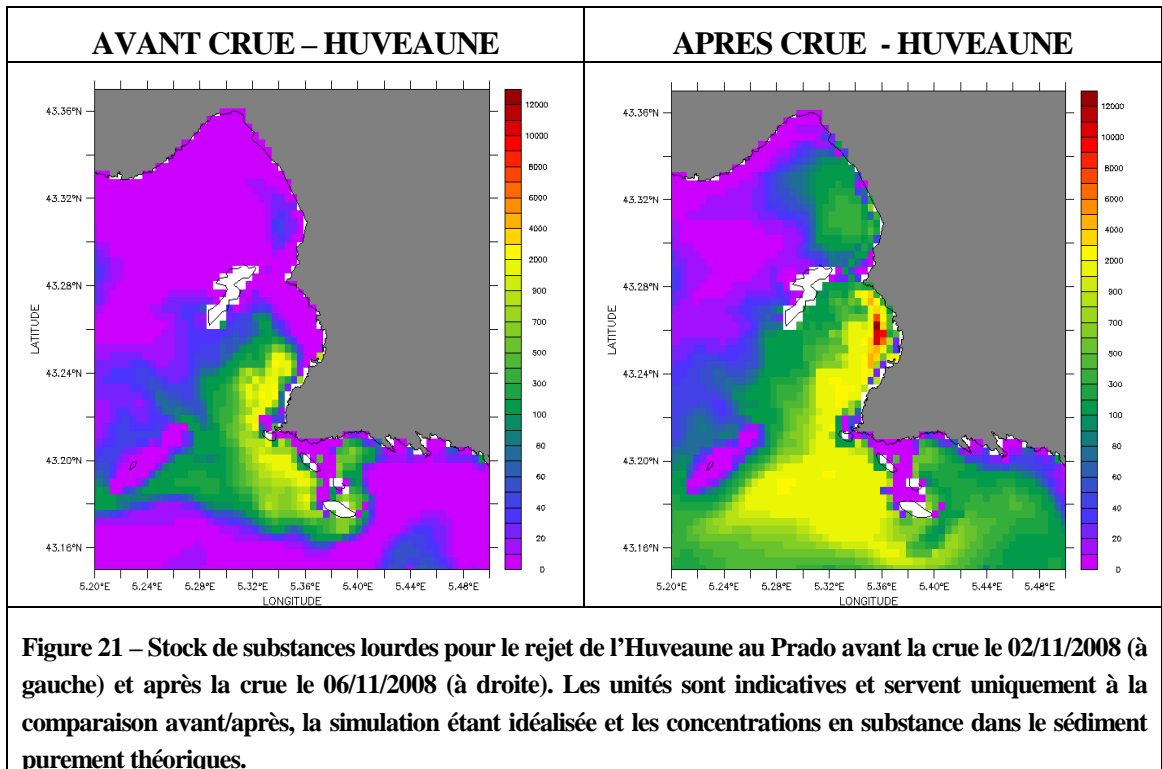
Pour Cortiou, 17.3 % des substances L reste dans l'eau à Cortiou, le reste étant exporté principalement dans l'eau hors des sous-boîtes. Pour les substances H, 32% sédimente à Cortiou, 17.1% reste dans l'eau et le reste est exporté de la boîte dont 1.1 et 1.9% vont respectivement entrer dans les rades nord et sud. Environ 40% sédimente donc dans la boîte de Marseille mais hors des sous-boîtes : ce dépôt correspond effectivement à l'augmentation du stock que l'on voit à la **Figure 20** à la limite sud de la carte et à l'Ouest autour de l'île Planier.



- Boîte Rade sud

Pour les substances légères des rejets situés en rade sud, une partie inférieure à 5% sédimente, 34.7 à 42.8 % reste en suspension dans l'eau et 52.4 à 62.9% s'exporte de la boîte sud dont apparemment rien n'atteint Cortiou (valeurs négatives des substances exportées dans le), 20.1 à 34% va dans la boîte de la rade nord (environ 1% y sédimente). Pour les substances lourdes, 85 (Huveaune) à 93% de ce qui est amené et de ce qui était déjà présent dans l'eau (valeurs négatives de la variation du stock dans l'eau dans le tableau) sédimente dans la boîte sud. La **Figure 21** illustre le fait qu'une très forte partie de l'apport amené par l'Huveaune sédimente sur place. On peut noter aussi une petite partie qui part en rade nord et une autre partie qui sédimente hors de sa boîte initiale mais en restant dans la boîte de Marseille.

Dans la boîte de Cortiou (**Tableau 15**), les valeurs faiblement négatives du stock dans le sédiment et du stock dans l'eau semblent indiquer de la remise en suspension et un stock déjà présent dans l'eau qui s'exportent pendant la durée de la crue (on avait de l'export de substance légère aussi). Seul quelques pourcents atteignent la rade nord et 0.9 à 1.7% s'y dépose.



- Boîte Rade nord (Tableau 16)

Pour les rejets situés en rade nord, une très forte part des substances légères qui sont amenées pendant la crue reste présente dans l’eau sur place (77.3 à 97.4%). La part sortant de cette boîte nord (0.5 à 18.4%) ne semble ni aller dans la rade sud ni à Cortiou (valeurs négatives des substances exportées qui indiquent une sortie des boîtes).

Les substances lourdes ne sortent pas ou très peu de la boîte nord (0.5 à 1.6% et il en rentre même 0.2% pour le rejet des Ayalades). Elles sédimentent sur place (54.7 à 97.4%). Le reste est toujours en suspension dans l’eau à la fin de la crue. Il sort plus de la boîte de Marseille que ce qu’il sort de la boîte nord car il y a eu un apport plusieurs jours avant la crue (28 octobre 2008) qui a amené de la substance qui est sortie de la boîte rade nord mais pas encore de la boîte de Marseille au début de la crue.

BOITE MARSEILLE		Cortiou	Aygalades	Huveaune en crue	Bonneveine	Belved	DO Port Autonome	DO Prado	DO Vieux Port
Substance adsorbée sur les MES L (légères)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 02/11/2008 - 06/11/2008	567	109	582	9	27	16	8	0,4
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt positif) - remise en suspension (néгатif)	3,9	2,7	4,5	7,1	4,6	3,3	4,1	10
	% de substance présent dans l'eau	70,3	89	84	74,1	85	88,2	89,1	81,3
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (néгатif) Import (positif)	-25,8	-8,3	-11,5	-18,8	-10,4	-8,5	-6,8	-8,7
Substance adsorbée sur les MES H (lourdes)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 02/11/2008 - 06/11/2008	247	33	582	9	27	16	8	0,4
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt positif) - remise en suspension (néгатif)	60,1	59,8	101	120,2	85,8	82,5	104	114,6
	% de substance présent dans l'eau	33	38,2	-5,1	-27,5	13	16,1	-7,2	-20,1
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (néгатif) Import (positif)	-7,1	-2	-3,9	-7,3	-1,2	-1,4	-2,9	-5,5

Tableau 14 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte de Marseille pour l'épisode de crue du 02/11/2008 au 06/11/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.

BOITE CORTIOU		Cortiou	Aygalades	Huveaune en crue	Bonneveine	Belved	DO Port Autonome	DO Prado	DO Vieux Port
Substance adsorbée sur les MES L (légères)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 02/11/2008 - 06/11/2008	567	-	-	-	-	-	-	-
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt positif) - remise en suspension (négatif)	0,6	0,1	0,1	0,1	0	0,03	0,1	0,2
	% de substance présent dans l'eau	17,3	-1,6	-3	-3,6	-0,9	-0,8	-2,4	-3,2
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (négatif) Import (positif)	-82,1	-1,5	-2,9	-3,5	-0,9	-0,77	-2,3	-3
Substance adsorbée sur les MES H (lourdes)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 02/11/2008 - 06/11/2008	247	-	-	-	-	-	-	-
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt positif) - remise en suspension (négatif)	32	-0,02	-0,1	-0,4	0	0	-0,1	0
	% de substance présent dans l'eau	17,1	-0,08	-0,5	-1	-0,02	-0,03	-0,4	-0,2
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (négatif) Import (positif)	-50,9	-0,1	-0,6	-1,4	-0,02	-0,03	-0,5	-0,2

Tableau 15 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte de Cortiou pour l'épisode de crue du 02/11/2008 au 06/11/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.

BOITE RADE NORD		Cortiou	Aygalades	Huveaune en crue	Bonneveine	Belved	DO Port Autonome	DO Prado	DO Vieux Port
Substance adsorbée sur les MES L (légères)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 02/11/2008 - 06/11/2008	-	109	-	-	27	16	-	0,4
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt (positif) - remise en suspension (néгатif))	0,6	2,1	0,9	0,9	4,3	3	1	8,4
	% de substance présent dans l'eau	8,7	97,4	33	19,2	77,3	78,6	33	83,2
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (néгатif) Import (positif)	9,3	-0,5	33,9	20,1	-18,4	-18,4	34	-8,4
Substance adsorbée sur les MES H (lourdes)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 02/11/2008 - 06/11/2008	-	33	-	-	27	16	-	0,4
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt (positif) - remise en suspension (néгатif))	0,8	54,7	1,7	2	82,9	79,2	0,9	97,4
	% de substance présent dans l'eau	0,3	45,5	0,6	-0,7	16,3	20,3	0,3	1
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (néгатif) Import (positif)	1,1	0,2	2,3	1,3	-0,8	-0,5	1,2	-1,6

Tableau 16 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte Rade nord pour l'épisode de crue du 02/11/2008 au 06/11/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.

BOITE RADE SUD		Cortiou	Aygalades	Huveaune en crue	Bonneveine	Belved	DO Port Autonome	DO Prado	DO Vieux Port
Substance adsorbée sur les MES L (légères)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 02/11/2008 - 06/11/2008	-	-	582	9	-	-	8	-
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt positif) - remise en suspension (négatif)	1,1	0,1	2,4	4,8	0,1	0,05	2,2	0,5
	% de substance présent dans l'eau	-5,4	-1,2	34,7	42,8	-1,2	-0,6	36,2	-0,1
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (négatif) Import (positif)	-4,3	-1,1	-62,9	-52,4	-1,1	-0,55	-61,6	0,4
Substance adsorbée sur les MES H (lourdes)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 02/11/2008 - 06/11/2008	-	-	582	9	-	-	8	-
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt positif) - remise en suspension (négatif)	2,9	0,3	84,4	91,5	0,01	0,01	92,5	2,5
	% de substance présent dans l'eau	-1	-2,4	8	0,4	-0,23	-0,27	1,8	-6,9
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (négatif) Import (positif)	1,9	-2,1	-7,6	-8,2	-0,22	-0,25	-5,6	-4,4

Tableau 17 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte Rade sud pour l'épisode de crue du 02/11/2008 au 06/11/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.

4.2.4. Bilan sur un épisode de remise en suspension du 26/11/08 au 01/12/08

Cet épisode correspond à de la remise en suspension due aux fortes vagues (voir **Figure 22**).

Seul le **Tableau 18** (page 50) de la boîte de Marseille est présenté dans le rapport. Les autres tableaux correspondant aux autres boîtes sont annexés au rapport.

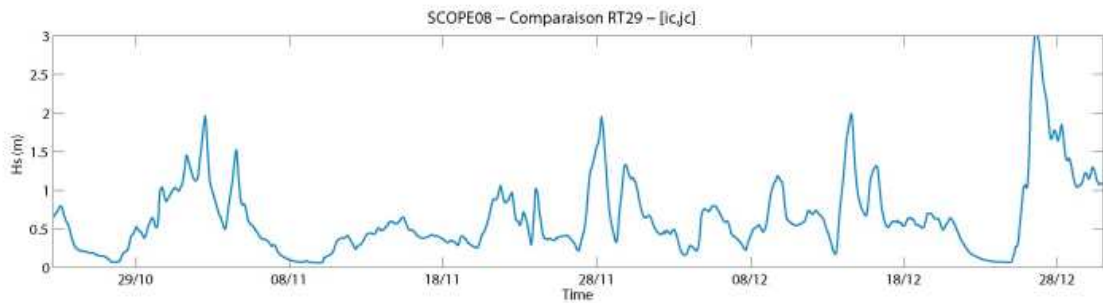


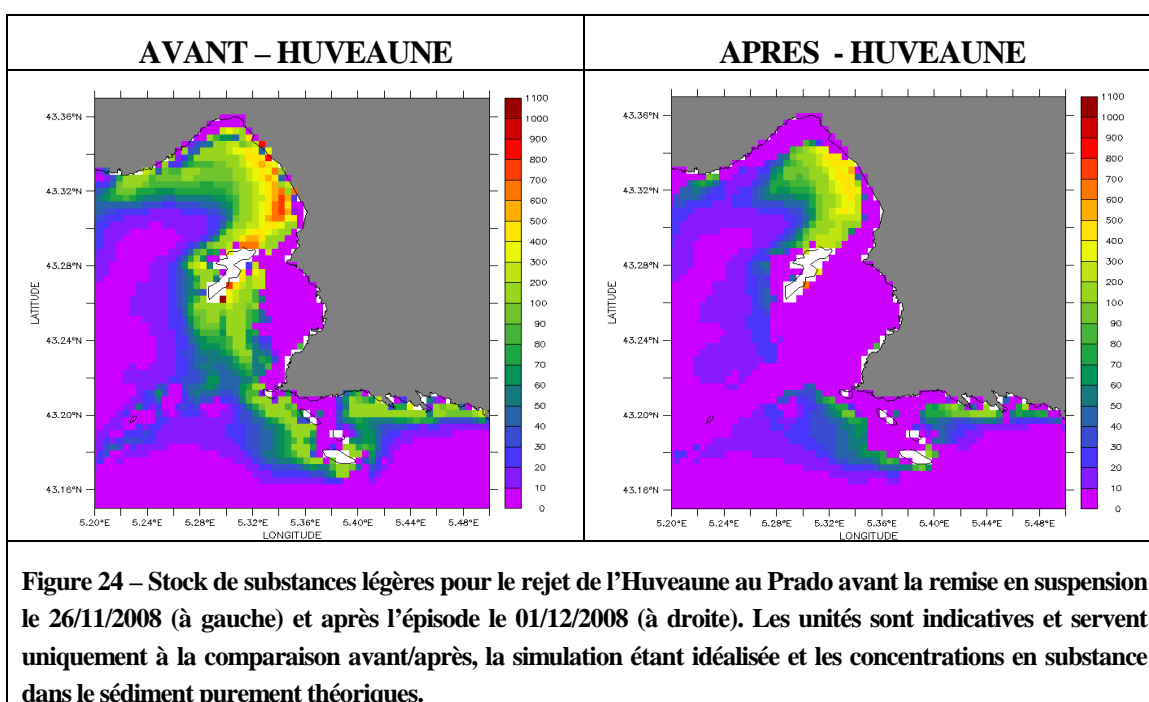
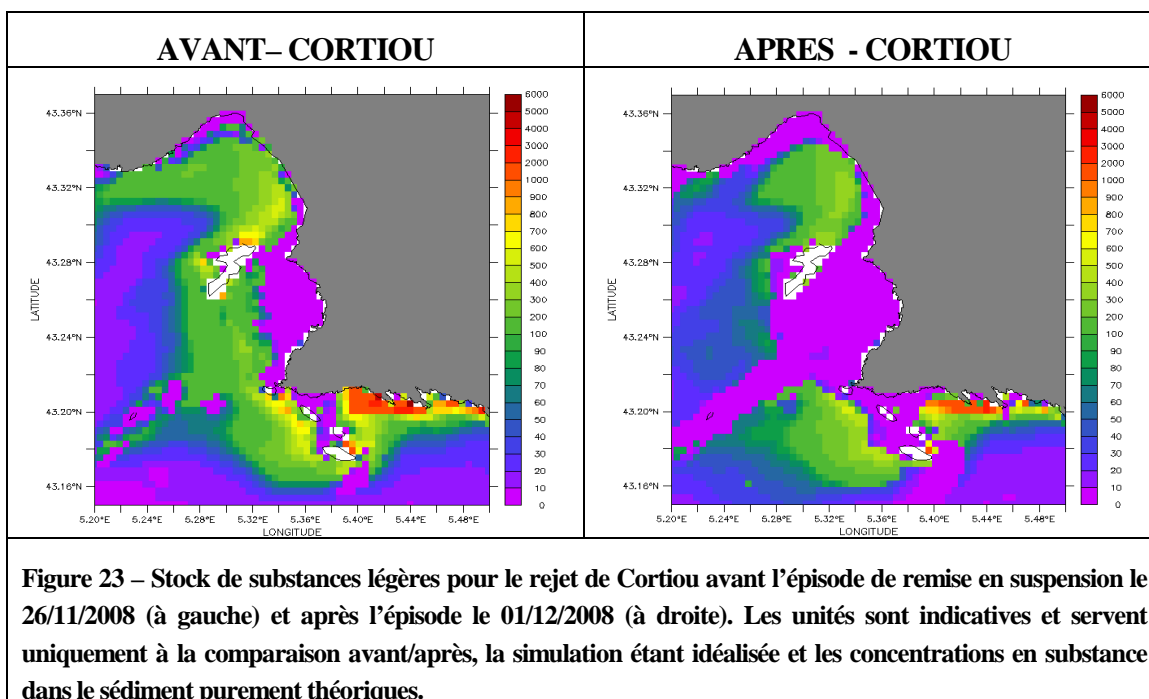
Figure 22 – Variation de la hauteur significative des vagues en fonction du temps à Cortiou (d’après Verney R. 2012).

▪ Substances légères

Les substances adsorbées sur les MES légères se remettent toutes en suspension (le pourcentage de substance stockée dans le sédiment négatif ce qui indique une remise en suspension) ; parfois peu par rapport à ce qui est rejeté (Aygaldes 0.1%, Cortiou 7%), parfois beaucoup (Huveaune au Prado 319%, DO Prado 665%).

Pour Cortiou la tendance, d’après les bilans, montre une remise en suspension d’une part assez faible par rapport à ce qui arrive par les rivières (7%). On voit en effet d’après les cartes **Figure 23** que les substances provenant de Cortiou restent dans la rade nord, dans une zone entre l’île Planier et l’île du Riou et autour de Cortiou le long de la côte. Seul ce qui est en rade sud, selon une ligne rade sud - l’île Planier et dans une direction sud du rejet de Cortiou (île de Jaire, Calseraigne, puis direction Sud-Ouest) est remis en suspension et évacué de la zone.

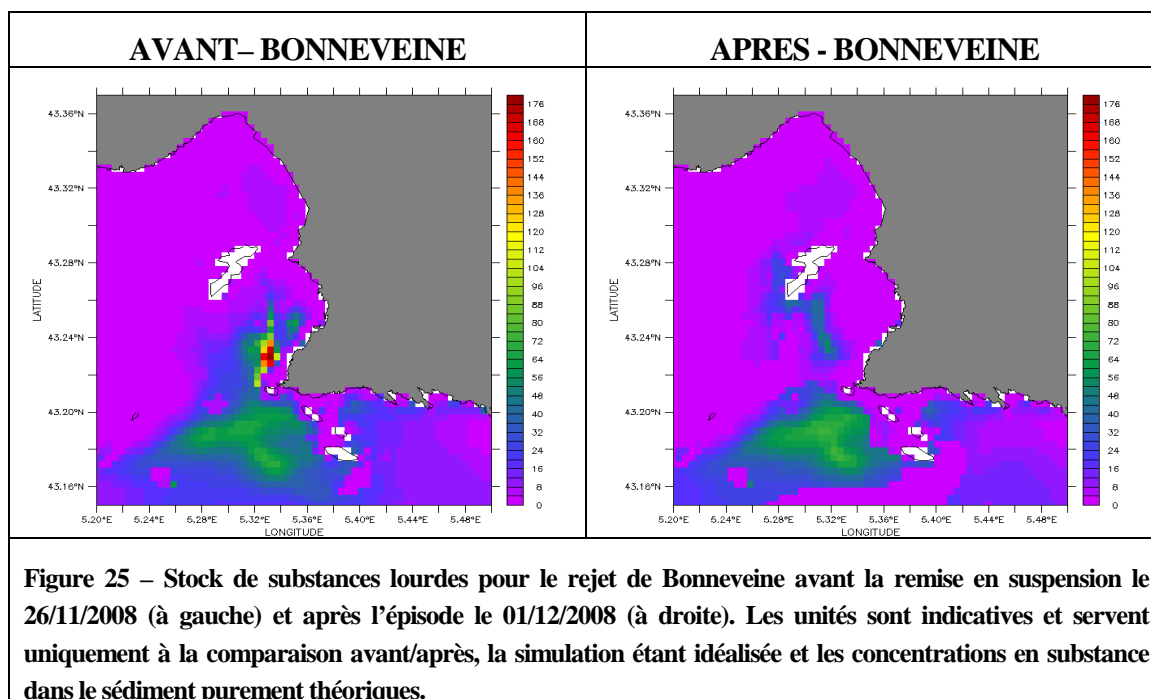
Le pourcentage de remise en suspension de substances issues de l’Huveaune au Prado par rapport à la quantité amenée par la rivière est très supérieur à celui de Cortiou (respectivement 319% et 7%). Les cartes de la **Figure 24** montrent en effet que la substance est chassée un peu partout (rade nord, Cortiou, zone entre l’île Planier et Riou) mais toujours principalement dans la rade sud et dans selon une ligne rade sud – île Planier.



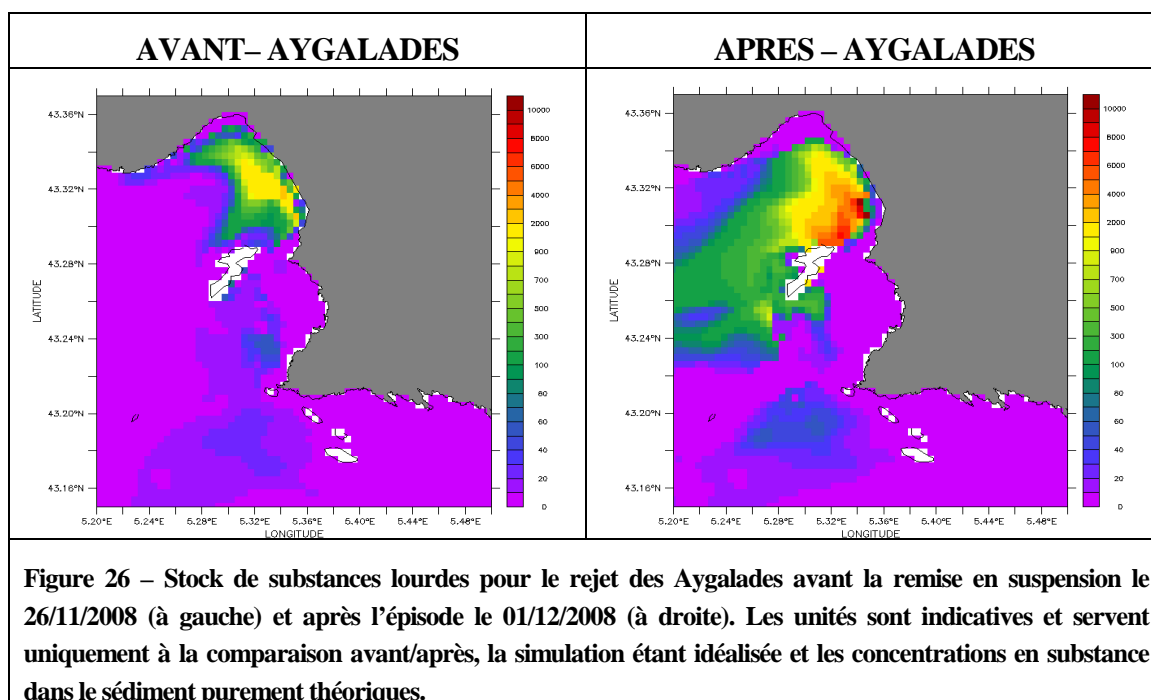
- Substances lourdes

Pour les substances lourdes, on doit distinguer les apports.

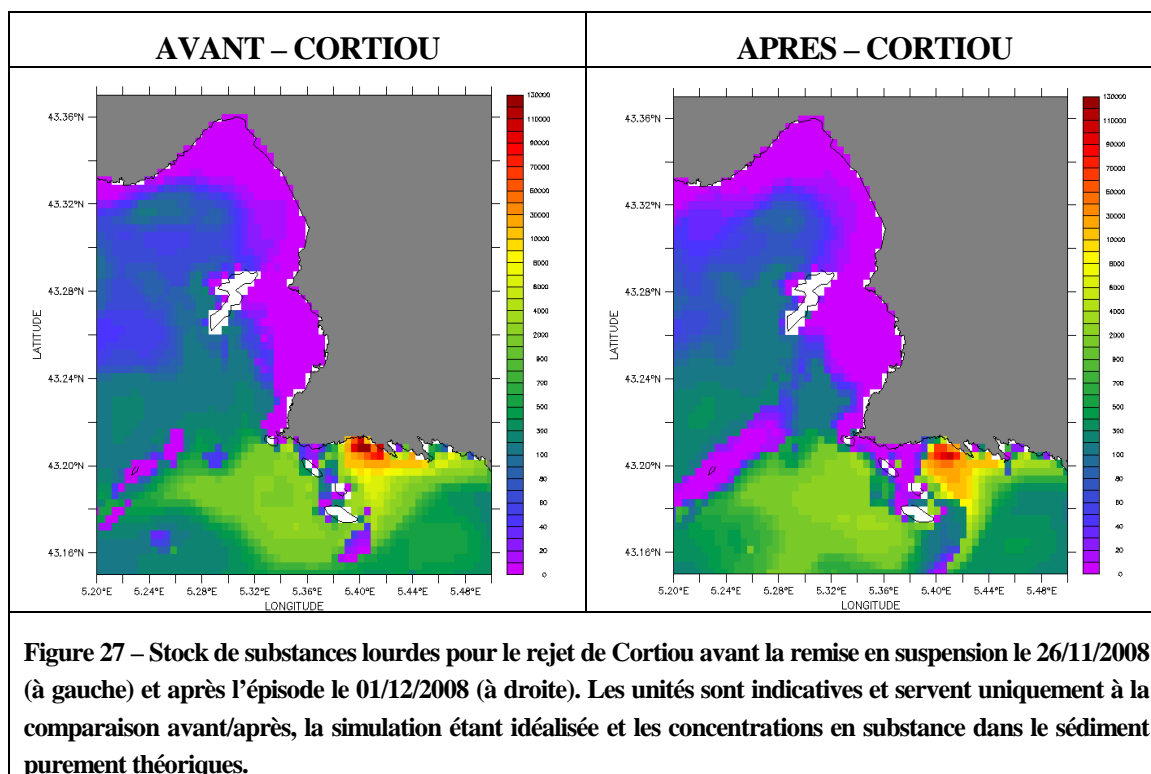
Pour les apports de la rade sud (Huveaune, Bonneveine, DO Prado) il y a remise en suspension. Pour le rejet de Bonneveine par exemple, on voit sur les cartes de la **Figure 25** une chasse des substances lourdes qui avaient sédimenté, en rade sud, mais aussi dans une direction sud du rejet de Cortiou (île de Jaire, Calseraigne, puis direction Sud-Ouest).



Pour les apports de la rade nord (Aygaldes, DO Vieux Port et Belvédère - Figurier à l'exception du DO Port Autonome) il y a plutôt dépôt de sédiment. On peut peut-être expliquer cette différence par la configuration de la rade nord, moins exposée que les autres. Pour les Aygalades Figure 26, le dépôt est plus flagrant et se fait surtout en rade nord et à l'Ouest du Frioul.



La boîte de Cortiou présente aussi une variation positive de stock de substance dans les sédiments à l'issue de la période. Nous avons vu que beaucoup de sédiment lourd se dépose à proximité de Cortiou, ce n'est donc pas étonnant. La configuration avec l'île du Riou protège Cortiou des vagues au large (voir **Figure 27**). Cependant, on peut noter un pourcentage important (53%) de l'apport en substance qui reste en suspension dans l'eau et on retrouve aussi ce qu'on voyait pour les substances légères, c'est-à-dire une remise en suspension et une chasse des sédiments le long d'une ligne rade sud - l'île Planier et dans une direction sud du rejet de Cortiou (île de Jaire, Calseraigne, puis direction Sud-Ouest).



BOITE MARSEILLE		Cortiou	Aygalades	Huveaune en crue	Bonneveine	Belved	DO Port Autonome	DO Prado	DO Vieux Port
Substance adsorbée sur les MES L (légères)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 26/11/2008 - 01/12/2008	550	250	10	3	1,4	0,3	0,05	0,4
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt (positif) - remise en suspension (néгатif))	-7	-0,1	-319	-30	-119	-251	-665	-5,9
	% de substance présent dans l'eau	30	38,5	-78	22	-365	-120	-265	53
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (néгатif) Import (positif)	-77	-61,6	-497	-108	-584	-471	-1030	-52,9
Substance adsorbée sur les MES H (lourdes)	Masse théorique (en MT) de substance particulaire amenée dans la boîte considérée par les rivières pendant la période 26/11/2008 - 01/12/2008	222	324	10	3	1,4	0,3	0,05	0,4
	% de substance stockée dans le sédiment (dépôt (positif) - remise en suspension (néгатif))	14,9	69,8	-700	-85	15	-630	-958	36,7
	% de substance présent dans l'eau	53,1	22,7	110	128	-45	527	-612	47,3
	% de substance échangée aux limites (flux net) Export (néгатif) Import (positif)	-32	-7,5	-690	-57	-130	-203	-1670	-16

Tableau 18 – Récapitulatif des différents rejets de substances particulières dans la boîte de Marseille pour l'épisode de remise en suspension du 26/11/2008 au 01/12/2008. Les masses présentées ici sont théoriques (la simulation étant idéalisée) et représente le flux brut. Les stocks et échanges aux limites sont exprimés en pourcentage de la masse rejetée.

4.2.5. Synthèse des bilans pour les 3 épisodes analysés

En conclusion l'analyse des bilans sur la **période entière** a révélé :

- pour les substances légères :
 - Plus de 80% sont exportées de la boîte de Marseille, environ 13% sédimentent, 7% restent dans l'eau ;
 - Ce qui n'est pas exporté dans la boîte de Marseille ne reste pas dans sa boîte d'origine : pour le rejet de Cortiou, tout ce qui est amené sort de la boîte de Cortiou, on retrouve moins de 3% dans les rade sud et nord ; plus de 90% de ce qui est amené par les rivières sort de la rade nord (et n'est pas retrouvé ni en rade sud ni à Cortiou) ; plus de 98% de ce qui est amené par les rivières sort de la rade sud dont moins de 5% va en rade nord (rien à Cortiou) ;
 - On a donc une part importante de ce qui n'est pas exporté de la boîte de Marseille (soit 10 à 15% de l'apport des rivières) qui se dépose ou reste en suspension dans l'eau entre les sous-boîtes et les limites de la boîte de Marseille ;
- pour les substances lourdes (qui restent très peu en suspension), on distingue deux groupes (à une exception près) :
 - Les rejets de la rade sud et Cortiou : 40 à 50% d'export, 50% à 60% de dépôt dont
 - 15% dans la boîte de Cortiou même pour le rejet de Cortiou (le reste étant hors de la boîte de Cortiou mais dans la boîte de Marseille)
 - 10 à 30% en dans la boîte de la rade sud, 10% dans la boîte de la rade nord et moins d'1% à Cortiou pour les rejets de la rade sud ;
 - L'Huveaune (rejet de la rade sud) est un peu à part car le ratio est plutôt de 25% exporté et 75% qui se dépose ;
 - Pour les rejets de la rade nord, on observe peu d'export (10 à 15 %), le reste sédimente (4/5 sédimente sur place, le reste entre la boîte de la rade nord et la boîte de Marseille).

L'analyse des bilans sur la **période de crue** a révélé :

- pour les substances légères :
 - un maximum de 25% de substance est exporté de la boîte de Marseille et 70% à 90% reste dans l'eau dont :
 - 17% venant du rejet de Cortiou reste dans la boîte de Cortiou,
 - 50 à 60% venant de la rade sud y reste, 20 à 30% dans la rade nord,
 - 80 à 97 % venant de la rade nord reste en suspension dans l'eau dans la rade nord même (rien ailleurs).

- pour les substances lourdes :
 - on observe très peu d'export (<7%) et une partie reste en suspension dans l'eau contrairement aux observations sur la période totale. Il y a un épisode concomitant de vagues qui peut agiter l'eau et garder de la substance en suspension ;
 - 60 à 85% sédimente (voir plus de 100%, ce qui représente ce qui était déjà dans l'eau et une partie de ce qui arrive) dont
 - 40% pour Cortiou qui sédimente hors de la sous-boîte (donc entre Cortiou et la limite de la boîte de Marseille,
 - pratiquement l'intégralité de ce qui arrive en rade sud sur place,
 - pratiquement l'intégralité de ce qui arrive en rade nord sur place.

L'analyse des bilans pour **la période de remise en suspension** a révélé :

- pour les substances légères :
 - une remise en suspension assez fréquente des substances dont l'intensité varie en fonction du rejet, pour les Aygalades ou Cortiou on remet en suspension une part correspondant à moins de 10% de l'apport alors que pour l'Huveaune ou le DO Prado on remet en suspension une part correspondant à 4 à 7 fois ce qui est apporté pendant la période.
- pour les substances lourdes :
 - il y a remise en suspension dans la rade sud
 - il y a dépôt dans la rade nord (sauf pour le DO Port Autonome) et à Cortiou. Ceci est sûrement dû à la configuration de la rade nord et de Cortiou avec l'île du Riou qui atténue les vagues.

5. Conclusion

Cette étude présente des simulations de substances dissoutes et particulaires idéalisées et sans réaction chimiques avec le milieu adsorbées sur des matières en suspension (MES). Ces rejets de MES et de substances sont faits par les rivières et le réseau d'assainissement dont les débits réalistes ont été fournis par les gestionnaires.

Grâce à l'aide de simulations, nous avons pour les substances dissoutes estimées les temps d'évacuation et les temps de séjour des substances dans l'eau dans 4 boîtes créées sur la zone (rade nord, rade sud, Cortiou et Marseille). On rappelle qu'ici que le temps de séjour est le temps entre le début de la crue et le début de la sortie de la boîte de la substance (alors que le temps d'évacuation est le temps que met toute la substance à sortir).

Les temps d'évacuation sont dépendants de l'intensité des crues et de leurs fréquences. Ils sont donc souvent plus longs pour les périodes d'automne/hiver que les périodes de printemps/été. Cette conclusion peut varier selon les années et s'il l'on a un automne/hiver particulièrement sec. Lors de période de courant sud, en général quelque soit la crue, les temps d'évacuation sont assez courts (entre 1 à 5 jours avec un maximum de 11 jours pour une grosse crue) et cela quelques soient les boîtes observées (Cortiou, rade nord, rade sud). En cas de courant nord, les temps d'évacuation sont plus long (7 jours). Les cas de courants changeant pendant la période observée (souvent éloignant puis ramenant les substances dans la zone) sont les cas le plus défavorables, pouvant conduire à un temps d'évacuation d'un mois en cas de concomitance de cette météorologie avec un épisode de forte crue.

Les temps de séjour sont par définition plus courts que les temps d'évacuation. Pour un courant sud, le temps de séjour se situe entre quelques heures et 3 jours alors que pour un courant nord, il sera de 1,5 à 3j. Au maximum, les simulations donnent des temps de séjour d'une semaine quand les courants sont changeants.

Les cartes de minimum de dilution présentées dans ce rapport permettent de rapprocher les simulations idéalisées réalisées dans ce travail de cas plus réels de substances dissoutes rejetées dans le milieu. Les cartes sont assez changeantes selon le rejet et la période observée. Globalement, on note que certains composés peuvent être trouvés assez loin de leur rejet de départ en considérant des cas extrêmes (minimum de la dilution correspondant à un maximum de concentration et concentrations maximale dans la rivière).

Le minimum de dilution pouvant n'être atteint qu'une fois dans toute la période nous avons tracé pour plus de représentativité les percentiles 25, 50 et 90 de la dilution. Ces cartes représentent la dilution atteinte 25, 50 et 90 % du temps de la période simulée (13 octobre – 31 décembre 2008). En prenant le front de dilution 1000 pour Cortiou, on observe que les dilutions minimales sont atteintes peu de fois. On passe d'un front 1000 qui atteint toute la boîte de Marseille (dil. min.) à un front qui se réduit progressivement à l'île Maire et à l'archipel du Riou (percentile 25), puis seulement l'archipel du Riou (percentile 50) et finalement moins d'un km autour du rejet (percentile 90).

Les simulations de substances particulières réalisées ont permis de mesurer la proportion de substances légères (adsorbées sur des MES légères) et lourdes (adsorbées sur des MES lourdes) exportée par les limites des boîtes et celle restant dans les boîtes pour 3 cas : la période entière, un cas de crue et un cas de fortes vagues (remise en suspension).

L'analyse des bilans sur la période entière a révélé pour les substances légères que plus de 80% sont exportées de la boîte de Marseille, environ 13% sédimente, 7% reste dans l'eau et qu'en général, ce qui reste dans la boîte de Marseille ne reste pas dans sa boîte d'origine. Pour les substances lourdes (qui restent très peu en suspension), on distingue deux groupes (à une exception près). Les rejets de la rade sud plus Cortiou : 40 à 50% d'export, 50% à 60% de dépôt et les rejets de la rade nord où on observe peu d'export (10 à 15 %), le reste sédimente (4/5 sédimente sur place, le reste entre la boîte de la rade nord et la boîte de Marseille). L'exception étant l'Huveaune (rejet de la rade sud) présente un ratio de 25% d'export et 75% de dépôt.

L'analyse des bilans sur la période de crue a révélé que pour les substances légères un maximum de 25% de substance est exporté de la boîte de Marseille et 70% à 90% reste dans l'eau à la fin de la crue. Pour les substances lourdes on observe très peu d'export (<7%) et une partie reste en suspension dans l'eau contrairement aux observations sur la période totale. Il y a un épisode concomitant de vagues qui peut agiter l'eau et garder de la substance en suspension, 60 à 85% sédimente cependant.

L'analyse des bilans pour la période de remise en suspension a révélé pour les substances légères une remise en suspension assez fréquente des substances dont l'intensité varie en fonction du rejet. Pour les Aygalades ou Cortiou on remet en suspension une part correspondant à moins de 10% de l'apport alors que pour l'Huveaune ou le DO Prado on remet en suspension une part correspondant à 4 à 7 fois ce qui est apporté pendant la période. Pour les substances lourdes, il y a remise en suspension dans la rade sud et il y a dépôt dans la rade nord (sauf pour le DO Port Autonome) et à Cortiou. Ceci est sûrement dû à la configuration de la rade nord et de Cortiou avec l'île du Riou qui atténue les vagues.

La poursuite de cette étude sera la simulation d'une substance réelle (Plomb). La simulation de cette substance passe par l'introduction de concentrations réelles pour le plomb dissous et le plomb particulaire, en intégrant l'ajout de dépôts atmosphériques réalistes adsorbés sur des MES très légères (qui n'étaient pas prises en compte dans la présente étude).

6. Bibliographie

Andre, G., Garreau, P., Garnier, V., Fraunié, P., 2005. Modelled variability of the sea surface circulation in the north-western Mediterranean Sea and in the Gulf of Lions. *Ocean Dyn.* 55, 294–308.

Andre, G., Garreau, P., Fraunié, P., 2009. Mesoscale slope current variability in the gulf of Lions. Interpretation of in-situ measurements using a three-dimensional model. *Cont. Shelf Res.* 29, 407–423.

Arakawa, A., Lamb, V.R., 1977. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Meth. computational physics* 17, 174–267.

Dufois, F., Garreau, P., Le Hir, P., Forget, P., 2008. Wave- and current-induced bottom shear stress distribution in the Gulf of Lions. *Cont. Shelf Res.* 28, 1920–1934.

Jany, C., Cossa D., Djelalli Z., Garnier C., Mounier S., Pairaud I. Sauzade D., Thouvenin B., Zebracki M. (2012) METROC : Evaluation des apports de contaminants chimiques de la métropole marseillaise au milieu marin, Rapport Ifremer RST.ODE/LER/PAC/12-02 – Agence de l'eau AERM&C, 140 pp.

Jany, C., Thouvenin B., (2012) Récapitulatif des hypothèses utilisées pour les rejets de MES dans les simulations pour METROC, Rapport Interne Ifremer RST.ODE/LER/PAC/12-19, 33 pp.

Lazure, P., Dumas, F., 2008. An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Adv. Water Resour.* 31, 233–250.

Nicolle, A., Garreau, P., Liorzou, B., 2009. Modelling for anchovy recruitment studies in the Gulf of Lions (western Mediterranean Sea). *Ocean Dyn.* 59 (6), 953–968.

Pairaud, I.L., Gatti, J., Bensoussan, N., Verney, R., Garreau, P., 2011. Hydrology and circulation in a coastal area off Marseille: Validation of a nested 3D model with observations. *Journal of Marine Systems*, 88, 20-33.

Pairaud, I., Andral, B., Baucour, C., Cadiou, JF., Gonzalez, JL., Sauzade, D., Thouvenin, B., Zebracki, M., 2010. Metroc : les apports par les grandes métropoles. Evaluation des apports et modélisation hydrosédimentaire de la Baie de Marseille. AERM&C/Ifremer n° 2007 1745. RST.DOPLER/PAC/10-13, juillet 2010.

Petrenko, A., 2003. Variability of circulation features in the gulf of Lion NW Mediterranean Sea. Importance of inertial currents. *Oceanol. Acta* 26, 323–338.

Pinardi, N., Allen, I., Demirov, E., De Mey, P., Korres, G., Lascaratos, A., Le Traon, P.-Y., Maillard, C., Manzella, G., Tziavos, C., 2003. The Mediterranean ocean forecasting system: first phase of implementation (1998–2001). *Ann. Geophys.* 21, 3–20.

Pradal, M., Millet, B., 2006. Spatial heterogeneity of wind forcing: application to artificial reef functioning influenced by the circulation in the bay of Marseilles. *C. R. Biol.* 329 (7), 541–550.

Verney R. (2012) Modélisation hydrosédimentaire Rade de Marseille Configuration RHOMA modèle MARS3D V8.19, note technique IFREMER / DYNECO / PHYSED, 25 pp.

Yong Y.Y. (1994) Spéciation et bilans géochimiques des métaux traces en Méditerranée occidentale et zones côtières méditerranéennes, Thèse soutenue le 16 novembre 1994, Thèse de Doctorat de l'université Paris 6. Spécialité Océanologie, Meteorologie et Environnement, 204pp.