



HAL
open science

Les Géosciences marines vues par le prisme numérique

Emmanuel Poizot

► **To cite this version:**

Emmanuel Poizot. Les Géosciences marines vues par le prisme numérique. Sciences de l'environnement. Université de Caen Basse-Normandie, 2023. tel-04607630

HAL Id: tel-04607630

<https://normandie-univ.hal.science/tel-04607630v1>

Submitted on 10 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Normandie Université

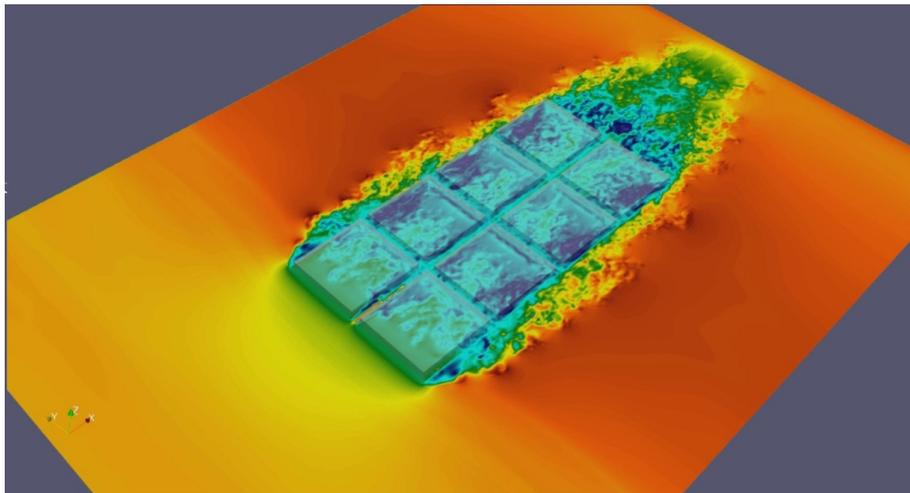
HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : Sciences de la Terre (HSCTERR)
Préparée au sein de l'Université Caen Normandie

Titre de l'habilitation à diriger des recherches : Les géosciences marines vues par le prisme numérique

Présentée par : Emmanuel POIZOT

**Le 15/12/2023 à 11h au Cnam-Intechmer,
Amphithéâtre, Bouvelard de Collignon, 50110 Tourlaville, Cherbourg-en-Cotentin**



Membres du jury

Madame Anne-Claire BENNIS	Professeure des universités, Université Caen Normandie, Caen	Garante
Monsieur Franck DUMAS	Chargé de Recherche, SHOM, Brest	Examineur
Monsieur Sylvain GUILLOU	Professeure des universités, Université Caen Normandie, Caen	Examineur
Monsieur Iraj MORTAZAVI	Professeure des universités, CNAM, Paris	Examineur
Monsieur Sylvain OUILLON	Directeur de Recherche IRD, LEGOS, Toulouse	Rapporteur
Monsieur Pierre SAGAUT	Professeur des Universités, Aix-Marseille Université, Marseille	Rapporteur
Madame Sabine SCHMIDT	Directrice de Recherche CNRS, Université de Bordeaux, Bordeaux	Rapporteuse
Monsieur Alain TRENTESAUX	Professeur des universités, Université de Lille, Lille	Examineur

Table des matières

1	Introduction	1
2	La granulométrie marqueur de la dynamique des sédiments	7
2.1	GSTA : des apports de fond	9
2.1.1	Apport N°1 : l'auto-corrélation	11
2.1.2	Apport N°2 : la grille régulière	12
2.1.3	Apport N°3 : la distance de recherche	14
2.1.4	GSTA et les outils logiciels.	15
2.2	Cas d'applications de la démarche GSTA	17
2.2.1	Une plage d'Espagne	18
2.2.2	Un récif corallien de la Réunion	19
2.2.3	Une baie du Japon	21
2.3	Conclusion	24
3	La LBM pour l'analyse numérique d'écoulements turbulents	27
3.1	Équation de Boltzmann	28
3.2	L'approche Boltzmann sur réseau : le solveur	30
3.3	Cas d'applications de la démarche de Boltzmann sur réseau	33
3.3.1	Les énergies marines renouvelables	35
3.3.2	La turbulence	39
3.3.3	La turbulence du fond	46
3.3.4	LBM pour l'aquaculture	53
3.4	Conclusion	56
4	Projets de recherche sur le thème du transport sédimentaire	59
4.1	De GSTA vers MSTA	61
4.2	Modélisation numérique du transport sédimentaire	69
4.2.1	Le couple CROCO/MUSTANG	69
4.2.2	Les premiers travaux avec CROCO	69
4.2.3	RANS et LBM	72
4.3	Conclusion	75
5	Conclusion générale	77

Table des figures

1.1	Loi de Moore montrant la progression du nombre de transistors gravés au fur et à mesure des générations de processeurs de la marque Intel. (<i>Wikimedia</i>)	2
2.1	Modèle de transport des sédiments utilisé par McLaren (1981) pour poser les bases de l'approche STA®. « $g(s)$ » correspond à la distribution granulométrique de départ, les « $r_x(s)$ » sont les distributions granulométriques résultantes du transport et « $d_x(s)$ » correspondent aux dépôts de sédiment. « $x(s)$ » est la fonction de transfert qui permet de passer de « $d_1(s)$ » à « $d_2(s)$ ». D'après McLaren (1981)	8
2.2	Détermination des vecteurs de transport des sédiments selon l'approche 1D de McLaren (1981). Les deux cas d'évolution, CB+ et FB- sont recherchés en comparant deux à deux les paramètres statistiques présents entre les échantillons sédimentaires localisés sur une même ligne. Pour déterminer la direction de transport finale en un point d'échantillon, les deux cas d'évolution vont être recherchés entre ce point et tous les points présents sur la même ligne, une sommation vectorielle étant faite finalement pour ne conserver qu'un seul vecteur de module unité.	8
2.3	Détermination des vecteurs de transport des sédiments selon l'approche 2D de Gao & Collins (1992). Trois étapes sont nécessaires pour arriver au champ de vecteur final : a) recherche des cas d'évolutions CB+ ou FB- pour tous les points voisins au point sur lequel définir le vecteur de transport (point pivot) ; b) calcul de la moyenne vectorielle de tous les cas d'évolutions déterminées en chaque point ; c) lissage par le calcul d'une moyenne vectorielle des vecteurs résiduels de l'étape précédente.	9
2.4	Échantillonnage d'un signal quelconque. A- Cas unidimensionnel, les lignes verticales pointillées représentent les positions aléatoires de prise de valeurs du signal d'origine (en bleu). Le signal échantillonné (en rouge) est une « image » détériorée du signal d'origine. B- Cas bidimensionnel, les points rouge représentent les lieux aléatoires de prise de valeurs du signal d'origine continu signifié par la variation de couleur du bleu au vert.	10
2.5	Variogramme expérimental (lignes et points noirs). En ordonnée, la semi-variance calculée avec l'Eq.(2.1), en abscisse, la distance (h) dans l'unité des coordonnées géographiques du jeu de données initiales (ici en degré-décimal). Les chiffres indiquent le nombre de paires de points utilisées pour calculer la valeur de la semi-variance.	11
2.6	Exemple de variogrammes expérimentaux (lignes et points noirs) des trois variables utilisées dans GSTA (« Mean », « Sorting », « Skewness »), avec leur modèle variographique théorique respectif (lignes rouges) (Baux <i>et al.</i> , 2019).	13
2.7	Exemple de création d'une grille régulière (croix rouges) à partir des données originales (ronds noirs) au niveau de l'embouchure de l'Orne (Normandie, France). Les données statistiques μ , σ et γ sont interpolées par krigeage ordinaire en chaque nœud de la grille régulière et sont stockées.	13

2.8	Variogramme expérimental (voir Fig. 2.5) et son modèle théorique (ligne rouge). L'expression du modèle est indiquée en rouge sur le graphique et correspond à un modèle sphérique de portée (<i>range</i>) 0.065 et pallier (<i>sill</i>) 340. S'ajoute un « effet pépite » (<i>nugget effect</i>) de 290 qui correspond à la valeur de semi-variance lorsque le modèle théorique coupe l'axe des ordonnées.	14
2.9	Prise en compte des limites morphologiques dans le calcul des vecteurs de transport par GSTA. A gauche, le champ de vecteur sans obstacles. Au centre et à droite, le même jeu de données en incorporant artificiellement des limites de formes différentes représentant des digues (Poizot & Méar, 2010).	17
2.10	Localisation de la plage de Camposoto (Espagne) et des points de prélèvements d'échantillons sédimentaires de surface. D'après Poizot <i>et al.</i> (2013).	18
2.11	Résultats GSTA des deux cas d'évolutions qui ont été reconnus comme cohérents au regard des directions de transports données avec l'analyse par traceurs fluorescents. D'après Poizot <i>et al.</i> (2013).	19
2.12	Localisation de la zone d'étude du Trou d'Eau sur le site de l'Ermitage-La Saline, île de La Réunion (France), ainsi que des échantillons sédimentaires utilisés pour l'analyse GSTA. D'après Cordier <i>et al.</i> (2012).	20
2.13	(a), champ de vecteurs par analyse GSTA du cas d'évolution <i>CB+</i> XOR <i>FB-</i> avant tempête. (b), champ de vecteurs par analyse GSTA du cas d'évolution <i>CB+</i> XOR <i>FB-</i> après tempête. Extrait de Cordier <i>et al.</i> (2012).	20
2.14	Répartition des sédiments superficiels dans la baie d' <i>Ishikari</i> . Les cartes radar (à gauche) montrent la vitesse et la direction du jour vent maximum de 1990 à 2017 à l'Observatoire météorologique d' <i>Ishikari</i> (Agence météorologique japonaise). L'embouchure actuelle de la rivière <i>Ishikari</i> située au nord-est, montrant une forme fortement déviée. D'après Kawakami <i>et al.</i> (2021).	22
2.15	Champs de vecteur du cas d'évolution <i>CB+</i> (petites flèches noir), de l'interprétation des directions principales de transport (grosses flèches rouge) et du transport à la côte (grosses flèches noires). D'après Kawakami <i>et al.</i> (2021).	24
3.1	Exemple du schéma de résolution D2Q9 en LBM. A gauche, la grille régulière montrant les chemins possibles des vitesses discrètes. A droite, la numérotation standard des vitesses aux nœuds, avec leurs valeurs de pondération respectives c_i et $c_s = 1/\sqrt{3}$.	31
3.2	Schéma de résolution D3Q27 en LBM. Les points et flèches de couleur noir, bleu et rouge, correspondent respectivement aux f_i avec des c_i de poids décroissant, allant de 2/27 (noir), 1/54 (bleu) et 1/216 (rouge), avec $c_0 = 8/27$ (au centre de la maille) (Voir aussi Tab. 3.1).	31
3.3	(a) Hydrolienne à axe horizontale <i>OpenHydro</i> . (b) le modèle numérique utilisé dans les simulations tests. (c) et (d) des exemples de diverses simulations visant à tester et estimer les potentialités de la méthode de Boltzmann sur réseau et à modéliser des écoulements en présence d'hydroliennes.	34
3.4	(a) moulin à roue verticale. (b) moulin à roue horizontale.	36
3.5	Exemples de diverses technologies d'hydroliennes déployées et testées sur des sites d'essais en mer. a), b), c), d) : turbines à axe horizontal (<i>OpenHydro</i> , <i>SIMEC</i> , <i>Sabella</i> , <i>Siemens</i>). e) : turbine à axe vertical (<i>HydroQuest</i>).	37
3.6	(a) l'intensité des variations de hauteur d'eau sur les océans de la planète dues à l'onde M2 (onde semi-diurne de la Lune). (b) les variations de hauteur d'eau et la progression en heure de l'onde marée en Manche.	38

3.7	Cascade d'énergie de Kolmogorov. L'énergie cinétique des structures tourbillonnaires décroît à mesure que leur taille diminue avec une pente exponentielle de $-5/3$. k_s (« <i>Kolmogorov scale</i> ») représente l'échelle de dissipation de Kolmogorov en dessous de laquelle les forces visqueuses sont dominantes et où l'énergie se dissipe sous forme de chaleur.	39
3.8	Validation de la modélisation LBM par comparaison du nombre de Strouhal (St), du coefficient de portance (C_L) et du coefficient de traînée (C_D) avec leur plage de validité respective (Schäfer <i>et al.</i> , 1996). D'après Grondeau (2018)	40
3.9	Modélisation d'une allée de von Kármán en LBM. (a) dimension du domaine LBM modélisé. (b) zoom au niveau du premier décrochement juste derrière le cylindre. D'après Grondeau (2018).	41
3.10	Modélisation avec Palabos du champ de vitesse axiale adimensionnée autour d'un profil d'aile avec une incidence de 4 degrés (Nakayama, 1985). D'après Grondeau (2018)	41
3.11	Simulation d'une hydrolienne avec la génération d'un champ de vitesses amont turbulent (DFSEM) en LBM. D'après Grondeau (2018).	42
3.12	Essais et mesures en bassin (Ifremer, Boulogne), d'une hydrolienne tri-pales (Mycek <i>et al.</i> , 2014). D'après Grondeau (2018).	43
3.13	Modèle d'hydrolienne tri-pales placée dans le domaine de simulation LBM. Les grilles de raffinement sont représentées. D'après Grondeau (2018).	44
3.14	Champ des vitesses instantanées et maillage autour de l'hydrolienne tri-pales (Mycek <i>et al.</i> , 2014), pour un taux de turbulence $I = 12.5\%$. D'après Grondeau (2018).	44
3.15	Isocontour de critère λ_2 des tourbillons de bout de pale de l'hydrolienne (Mycek <i>et al.</i> , 2014) pour différentes intensités turbulentes d'entrée. D'après Grondeau (2018).	46
3.16	Dans le Raz Blanchard, par temps calme, la surface de l'eau est marquée par la présence de structures turbulentes de grandes tailles (jusqu'à ≈ 20 m).	47
3.17	Prise de vue rasante du fond du Raz Blanchard acquise par vidéo sous-marine (ANR HYD2M).	47
3.18	Essai expérimental en canal hydraulique pour l'étude de la couche limite turbulente en présence de macro-rugosités (Florens, 2010).	49
3.19	(a) Structures tourbillonnaires présentes dans le sillage d'une macro-rugosité cubique visualisées par tracé d'iso-contours de λ_2 . (b) Vue d'ensemble des rugosités et coupes de norme de vitesses instantanées d'une simulation LBM-LES. D'après Mercier (2019).	50
3.20	(a) comparaison de profils verticaux de vitesse longitudinale en 3 points mesurés dans l'expérience en canal (Florens, 2010). (b) comparaison de profils de vitesse verticale sur les 3 mêmes points de l'expérience en canal (Florens, 2010). D'après Mercier (2019).	50
3.21	Position des points de mesures dans l'expérience de Florens (Florens, 2010).	51
3.22	(a) vue en 3D de la bathymétrie de la zone modélisée (pointillés) et (b) localisation générale du domaine de simulation (pointillés).	51
3.23	Profils de variance des vitesses verticales dans le Raz Blanchard. En rouge données mesurées par un ADCP et en noir les données simulées trait plein. Les traits en pointillés correspondent à la variance des profils verticaux des vitesses simulées. D'après Mercier (2019).	52
3.24	(a) zoom sur l'affleurement rocheux présent au nord de la bathymétrie simulée (Fig. 3.22a). (b) visualisation des structures turbulentes générées au dessus de l'affleurement rocheux en isosurface de critère λ_2	52
3.25	Rade de Cherbourg dans ses nouveaux contours (2017).	53

3.26	Carte des habitats benthiques de la rade de Cherbourg, d'après Baux <i>et al.</i> (2017)	54
3.27	Caractéristiques du domaine de simulation LBM-LES mis en place. (a), (b) et (c) sont les lieux de présence initiale de particules. D'après Poizot <i>et al.</i> (2016)	54
3.28	Distribution des vitesses et des particules après un temps d'initialisation autour d'une cage de poisson pour deux valeurs de Reynolds, 300 (les deux figures du haut) et 10 000 (les deux figures du bas). Les particules sont colorées en fonction de leur lieu de présence initial, bleu en entrée du domaine, vert pour le fond et rouge au fond de la cage, respectivement (a), (b) et (c) sur la figure 3.27. D'après Poizot <i>et al.</i> (2016)	55
4.1	(a) Carte de localisation des échantillons sédimentaires. (b) Interprétation des transports sur la zone du dépôt de dragage d'Octeville, baie de Seine (France). D'après Baux <i>et al.</i> (2022)	62
4.2	(a) Modèle d'évolution <i>CB+</i> . (b) Modèle d'évolution <i>FB-</i> . D'après Baux <i>et al.</i> (2022)	63
4.3	Semi-variogrammes de la moyenne (μ), écart-type (σ) et asymétrie (γ) (graphiques du haut) et du <i>TOC</i> , <i>Ca</i> et <i>Si</i> (graphiques du bas). D'après Baux <i>et al.</i> (2022)	64
4.4	Champ des gradients de variations des paramètres <i>TOC</i> , <i>Ca</i> et <i>Si</i> selon quatre modèles différents de variation des paramètres géochimiques (Tab. 4.1).	65
4.5	(a) Localisation des points de mesures de courantologie du 09 septembre 2021 au 07 octobre 2021. (b) Étendue du domaine de simulation CROCO et champs de vitesses à mi-marée, pleine mer et basse mer.	70
4.6	(a) Variations des hauteurs d'eau et (b) des vitesses, entre les mesures de terrain Doppler (vert) et les résultats des sorties de modèles Mars2D (noir) et CROCO (rouge) sur le point 1 (1°15,1W - 49°35,1N) (Fig. 4.5a).	71
4.7	Simulation LBM en 3D de la circulation fluide autour et à l'intérieur de structures immergées.	72
4.8	Raccordement des échelles de travail entre CROCO et la LBM.	73
4.9	Zones de culture d'huîtres sur table aux abords de Saint-Vaast-La-Hougue.	74

Liste des tableaux

2.1	Liste des programmes recensés dans la littérature qui réalisent les calculs visant à déterminer des vecteurs de direction du transport des sédiments sur la base des travaux de McLaren (1981) et Gao & Collins (1992) d'après Poizot & Méar (2008).	16
3.1	Valeurs des coefficients pondérateurs des vitesses f_i pour les deux schémas de résolution $D3Q19$ et $D3Q27$. La première ligne $((0, 0, 0))$ donne les coefficients au nœud central de la maille et les lignes suivantes, ceux aux nœuds aux distances croissantes du nœud central.	32
3.2	Les différentes valeurs des paramètres caractéristiques de la DFSEM, testées pour trois niveaux de turbulence $I = [3\%, 8\%, 12.5\%]$	45
4.1	Correspondance entre les gradients géochimiques et les modèles étudiés avec les cas d'évolutions correspondant à la nomenclature GSTA standard.	65

Remerciements

Il serait prétentieux de dire que les travaux qui vont être relatés ici, ne sont le fruit que de mon unique travail. Faisant parti d'une équipe de recherche, mes travaux sont issus la plupart du temps de collaborations. Il est donc bien naturel de faire état de remerciements envers celles et ceux qui ont eu une part dans ce qui va être présenté ici. Je souhaite exprimer une sincère reconnaissance envers ceux-là, en espérant être à la hauteur de la confiance qu'elles et ils ont pu mettre à un moment dans mon travail.

Je commencerai par exprimer ma gratitude aux rapporteurs et membres du jury qui ont rendu possible la réalisation du présent rapport d'H.D.R. et la tenue de la présentation orale qui l'accompagne. C'est une étape importante dans une carrière, une preuve de reconnaissance de ses pairs, je les en remercie.

En deux décennies, j'ai pu travailler en collaboration avec plusieurs laboratoires en premier lieu desquels sont, le Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) et le Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg (LUSAC). Je veux remercier les personnels administratifs et techniques de ces laboratoires et aussi naturellement, les collaborateurs avec qui j'ai pu travailler.

J'ai participé à de nombreuses missions en mer, principalement à bord des navires de l'INSU/CNRS puis de la Flotte Océanographique Française (FOF). Au cours de ces moments, parfois compliqués par une météo capricieuse, j'ai toujours pu compter sur le professionnalisme et la bienveillance des marins pour la tenue des objectifs. Elles et ils sont nombreux et je ne voudrai citer personne de peur d'en oublier, mais j'éprouve, en me remémorant ces moments passer en mer, à la fois une émotion et une certaine fierté d'avoir pu partager ces instants de vie avec des gens de mer tels qu'eux.

Je remercie bien entendu l'ensemble des personnels du Cnam/Intechmer, celles et ceux actuellement présents qui œuvrent chaque jour à ce que l'Institut Nationale des Sciences et Techniques de la Mer puisse fonctionner dans les meilleures conditions, mais aussi celles et ceux qui sont passés au cours de années dans l'établissement, un instant de leur carrière.

Avec mes proches collaboratrices et collaborateurs au Cnam/Intechmer, j'ai travaillé jusqu'ici dans les meilleures conditions de sérénité et de cordialité. Je veux citer et remercier Martine Bertrand, Marie-Laure Mahaut, Isabelle Poirier, que j'ai le plaisir de côtoyer maintenant depuis de nombreuses années, mais aussi Florian Cesbron, Régis Gallon et Gwendoline Grégoire, qui sont venus plus récemment étoffer l'équipe. Un remerciement tout particulier à Pascal Bailly-du-Bois, tout nouvellement directeur du Cnam/Intechmer, avec qui j'ai eu l'occasion et le privilège de travailler avant son arrivée dans l'établissement. Je remercie Claire Marion, voisine de bureau et complice de travaux sur le terrain, avec qui j'ai partagé de nombreux fou-rires, même dans les conditions difficiles. Anne Murat fait parti des personnes qui a eu une grande influence sur le travail que je présente ici. La remercier est une litote, tant je lui dois pour la richesse et la qualité des échanges que nous avons eu. Anne est un exemple de rigueur et d'abnégation dans tout ce qu'elle

entreprend, je lui voue le plus grand des respects et je veux ici lui témoigner toute mon admiration et mon amitié.

Yann Méar a été tour à tour mon professeur lorsque j'étais étudiant, mon plus proche collaborateur quand je suis entré au Cnam/Intechmer, mon responsable scientifique lorsqu'il a pris la tête de l'équipe de recherche et enfin mon directeur au moment où il a été élu à ce poste. Nous sommes ensemble sur plus de 90% des articles auxquels j'ai contribué. Son influence sur mon travail et sur ma carrière est centrale. Plus qu'un exemple, il est mon mentor sans qui je ne serai pas ce que je suis aujourd'hui. J'éprouve une gêne à avoir la prétention de le considérer comme un ami, tant je respecte le scientifique mais aussi et surtout l'homme qu'il est.

Enfin, le travail en recherche est prenant, surtout lorsqu'il passionne et il arrive qu'il empiète sur d'autres moments. Je terminerai tout naturellement par dresser à ma famille et surtout à mon épouse, Nathalie, toute ma gratitude pour la patience et le support témoignés et tant de fois répétés.

PRÉAMBULE

Après deux ans dans la société Systèmes d'Informations à Référence Spatiale (SIRS) à Lille, proposant des services en Système d'Information Géographique (SIG), j'ai rejoint à partir de 1995 l'Institut National des Sciences et Techniques de la Mer (Intechmer, Equipe Pédagogique Nationale 8 - EPN08) à Turlaville (Manche), une des équipes délocalisée du Conservatoire National des Arts et Métiers (Cnam). Le Cnam/Intechmer a trois missions principales, 1) la formation (trois formations initiale (bac+3) dans trois spécialités : biologie, chimie et physique marine), 2) la recherche et 3) la diffusion du savoir scientifique, avec la spécificité de les développer dans le cadre des sciences et techniques de la mer. Ingénieur d'études hors classe, j'exerce dans cet établissement plusieurs missions, 1) la responsabilité du système d'information, 2) la recherche scientifique, et 3) l'enseignement.

Tout d'abord ingénieur d'études et depuis 2022 ingénieur de recherche (BAP E - Informatique, Statistiques et Calcul scientifique), j'ai participé dès mon arrivée aux activités de recherche de l'établissement. Ma formation initiale axée sur une double compétence, d'un côté les sciences de la terre et de la mer et de l'autre les sciences du numérique, a facilité cette intégration. L'intérêt des géosciences allant grandissant dans les pratiques numériques, j'ai pu prendre en charge progressivement des thématiques de recherche. Les résultats de ces travaux ont tout d'abord été valorisés sous forme de publications scientifiques et en 2009, j'ai obtenu d'une thèse de doctorat en Océanologie. J'ai été à plusieurs reprises sollicité pour l'exploitation et la valorisation de travaux de recherche sur la thématique de ma thèse et plusieurs articles ont été rédigés à ces occasions. Cette activité perdue encore aujourd'hui, le chapitre 2 lui est consacré.

En 2013, les personnels scientifiques du Cnam/Intechmer ont été rattachés au Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg (LUSAC) de l'université de Caen-Normandie. Cette opération a été motivée par le souhait de constituer dans le Nord-Cotentin, une équipe de recherche « Écoulement et Environnement » capable de répondre, entre autres, aux sollicitations de la région Normandie en matière a) d'environnement, pour sa préservation contre les effets du dérèglement climatique (érosion, submersion, etc.) et b) d'activités de productions industrielles en milieu marin telles que l'aquaculture, la conchyliculture et surtout plus récemment les Énergies Marines Renouvelables (EMR). J'ai ainsi développé mes activités de recherches dans le cadre de ces thématiques.

Lorsqu'il s'agit d'EMR, l'éolien vient en première idée, mais le Nord-Cotentin est surtout connu pour abriter le Raz Blanchard, le troisième site au monde des plus forts courants de marée. Dans un contexte de développement de l'hydrolien en mer, au sein du LUSAC, j'ai participé à trois projets ANR (HYD2M, PHYSICS et THYMOTE), de 2017 à 2020, dans lesquelles deux thèses de modélisation numérique ont été financées. Sur la base de travaux exploratoires menés auparavant, j'ai convaincu mes collègues d'inscrire ces thèses dans un thème nouveau pour le laboratoire : l'approche de Boltzmann sur réseau ou Lattice Boltzmann Method (LBM). J'ai donc tout naturellement participé à l'encadrement des deux doctorants. Les ANR riches et variées en thématiques, m'ont permis de participer et de prendre en charge tout un panel de travaux différents. Depuis la préparation et la réalisation de campagnes de mesures instrumentées (ADCP, ADV,

etc.), en passant par les traitements et analyses de gros volumes de données, jusqu'à la modélisation numérique d'écoulements fluides. Les caractéristiques environnementales particulières, voir extrêmes par certains côtés, des lieux comme le Raz Blanchard, font que toutes les opérations revêtent un caractère innovant. Les pratiques, le matériel, les procédures d'analyses, de traitements et de modélisations, ont du être repensés et adaptés pour répondre à des contraintes encore peu rencontrées jusque là. Bien entendu, ces travaux ont donné lieu à plusieurs actions de valorisation (colloques, congrès, etc.) et plusieurs articles ont été publiés. Le plus gratifiant dans ces travaux, est le sentiment d'avoir travaillé dans un contexte exceptionnel à la limite des possibilités pratiques et théoriques et d'avoir participé à faire progresser la connaissance et l'appréhension de lieux tels que le Raz Blanchard. Le chapitre 3 contient les principaux résultats obtenus dans ce contexte.

Grâce à son expertise maintenant reconnue, le LUSAC a été sollicité en 2021 pour encadrer une thèse de modélisation numérique visant à simuler le transport sédimentaire en rade de Cherbourg avec un intérêt particulier sur le suivi de radio-nucléides. J'ai été désigné à nouveau comme un des co-encadrants de ce travail qui a comme première particularité d'utiliser le code de calcul hydrodynamique CROCO. Le second aspect novateur de ce travail, est d'utiliser le code de transport sédimentaire MUSTANG (dans sa deuxième version) tout nouvellement couplé au code CROCO.

J'ai comme projet et volonté de poursuivre des travaux de recherches scientifiques en géosciences marines. Il est coutume de dire que le propre d'une recherche qui vise à essayer de répondre à une question, c'est d'en faire émerger plusieurs autres. J'ai pu à maintes reprises vérifier cet adage et c'est une des facettes de l'activité de chercheur qui m'exalte le plus. Le travail scientifique, c'est en permanence apprendre et parfaire ses connaissances. L'esprit est toujours en éveil et la remise en question sans cesse présente.

Cette candidature au diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches est pour moi une étape importante, qui doit d'abord confirmer mon expertise dans le domaine des géosciences marines, que je veux ancrer toujours plus dans les pratiques numériques. C'est une opportunité de choisir à la fois les thématiques de recherche et la manière de les traiter au sein de l'équipe. La possibilité d'encadrer des étudiants en thèse offre des perspectives importantes pour dynamiser encore plus les capacités de travail sur les thématiques d'intérêts.

Chapitre 1

Introduction

D'une manière générale, il est considéré que l'ère de l'informatique, telle que nous la connaissons aujourd'hui, a débuté au cours de la seconde guerre mondiale sous l'impulsion de besoins spécifiques, tels que le chiffrement avec le *Colossus* britannique ou la balistique avec l'*ENIAC* américain. Si la création de ces machines a été rendue possible grâce à des avancés technologiques, notamment en électronique, elles n'auraient jamais été assemblées si les concepts de programmation et plus généralement de programme, n'avaient pas été définis auparavant par Turing (1937). C'est bien de l'existence des programmes (ou des logiciels) que l'informatique tire principalement sa genèse. Le mot « Informatique »¹ lui-même, apparaît pour la première fois en 1957, dans l'essai de l'ingénieur Allemand Karl Steinbuch : « Informatik : Automatische Informationsverarbeitung » et se traduit comme « le traitement automatique de l'information »². Ainsi le traitement de l'information se réalise dans un contexte théorique ou abstrait, dans lequel sont développées et améliorées les méthodes (les algorithmes) de traitement. L'automatisme fait référence au support qui permet la réalisation concrète et accélérée du traitement de l'information. L'informatique, à l'instar de la médecine, n'est pas une science à elle seule car elle fait appel à de nombreuses disciplines scientifiques. Sa pratique couvre un large champ de connaissances théoriques et à mesure que le temps passe, les progrès permanents dans tous les domaines dont elle se nourrit, rend son appréhension globale de plus en plus complexe, pour ne pas dire quasi impossible.

Le support de traitement de l'information, que nous appelons communément un « ordinateur »³, n'est pas à mon sens l'objet principal de ce qu'est l'Informatique, en dépit de ce qui est communément avancé. Il est tout de même une composante importante qui a influé jusqu'à aujourd'hui sur l'évolution des pratiques numériques. L'invention du « *Personal Computer* » (P.C.), au milieu des années 70⁴, est un premier exemple caractéristique. L'arrivée du P.C. marque non seulement une étape fondatrice de l'histoire de l'Informatique mais a eu aussi des répercussions sur l'histoire humaine elle-même. Jusque là encore réservé à des besoins professionnels d'élites scientifiques, l'accès aux ressources informatiques devient avec le P.C. de plus en plus aisé. La diminution des coûts, l'augmentation croissante des performances (Fig. 1.1) et la miniaturisation des composants, vont permettre la mise en place d'applications numériques de plus en plus complexes, qui vont infiltrer pratiquement tous les domaines d'activité tant professionnelles que privées. Aujourd'hui, le support même d'exécution des instructions logiciels prend des formes très différentes de celles originelles. Les smartphones et autres tablettes sont à ce titre de bons exemples. La volonté d'avoir les mêmes applications quelque soit le support d'exécution, renforce l'argumentaire en faveur de l'importance prépondérante du logiciel sur le

1. Pour des raisons sémantiques, les pays anglo-saxons préfèrent l'expression « *computer science* ».

2. Ici « information » est à prendre au sens d'une « donnée ».

3. Le terme ordinateur désigne ici tout support matériel capable d'exécuter des instructions logiciels.

4. La construction du premier micro-ordinateur au monde est attribuée à François Gernelle, avec le *Micral N*, en 1973.

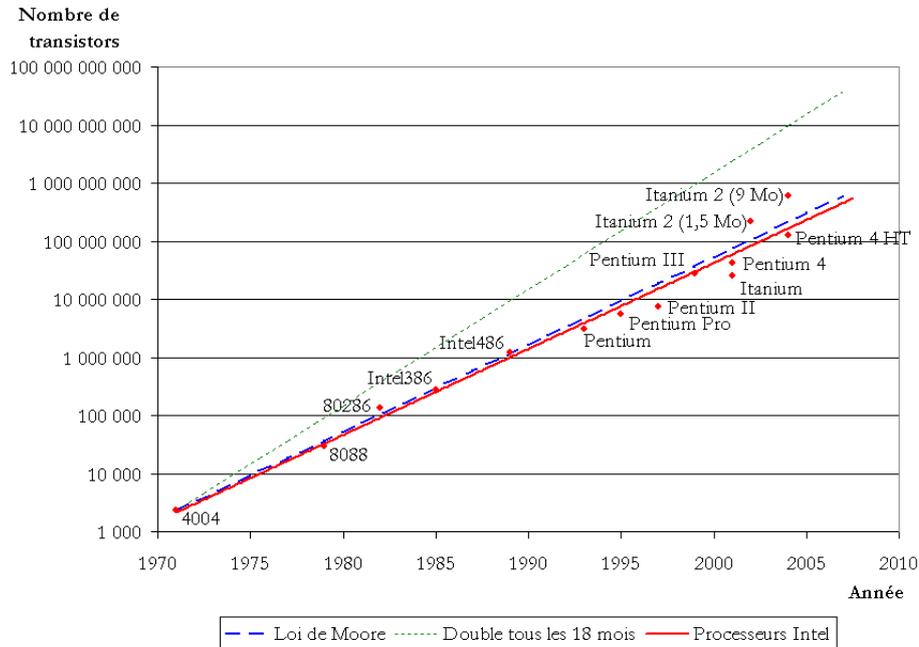


Figure 1.1 – Loi de Moore montrant la progression du nombre de transistors gravés au fur et à mesure des générations de processeurs de la marque Intel. (Wikimedia)

matériel.

Un autre grand bouleversement dans l’histoire numérique est la mise en place et le développement des réseaux informatiques⁵. Avec le plus grand et le plus connu des réseaux, Internet, l’impact sur les pratiques numériques est systémique. En accélérant les échanges, les réseaux raccourcissent le temps. En jetant des ponts d’un bout à l’autre de la planète, ils raccourcissent les distances. Le déploiement exponentiel du nombre de connexions réseau fait entrer l’Humanité dans l’air de la dématérialisation. Les pratiques économiques (le e-commerce), sociales (les réseaux sociaux) ou culturelles (les chaînes numériques) réclament et amènent à l’utilisation d’encore plus de réseaux et donc de logiciels. Nous ne commençons que partiellement à appréhender les conséquences historiques de l’émergence d’Internet sur nos modes de vie.

Les sciences ont été naturellement au cœur des changements et mutations des pratiques. Certains domaines des sciences ont trouvé dans le numérique de nouvelles sources de développement. Les géosciences ont été à la fois des moteurs et des laboratoires dans la transformation de leurs pratiques. Le milieu du pétrole a été très certainement celui qui a le plus contribué, initialement, au développement du numérique en Sciences de la Terre. Parce qu’elles en avaient les moyens, le besoin et la motivation, les compagnies pétrolières et para-pétrolières ont investi des sommes colossales dans la numérisation et l’informatisation de leurs pratiques, poussées par la nécessité de traiter des volumes de données en constante augmentation, en des temps toujours plus courts. Bien que développés pour leurs besoins propres, les résultats des avancées théoriques et appliquées ont aussi profité et été utilisées largement dans d’autres domaines des sciences et surtout des géosciences.

La localisation spatiale⁶ est une caractéristique intrinsèque de l’information en géoscience et vient s’ajouter à la signification propre de la donnée elle-même. Qu’il s’agisse de la représenter, de l’analyser ou de la stocker, l’information géoréférencée⁷ est multi-

5. Il est aussi possible de généraliser en utilisant le terme *numériques*

6. Comprendre ici sur l’espace géographique.

7. Ou spatiale.

dimensionnelle par nature⁸. La dimension spatiale des données géoréférencées offre en géosciences, des possibilités supplémentaires d'analyses et de traitements par la prise en compte des relations d'interdépendances spatiales des processus étudiés, qui se déploient dans l'espace géographique. La gestion de l'information spatialisée dans un contexte numérique, a constitué un défi qui a motivé la création des **Systemes d'Informations Géographiques** (S.I.G.). Les S.I.G. offrent un cadre quasi universel de travail de l'information géoréférencée. Bien que les géosciences aient été le creuset dans lequel ont été forgés les S.I.G., leurs applications dépassent maintenant largement ce cadre.

Les S.I.G. apportent à la fois des méthodes théoriques et des moyens pratiques à l'activité qui est le moteur et le cadre de tous mes travaux : **participer à la numérisation des pratiques en géosciences**. Cette démarche est reconnue sous la dénomination de « géomatique », issue de la contraction des termes *géographie* et *informatique*⁹. Il est aujourd'hui à mon sens réducteur de ne restreindre la pratique de la géomatique qu'à la géographie, le préfix « géo » de géomatique faisant maintenant référence à toutes les géosciences.

La géomatique réclame la mobilisation de compétences (théoriques et pratiques) à la fois dans le numérique et en géosciences. Ce double aspect a longtemps été pénalisant pour celles et ceux qui comme moi ont voulu que leur travail s'incrive en géomatique. A être sur deux domaines à la fois, nous sommes jugés en définitive comme étant nul part. Cela s'explique par le fait que la géomatique s'est essentiellement développée dans sa forme actuelle, de concert avec l'informatique, discipline relativement récente au regard d'autres domaines des sciences. Avec la poussée toujours plus importante du numérique en géosciences¹⁰, la géomatique est mieux comprise aujourd'hui, par la force des choses, parce qu'elle s'impose en définitive dans toutes les pratiques.

La recherche de la migration d'une pratique des géosciences vers l'univers numérique passe par sa compréhension la plus aboutie et claire possible. Être à l'interface entre plusieurs disciplines permet d'avoir différents points de vue sur une même problématique. Ainsi le champ des solutions possibles est plus large et offre la possibilité de proposer des voies alternatives. J'ai notamment pu en faire la démonstration en proposant l'utilisation de l'approche de Boltzmann sur réseau pour simuler des écoulements turbulents en milieu marin (voir 3.2).

Les géosciences regroupent un grand nombre de disciplines et je me suis cantonné à travailler dans un nombre limité d'entre elles. Tout d'abord par goût, j'ai choisi d'orienter mes activités en géosciences vers le domaine marin. Ensuite, une fois en poste au Cnam/Intechmer et intégré à une de ses équipes de recherche, j'ai participé et mené des travaux sur les principaux compartiments du domaine marin : l'eau, le sol et le sous-sol.

L'étude des sédiments marins et surtout de leurs déplacements, est le fil conducteur qui relie mes activités de recherche entre ces différents compartiments :

- l'eau, parce qu'elle est le principal moteur de leur transport ;
- le sol, parce qu'il est le lieu de leurs échanges ;
- le sous-sol, parce qu'il les stocke et les transforme.

C'est un euphémisme de dire que de nombreux processus interviennent dans le transport, le stockage et le recyclage des sédiments marins. Il est encore difficile aujourd'hui de les appréhender tous en même temps dans toute leur complexité. Cette difficulté vient du mélange des échelles de temps et d'espace auxquelles se produisent les processus responsables du transport sédimentaire. Pour les discerner avec le plus de précision possible, les scientifiques emploient différentes approches et techniques. Le portage des moyens et

8. Le temps est une autre dimension intrinsèque de tout type d'information.

9. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Géomatique>.

10. Je me restreins ici aux géosciences, mais cette remarque peut-être étendue à tous les domaines d'activité.

méthodes d'observations, de mesures, d'analyses et de modélisations dans un contexte numérique, a été motivé en permanence dans mon travail par la volonté d'améliorer la manière avec laquelle sont « vus » les processus en relation avec les sédiments et leurs mouvements.

Je me suis donc attaché à étudier certains des processus qui agissent sur le devenir des différents cortèges particuliers à l'intérieur de chaque compartiment (eau, sol et sous-sol), afin qu'il soit plus aisé d'aborder ensuite les principales relations qui existent entre eux. Dans la majeure partie de mes travaux, j'ai pu appliquer une approche somme toute assez classique : l'observation par la mesure, l'analyse puis la modélisation. J'ai en permanence recherché à utiliser, porter et développer chacune de ces tâches dans un contexte numérique.

Par observation, j'entends les travaux relatifs à l'approche Grain Size Trend Analysis (GSTA), que je développe dans le chapitre 2. La modélisation du transport sédimentaire qui est obtenue par la mise en œuvre de cette démarche est basée sur des données acquises directement sur le terrain. Je vais mettre de côté ici tous les aspects liés à l'échantillonnage de l'information (ou des données), ils ont été abordés dans certains de mes travaux, pour me concentrer sur la méthode elle-même et toutes les propositions que nous avons pu faire dans ce cadre. Ce travail est fondateur dans mon parcours, je pourrai presque dire initiatique, tant il réclame une large gamme de compétences et de connaissances pour être pleinement abordé.

Pour modéliser le mouvement des sédiments en milieu marin, il faut dans un premier temps modéliser le comportement de la masse d'eau (vitesses et directions des courants, les effets des vagues, des apports d'eau douce, les variations de densité, etc.). Ces informations une fois obtenues (et validées!) sont utilisées comme moteur du transport sédimentaire. C'est là le point commun entre l'approche Lattice Boltzmann sur réseau (LBM) et l'approche Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) que j'ai exploité pour modéliser le comportement de la masse d'eau.

J'ai initié des travaux de modélisation numérique du transport sédimentaire par la mise en œuvre de codes de calculs résolvant des jeux d'équations mathématiques modélisant les processus physiques à l'aide d'un ou de plusieurs ordinateurs, ces deux approches étant séparées par leur échelle de travail. La LBM permet d'étudier les mouvements sédimentaires sous des régimes à haut nombre de Reynolds ($> 10\,000$) mais elle est restreinte à des domaines de dimensions décamétriques voir kilométriques ($< 2-3$ km). L'approche RANS, plus classique et aussi la plus récente dans la chronologie de mes travaux, me permet d'aborder le mouvement des corps sédimentaires à échelle régionale. Le chapitre 3 est consacré à détailler les problématiques que j'ai pu aborder avec l'une et l'autre des ces deux approches.

Avec le cumul d'expérience et de disciplines abordées, le regard prend peu à peu de la hauteur et des jointures nouvelles apparaissent entre des thèmes en apparence éloignés. C'est l'objet du chapitre 4, dans lequel je fais état des travaux que je souhaite mener dans un avenir proche en relation avec les travaux réalisés jusqu'à présent.

L'intérêt va grandissant pour les questions en relation avec l'environnement au sein de la société. La prise de conscience des effets du dérèglement climatique et de ses conséquences sur l'Humanité, fait augmenter la pression sur la communauté scientifique pour répondre aux défis auxquels nous devons collectivement faire face. La progression régulière de la reconnaissance des travaux de l'équipe dans laquelle se déploient mes travaux, amène à ce que des sollicitations de la part d'autres équipes de recherche, ainsi que d'instances

locales et régionales, soient toujours plus nombreuses sur des problématiques en lien plus ou moins directe avec les changements globaux. Dans ce cadre, prendre part aux efforts et travaux qui vont devoir être fait est à la fois exaltant par le sentiment de participer à une immense tâche collective et angoissant par l'ampleur des défis qui se présentent à nous. Pour rien au monde je ne voudrai échapper à ce travail. Cette candidature à l'Habilitation à Diriger des Recherches, est pour moi une des manières de démontrer toute la motivation qui m'anime à s'atteler à cette tâche.

Chapitre 2

La granulométrie marqueur de la dynamique des sédiments

Question

Comment améliorer la détermination des directions de transport des sédiments marins à partir de l'analyse des variations de la granulométrie des populations de grains ?

Dans la recherche de marqueurs ou de traceurs de la dynamique des sédiments marins, l'analyse de la variation spatiale de la taille des grains présents dans des échantillons de sédiment a depuis longtemps fait l'objet de travaux visant à définir les sources et les directions de transport des sédiments (Krumbein, 1938 ; Petitjhon & Ridge, 1938 ; Plumley, 1948). Je qualifie cette classe d'approches d'holistiques, car elles ne cherchent pas à expliquer le transport des sédiments par des formulations mathématiques et/ou physiques, mais s'appuient sur les résultats de l'action des processus de transport en jeu. Un des intérêts majeur de ces approches, est qu'elles se basent sur une analyse des dépôts de sédiments eux-mêmes, c'est à dire des données de terrain.

McLaren (1981) a été le premier à proposer une démarche structurée appelée « *Sediment Trend Analysis* » (STA®). Son approche est basée sur l'utilisation de trois paramètres statistiques déterminés à partir de l'analyse des distributions granulométriques d'échantillons sédimentaires : la moyenne (μ), l'écart-type (σ) et l'asymétrie (γ). Les variations combinées de ces trois paramètres lui permettent de définir des cas d'évolutions ou « *trend cases* ». A l'issue d'une démonstration et à partir de nombreuses observations de terrain, McLaren & Bowles (1985) déterminent qu'en comparant les variations des paramètres statistiques deux à deux entre deux échantillons de sédiment :

- la moyenne peut évoluer soit vers des tailles plus petites (*Finer*, « F ») ou des tailles plus grandes (*Coarser*, « C ») ;
- l'écart-type évolue toujours vers des distributions mieux triées (*Better sorted*, « B ») ;
- l'asymétrie peut évoluer soit plus positivement (*more Positively skewed*, « + ») ou soit plus négativement (*more Negatively skewed*, « - »).

Ils basent leur démonstration sur les variations d'allure des distributions granulométriques des échantillons pris en compte. Ils définissent une fonction $x(s)$ décrite comme la fonction de transfert entre la distribution de départ et celle d'arrivée (Fig. 2.1). Cette fonction intègre tous les processus sédimentaires dynamiques qui agissent sur le transport des particules sédimentaires. La forme de $x(s)$ renseigne sur la nature du comportement des sédiments, c'est à dire s'ils sont plutôt en érosion, en accrétion ou en équilibre relatif. Ainsi, le transport des sédiments peut être décrit par deux cas de variations des

paramètres statistiques :

- plus fin (*Finer*), mieux trié (*Better sorted*) et d'asymétrie plus négative (*more Negatively skewed*), noté FB- ;
- plus grossier (*Coarser*), mieux trié (*Better sorted*) et d'asymétrie plus positive (*more Positively skewed*), noté CB+.

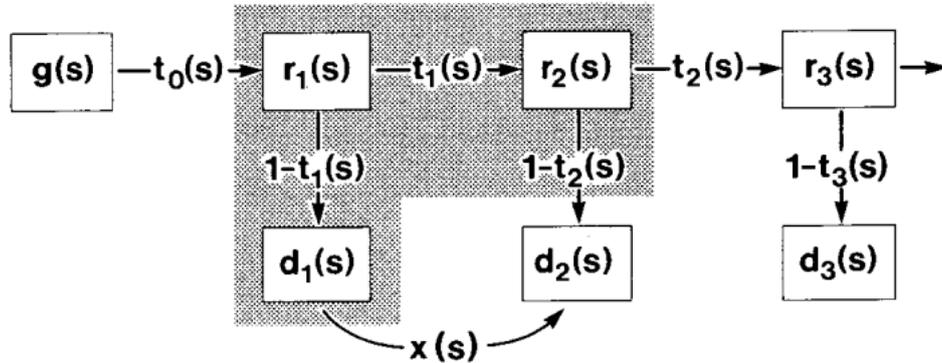


Figure 2.1 – Modèle de transport des sédiments utilisé par McLaren (1981) pour poser les bases de l'approche STA®. « $g(s)$ » correspond à la distribution granulométrique de départ, les « $r_x(s)$ » sont les distributions granulométriques résultantes du transport et « $d_x(s)$ » correspondent aux dépôts de sédiment. « $x(s)$ » est la fonction de transfert qui permet de passer de « $d_1(s)$ » à « $d_2(s)$ ». D'après McLaren (1981)

Concrètement, pour déterminer les vecteurs de transport des sédiments, McLaren définit des lignes passant par des points d'échantillons sédimentaires, le long desquelles il va rechercher l'existence ou pas des cas de variations, c'est à dire CB+ et FB- (Fig. 2.2).

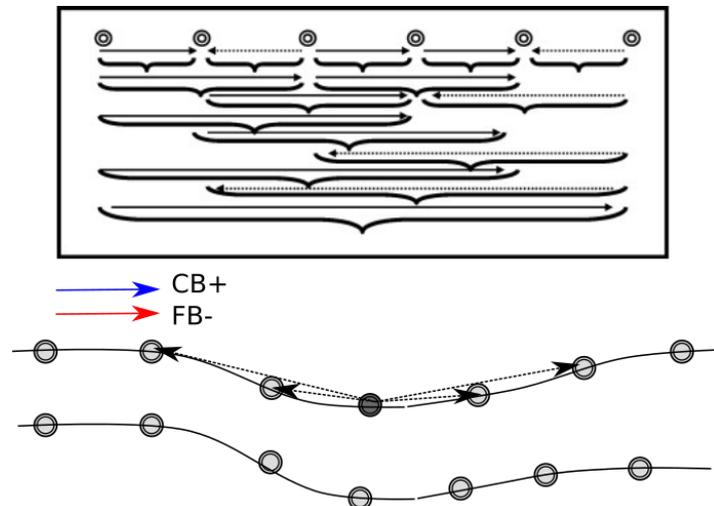


Figure 2.2 – Détermination des vecteurs de transport des sédiments selon l'approche 1D de McLaren (1981). Les deux cas d'évolution, CB+ et FB- sont recherchés en comparant deux à deux les paramètres statistiques présents entre les échantillons sédimentaires localisés sur une même ligne. Pour déterminer la direction de transport finale en un point d'échantillon, les deux cas d'évolution vont être recherchés entre ce point et tous les points présents sur la même ligne, une sommation vectorielle étant faite finalement pour ne conserver qu'un seul vecteur de module unité.

L'approche de McLaren est qualifiée d'uni-dimensionnelle (1D) et elle a suscité des critiques de la part de certains auteurs Masselink (1992), et Gao & Collins (1991). Ces derniers proposent en 1992 (Gao & Collins, 1992), une méthode alternative en deux dimensions (2D) pour la détermination des sens de transport des sédiments. Toujours sur la

base de la recherche des cas d'évolution des paramètres statistiques définie par McLaren, ils utilisent les points voisins situés dans un cercle de recherche autour du point sur lequel va être défini le vecteur de transport final (Fig. 2.3).

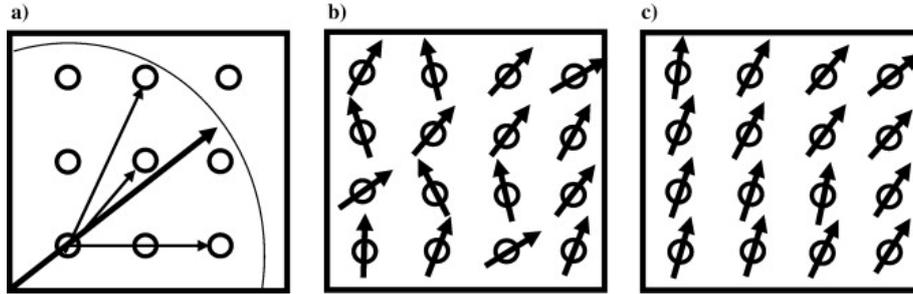


Figure 2.3 – Détermination des vecteurs de transport des sédiments selon l'approche 2D de Gao & Collins (1992). Trois étapes sont nécessaires pour arriver au champ de vecteur final : a) recherche des cas d'évolutions CB+ ou FB- pour tous les points voisins au point sur lequel définir le vecteur de transport (point pivot) ; b) calcul de la moyenne vectorielle de tous les cas d'évolutions déterminées en chaque point ; c) lissage par le calcul d'une moyenne vectorielle des vecteurs résiduels de l'étape précédente.

Gao & Collins (1992) nomment leur approche « Grain Size Trend Analysis » (GSTA). Cette démarche en deux dimensions a connu un certain succès qui peut s'expliquer par sa simplicité de mise en œuvre ainsi que par la mise à disposition d'un programme dédié écrit en Fortran (Gao, 1996).

A l'instar de celle de McLaren, l'approche 2D de Gao et Collins a été critiquée. En particulier Le Roux (1994c) soulève le problème de la représentativité des points voisins en fonction de leur distance et direction par rapport au point sur lequel définir le vecteur de transport. Il propose une alternative à GSTA (Le Roux, 1994b), basée sur la translation et la rotation des points voisins pour recréer des échantillons sédimentaires virtuels dans les quatre directions cardinales autour du point central. Cette approche ne fait, en réalité, qu'interpoler localement les valeurs des trois paramètres granulométriques (moyenne, écart-type et asymétrie) par le biais d'une série d'opérations géométriques. Trop complexe, la proposition de Le Roux ne sera que très peu utilisée par d'autres auteurs (Le Roux, 1994b). Asselman (1999) proposera une solution élégante plus simple que celle de Le Roux, en interpolant les trois paramètres statistiques utilisés par GSTA, pour créer trois grilles raster sur lesquelles sont appliquées les mêmes étapes de calculs que celles définies par Gao & Collins (1991).

En m'inspirant des travaux de Asselman (1999), j'ai pu faire de nouvelles propositions pour la mise en œuvre de l'approche GSTA. Je détaille dans la section 2.1 les aspects théoriques qui sous tendent ces modifications. Dans la section 2.2, je présente quelques exemples d'applications les plus significatives des propositions faites.

2.1 GSTA : des apports de fond

A l'issue d'une analyse détaillée de l'approche GSTA décrite par Gao & Collins (1992) ainsi que des critiques soulevées dans sa mise en œuvre, plusieurs points d'améliorations sont apparus. Dans Poizot *et al.* (2008), nous faisons un état des lieux de l'approche GSTA en identifiant les sources possibles d'incertitudes qui peuvent détériorer la qualité de la détermination des vecteurs de transports finaux.

Le ou les processus naturels qui amènent à réaliser un tri des particules sédimentaires en un lieu donné, sont continus sur l'espace géographique¹ sur lequel ils agissent. Les variations de paramètres physiques des sédiments de surface tels que la forme, la nature ou la taille des particules, peuvent être considérées comme des signaux continus sur l'espace d'étude en réponse au processus considérés. Dans le cadre de l'approche GSTA, pour avoir la totalité de l'information qui décrirait les variations des paramètres granulométriques, il faudrait en toute rigueur échantillonner toute la surface². Ce travail est bien entendu chose impossible à réaliser. Dans la pratique, nous procédons par des prélèvements ponctuels plus ou moins bien répartis sur la zone d'étude. Le signal recherché est alors échantillonné, c'est à dire que sa mesure est réalisée sur certains points de l'espace. Dés lors, nous n'avons qu'une représentation partielle du signal complet de départ, puisqu'une partie de l'information initiale a été « perdue » par l'opération d'échantillonnage (Fig. 2.4).

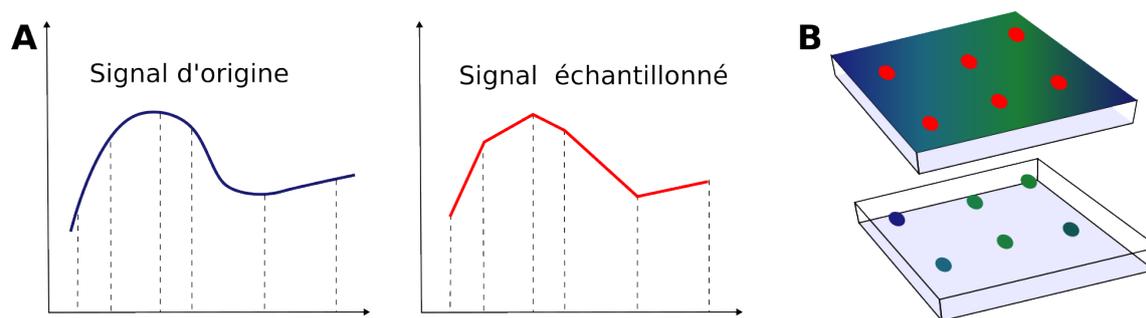


Figure 2.4 – Échantillonnage d'un signal quelconque. A- Cas unidimensionnel, les lignes verticales pointillées représentent les positions aléatoires de prise de valeurs du signal d'origine (en bleu). Le signal échantillonné (en rouge) est une « image » détériorée du signal d'origine. B- Cas bidimensionnel, les points rouge représentent les lieux aléatoires de prise de valeurs du signal d'origine continu signifié par la variation de couleur du bleu au vert.

Une illustration est faite sur la figure 2.4 de l'échantillonnage d'un signal dans un cas unidimensionnel (Fig. 2.4A) et dans un autre cas bidimensionnel (Fig. 2.4B). Il est déjà assez net dans le cas unidimensionnel que l'échantillonnage amène à avoir une image grossière de l'information d'origine. La détérioration est encore plus importante dans le cas bidimensionnel où cette fois, il peut parfois être difficile de reconnaître même les grands traits d'origine. La solution la plus simple qui vient immédiatement à l'esprit, est d'augmenter le nombre de points d'échantillonnage pour capturer le plus d'information possible. Nous sommes en règle générale contraints par des considérations pratiques liées aux coûts, tant financiers qu'humains, qu'engendre la multiplication de la prise d'échantillons. Il est donc nécessaire de mettre en place un méthodologie qui permette d'exploiter au maximum l'information à disposition.

L'approche GSTA est un cas d'études bidimensionnelles (2D) se basant sur une information obtenue sur un ensemble de points d'échantillons sédimentaires. Au regard de ce qui vient d'être dit, il est nécessaire au préalable de quantifier le niveau d'information présent dans le jeu de données pour être autorisé ou pas à conduire l'analyse. La géostatistique offre le cadre d'étude adapté pour répondre à cette question fondamentale.

1. Ainsi que dans le temps, mais nous laissons cette dimension de côté pour le moment.

2. La profondeur d'échantillonnage est aussi un aspect à considérer bien entendu. Dans le cas présent, cela ne change pas la teneur de la démonstration.

La variable régionalisée.

La mesure qui est réalisée sur les échantillons donne accès à ce qui qualifié en géostatistique de **Variable Régionalisée** (VR) (Matheron, 1965), dont un exemple est donné sur la figure 2.4B. Ce concept est à la base de tous les développements de la géostatistique. La mesure d'un paramètre quelconque réalisée sur les points de l'espace d'étude va généré un ensemble de valeurs (numériques le plus souvent) qui vont être une version discrétisée du paramètre naturel continu d'origine (qui nous est inconnu) : c'est une VR. Une VR est une des réalisations possibles parmi une quasi infinité de possibilité d'une variable aléatoire représentative d'un phénomène spatiale continu échantillonné. Dans le cadre de la démarche GSTA, la moyenne, l'écart-type et l'asymétrie sont des VR et peuvent donc être étudiées dans un contexte géostatistique.

La puissance des concepts et la richesse des outils de la géostatistique nous offre l'opportunité et les moyens d'inscrire la démarche GSTA dans un cadre rigoureux pour une meilleur définition possible des champs de transports des sédiments.

2.1.1 Apport N°1 : l'auto-corrélation

En introduction de la section 2.1, une explication a été donnée sur le fait que le travail d'échantillonnage engendrait une perte d'information. Une variable régionalisée est un échantillonnage aléatoire d'un phénomène naturel se déployant sur l'espace géographique. La géostatistique s'est donc muni d'outils pour estimer la quantité et la qualité d'informations captées par une VR, au premier rang desquels figure le **semi-variogramme** (Matheron, 1965).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z_{(x+h)} - z_{(x)})^2, \quad (2.1)$$

avec $\hat{\gamma}(h)$ l'estimateur de la semi-variance et N le nombre de valeurs voisines à la valeur $z_{(x)}$ à l'intérieur d'une distance h .

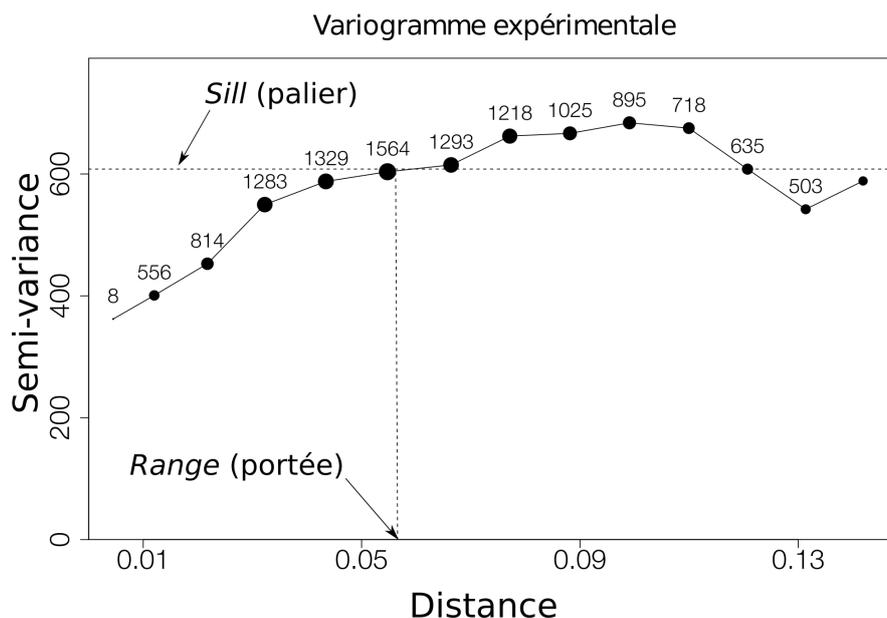


Figure 2.5 – Variogramme expérimental (lignes et points noirs). En ordonnée, la semi-variance calculée avec l'Eq.(2.1), en abscisse, la distance (h) dans l'unité des coordonnées géographiques du jeu de données initiales (ici en degré-décimal). Les chiffres indiquent le nombre de paires de points utilisées pour calculer la valeur de la semi-variance.

L'équation 2.1 est l'expression mathématique utilisée pour la construction du graphique appelé le semi-variogramme³ (Fig. 2.5). L'allure de la courbe représentée sur ce graphe va renseigner sur la nature et la qualité de l'organisation spatiale de la variable, en d'autres termes, de l'information disponible. Le semi-variogramme est aussi une image de l'auto-corrélation spatiale d'une variable (Aubry, 2000).

Le semi-variogramme doit en théorie avoir au moins deux caractéristiques essentielles :

1. à l'origine, il doit passer par zéro. La semi-variance est nulle lorsque $h=0$, il ne doit pas y avoir de variance entre un point et lui-même ;
2. si la variable montre une structuration spatiale, le semi-variogramme doit montrer un palier (*sill*) à partir d'une certaine distance (*range*) (Fig. 2.5).

Dans le cadre de l'approche GSTA, l'intérêt de conduire une analyse variographique est évident. En effet, les variables moyenne (μ), écart-type (σ) et asymétrie (γ) sont réparties sur un espace géographique donné et sensées être porteuses d'une partie d'information sur le ou les processus de transport des sédiments.

Il y a plusieurs intérêts à conduire une analyse variographique dans l'approche GSTA :

1. elle va nous renseigner sur le niveau d'information présent dans les variables utilisées. Ce premier point fondamental amène éventuellement à ne pas conduire une analyse GSTA, si la preuve est faite qu'une ou plusieurs des trois variables ne montre pas d'organisation spatiale claire ;
2. la construction du semi-variogramme se fait en suivant une série d'étapes qui vont donner des informations sur le comportement spatiale de chacune des VR. Notamment, la présence d'anisotropie peut être détectée au moment de l'établissement du graphique ;
3. une fois construit, le semi-variogramme expérimental va servir de base pour la recherche d'un modèle spatial qui pourra servir par la suite, par exemple pour une opération d'interpolation spatiale.

2.1.2 Apport N°2 : la grille régulière

L'intérêt du travail de Le Roux (1994b) a surtout été d'identifier le problème lié à la comparaison des paramètres statistiques sur l'espace. En effet, en fonction de la distance des points voisins avec le point pivot et de leur position relative, les valeurs ont plus ou moins de chance d'être corrélées. En conséquence, le poids relatif de chaque point entourant est variable d'une zone à une autre, ce qui n'est pas souhaitable. La création d'une grille régulière mettant à égale distance les points les uns des autres, est une solution. Dans cet esprit, Asselman (1999) a proposé l'utilisation de grilles rasters.

Le semi-variogramme expérimental va servir de support à l'établissement d'un modèle de variation spatiale. La recherche d'un tel objet est nécessaire lorsque l'on souhaite réaliser une opération d'interpolation à l'aide d'un des interpolateurs de la géostatistique, tels que ceux de la famille du krigeage (Matheron, 1965), par exemple.

3. Basé sur les données initiales, il s'agit en toute rigueur du semi-variogramme expérimental.

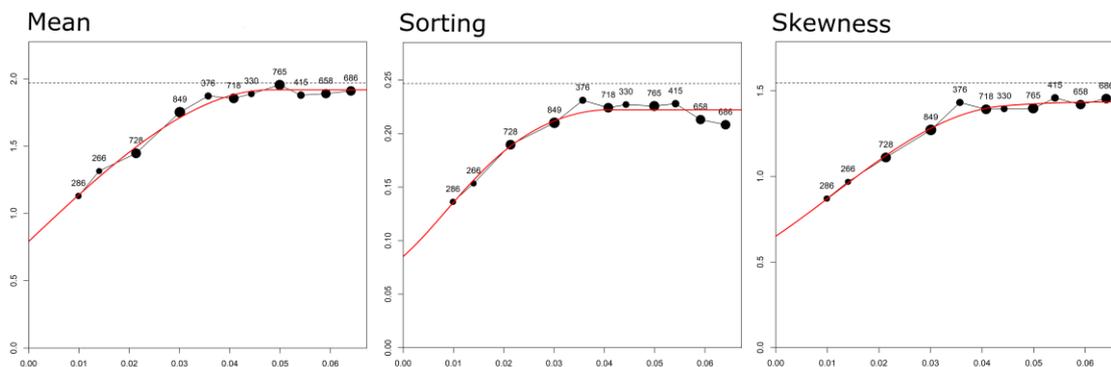


Figure 2.6 – Exemple de variogrammes expérimentaux (lignes et points noirs) des trois variables utilisées dans GSTA (« Mean », « Sorting », « Skewness »), avec leur modèle variographique théorique respectif (lignes rouges) (Baux et al., 2019).

Les variables de l’approche GSTA sont, par construction, discontinues sur l’espace d’étude (elles ne sont connues que sur les points d’échantillonnage). Le modèle variographique théorique (défini sur le semi-variogramme expérimental) va combler les manques pour avoir l’information de manière continue. Il va alors être possible de recréer des points d’échantillonnage virtuels aux nœuds d’une grille régulière dont la maille pourra être adaptée en fonction des besoins. Dans Poizot et al. (2006), nous proposons de créer une grille régulière de points représentant des échantillons virtuels reconstitués à partir des données initiales via le modèle variographique théorique établi sur le semi-variogramme expérimental (Fig. 2.6).

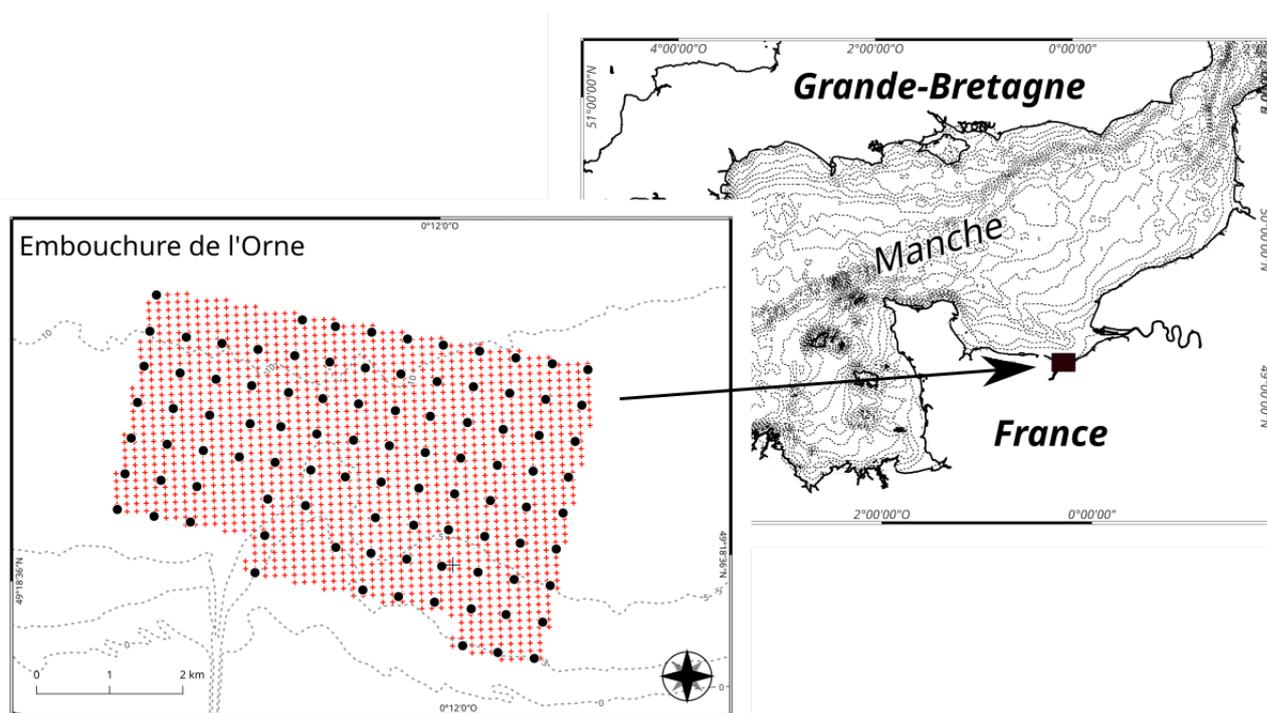


Figure 2.7 – Exemple de création d’une grille régulière (croix rouges) à partir des données originales (ronds noirs) au niveau de l’embouchure de l’Orne (Normandie, France). Les données statistiques μ , σ et γ sont interpolées par krigeage ordinaire en chaque nœud de la grille régulière et sont stockées.

L’apport principal de la méthode proposée est que les comparaisons entre points voisins et points pivots seront envisageables (en poids statistique), puisque la grille régulière est spatialement homogène dans toutes les directions de l’espace 2D (Fig. 2.7). Un effet

co-latéral à cette démarche est qu'il est opéré un apport d'information à travers le modèle variographique théorique. Il s'agit bien là d'un réel apport d'information, puisque le modèle est défini à l'issue d'une démarche de création du variogramme expérimental, qui autorise sa définition après vérification de la présence d'information dans le jeu de données original. Une fois mise en place pour chaque variable, μ , σ et γ , les grilles régulières vont servir de base pour la détermination des vecteurs de transport des sédiments via une démarche GSTA.

2.1.3 Apport N°3 : la distance de recherche

Dans l'approche GSTA telle qu'elle a été mise en place par Gao & Collins (1992), la détermination du vecteur de transport en chaque point d'échantillonnage, se fait par comparaison avec les valeurs des variables statistiques sur les points voisins. Ces derniers sont choisis comme étant à l'intérieur d'un cercle de rayon égal à la distance moyenne du pas d'échantillonnage de l'ensemble du jeu de données, appelé « *characteristic distance* » (D_{cr}) (Gao & Collins, 1992). L'opération concrète d'acquisition d'échantillons sédimentaires en mer sur un espace donné est en général contrainte par des considérations pratiques telles que le temps bateau, la géographie de la zone (trait de côte, embouchure de rivière ou de fleuve, port, etc.), le nombre d'échantillons maximum (coûts d'analyses, temps laboratoire, etc.), pour n'en citer que quelques unes. Par conséquent, le champ de vecteurs résultant est plus sous influence de considérations économique-pratiques, qu'environnementales.

Shannon (1948) démontre que pour être correctement numérisé un signal doit être échantillonné à minima au double de sa fréquence. Dans le cas des VR, μ , σ et γ , se restreindre à ne considérer que les points immédiatement plus proches, a de forte chance de ne pas capter toute l'information nécessaire pour bien expliquer le comportement du ou des processus spatiaux étudiés.

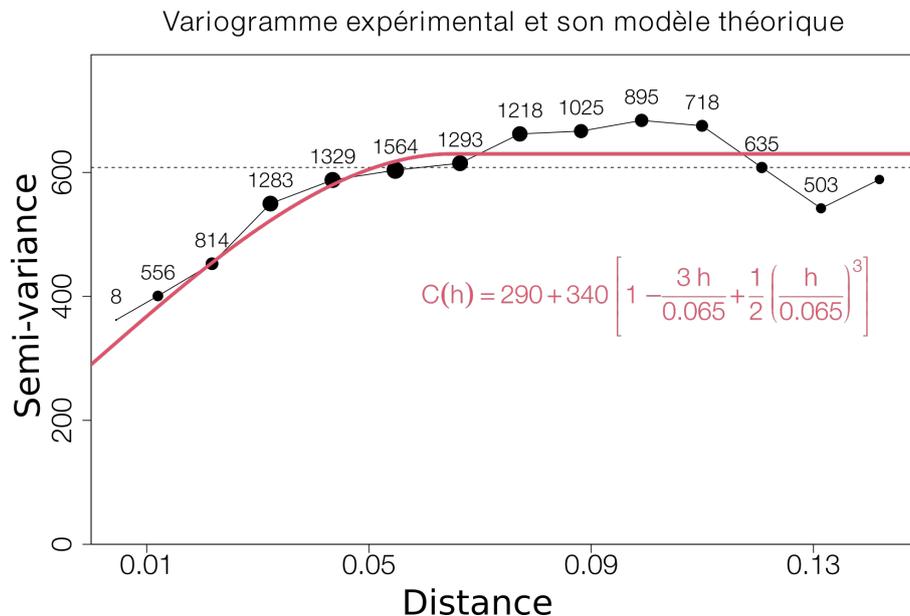


Figure 2.8 – Variogramme expérimental (voir Fig. 2.5) et son modèle théorique (ligne rouge). L'expression du modèle est indiquée en rouge sur le graphique et correspond à un modèle sphérique de portée (range) 0.065 et pallier (sill) 340. S'ajoute un « effet pépité » (nugget effect) de 290 qui correspond à la valeur de semi-variance lorsque le modèle théorique coupe l'axe des ordonnées.

La géostatistique offre le moyen de vérifier la pertinence de l'utilisation de la D_{cr} définie

par [Gao & Collins \(1992\)](#) au travers de l'analyse du semi-variogramme (voir 2.1.1). Dans [Poizot et al. \(2006\)](#), nous proposons de définir de manière robuste et objective la distance de recherche des points voisins. La définition de cette nouvelle distance que nous avons nommé « distance géostatistique » (D_g), est la suivante :

la distance géostatistique est la distance à laquelle les variables (moyenne, écart-type et asymétrie) atteignent un palier sur leur semi-variogramme expérimental respectif.

Cette définition a plusieurs conséquences et avantages :

1. si un palier est présent sur le semi-variogramme expérimental, alors la variable montre une auto-corrélation spatiale (donc porteuse d'information) ;
2. si une anisotropie a été mise en évidence, alors la recherche des points voisins ne devra plus se faire dans un cercle, mais dans une ellipse, en tenant compte de l'orientation de son grand axe.

La valeur de la D_g est déterminée à l'issue de la création du modèle variographique (voir 2.1.2). L'expression du modèle est fonction des deux paramètres : *sill* et *range*. La figure 2.8 reprend le variogramme de la figure 2.5 sur lequel est ajouté le modèle théorique (ligne rouge) déterminé de manière à passer au mieux à travers le nuage de point du variogramme expérimental. Dans l'exemple donné ici, le modèle choisit ($C(h)$) est l'addition d'un modèle sphérique et d'un « effet pépite », pour donner l'expression complète :

$$C(h) = 290 + 340 \left[1 - \frac{3h}{0.065} + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{0.065} \right)^3 \right]$$

Suivant la définition de la D_g (égale au *range* du modèle théorique), cette dernière vaut dans l'exemple donné : 0.065 (dans l'unité des coordonnées géographiques, ici des degrés décimaux).

La détermination de la D_g constitue une autre différence fondamentale avec la démarche d'origine de [Gao & Collins \(1992\)](#). Dans la pratique, cette distance apparaît être en règle générale supérieure (en valeur) à la D_{cr} .

2.1.4 GSTA et les outils logiciels.

Les démarches STA® et GSTA apparues respectivement avec [McLaren \(1981\)](#) et [Gao & Collins \(1992\)](#), sont arrivées en même temps que se développait et explosait l'informatique grand public. Tout naturellement ces deux approches ont fait l'objet de plusieurs implémentations informatiques sous forme de logiciels et/ou scripts.

Nous n'allons pas passer en revue toutes les applications informatiques publiées jusqu'ici (voir Tab. 2.1), mais ne citer que les principales. [Le Roux \(1994a\)](#) a tout d'abord intégré son approche pour la détermination des vecteurs de transport des sédiments dans le tableur *LOTUS 1-2-3* et ensuite avec *TRANSVEC* dans *Microsoft EXCEL™*. [Gao \(1996\)](#) a publié un article dans lequel il présente un programme Fortran (*GSTA*) qui réalise les calculs des vecteurs de transport selon la méthodologie présentée dans [Gao & Collins \(1992\)](#). Sans réaliser de développement propre, [Asselman \(1999\)](#) présente une procédure intégrée à un logiciel dédié (*PC-Raster*) pour reproduire les étapes des calculs de [Gao & Collins \(1992\)](#). Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine Nationale (SHOM), se pourvoit en 1995 de sa propre application DERSEDI®.

Table 2.1 – Liste des programmes recensés dans la littérature qui réalisent les calculs visant à déterminer des vecteurs de direction du transport des sédiments sur la base des travaux de McLaren (1981) et Gao & Collins (1992) d’après Poizot & Méar (2008).

Nom	Langage	Dimension	Référence
KAILASH.BAS	BASIC	1D	Pandarinath & Narayana (1993)
DERSEDI [®] 2.0	PASCAL	2D	Pedrerros (1995) (SHOM property)
GSTA	FORTRAN	2D	Gao (1996)
TRANSVEC	PASCAL	2D	Pedrerros <i>et al.</i> (1996)
PC-Raster based	Not cited	2D	Asselman (1999)
GSTAST	FORTRAN	2D	Chang <i>et al.</i> (2001)
Spreadsheet	LOTUS 1-2-3	2D	Le Roux (1994a)
TRANSVEC	EXCEL-VBA	2D	Le Roux <i>et al.</i> (2002)
FLUESEDISH	Not cited	2D	Trentesaux (2005)

En 2008, nous avons développé une application, nommée *eCSedTrend*, pour la première fois entièrement intégrée au sein d’un logiciel S.I.G. (QGIS) (Poizot & Méar, 2008). Au regard de ce qui avait été réalisé jusqu’à cette date, ce développement marque un tournant dans la philosophie adoptée pour la méthode GSTA. En premier lieu, *eCSedTrend* est pourvu d’un interface graphique pour faciliter son utilisation. Au delà des aspects esthétiques et ergonomiques qui n’ont pas été le but premier de la démarche, c’est la facilité offerte de pouvoir modifier les différents paramètres et réglages d’application de GSTA.

En particulier, il est rendu possible de choisir quel cas d’évolution tester. L’application *eCSedTrend* autorise une analyse exploratoire du jeu de données en permettant de traiter n’importe quel cas d’évolution basé sur l’un ou plusieurs des trois paramètres statistiques d’entrée (moyenne, écart-type et asymétrie).

Avec la définition de la D_g via une analyse variographique préalable, l’application intègre la possibilité de pouvoir réaliser la recherche des points voisins dans une ellipse au lieu d’un simple cercle, s’il y a lieu. C’est un autre changement fondamental dans l’approche GSTA.

Enfin, son intégration au sein d’un logiciel de S.I.G. permet de tirer profit de plusieurs aspects déjà présents dans le logiciel hôte :

1. le choix des entrées et des sorties des données homogènes et standardisés ;
2. la gestion intégrée et robuste de la géodésie et des calculs géodésiques attendant ;
3. la visualisation simplifiée et uniforme des résultats des calculs.

Le choix d’intégrer *eCSedTrend* dans le logiciel de S.I.G. QGIS a été délibéré et guidé par plusieurs aspects toujours d’actualité aujourd’hui :

1. *QGIS* fonctionne sur les principales plates-formes en vigueur (Windows, MacOS, GNU/Linux, Android) ;
2. *QGIS* ouvre son code et permet ainsi son adaptation aux besoins ;
3. *QGIS* possède une large communauté d’utilisateurs auprès de laquelle il est possible d’avoir une aide rapide et efficace ;
4. *QGIS* est gratuit, ce qui ne contraint pas à acheter de licence pour utiliser *eCSedTrend*.

Néanmoins, *QGIS* est en constante évolution. Au moment de la création d’*eCSedTrend*, *QGIS* était dans ses versions 1.xx. Pour être disponible dans *QGIS*, *eCSedTrend* devait être compilé, rendant l’opération d’installation fastidieuse. Malgré cela, *eCSedTrend*, rendu disponible après publication (Poizot *et al.*, 2008), a été téléchargé et utilisé à de nombreuses reprises.

Le passage de *QGIS* dans les versions 2.xx a été marqué par un changement fondamental de paradigme de la part de l'équipe de développement du logiciel : la mise en place d'un interface de programmation d'application ou *Application Programming Interface (API)*. Ce choix a eu des répercussions fondamentales à tous les niveaux de développement et d'utilisation de *QGIS*. Nous ne détaillerons ici tous les bénéfices de ce choix, mais ils ont été suffisamment importants, pour que nous décidions de développer une nouvelle version d'*eCSedTrend*.

Dans [Poizot & Méar \(2010\)](#), nous proposons le remplacement d'*eCSedTrend* par *GiSedTrend*. Le développement de ce nouvel outil, tout en reprenant l'ensemble des spécificités d'*eCSedTrend*, a été motivé par deux aspects importants.

Le premier a été d'ordre pratique et a consisté à tirer profit des nouvelles potentialités offertes par *QGIS* et de sa nouvelle API. La conséquence immédiate pour l'utilisateur a été de rendre l'installation de *GiSedTrend* simple et homogène quelque soit la plate-forme utilisée. Ce critère a été déterminant et une des sources du nombre important d'installation de *GiSedTrend*⁴.

Le second apport plus fondamental réside dans le fait que pour la première fois, des limites physiques du domaine d'étude peuvent être prises en compte dans les calculs pour la détermination des vecteurs de transport par GSTA (Fig. 2.9). Cela a été rendu possible grâce à l'incorporation explicite de *GiSedTrend* dans *QGIS*. L'intérêt est assez évident et n'avait jamais fait l'objet d'une prise en compte particulière jusque là. Nous verrons dans la section 2.2 un exemple de mise en pratique de cette caractéristique.

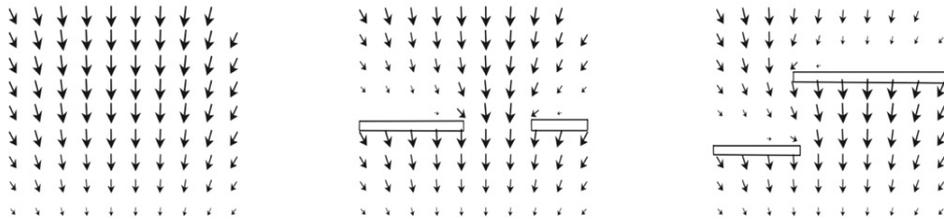


Figure 2.9 – *Prise en compte des limites morphologiques dans le calcul des vecteurs de transport par GSTA. A gauche, le champ de vecteur sans obstacles. Au centre et à droite, le même jeu de données en incorporant artificiellement des limites de formes différentes représentant des digues (Poizot & Méar, 2010).*

2.2 Cas d'applications de la démarche GSTA

Les travaux que nous avons mené sur la démarche GSTA ont été motivés en premier lieu par la volonté d'améliorer la méthode dans ses principes théoriques et pratiques. Son application sur des problématiques environnementales concrètes est venue dans un second temps. Une fois les concepts validés, il ont été naturellement appliqués aux problématiques du laboratoire. Mais c'est surtout au travers des sollicitations extérieures, que j'ai pu éprouver les propositions faites dans le cadre de GSTA à des cas concrets. Il y a là deux motifs de satisfaction. Le premier réside dans le fait que cette nouvelle démarche rencontrait l'adhésion de la communauté. Le second est que dans la majeure partie des cas, les résultats obtenus ont participé à améliorer les connaissances du transport sédimentaire dans les zones étudiées et ainsi apporter des réponses toujours plus précises et justes à des problématiques environnementales concrètes.

J'ai choisi de présenter trois cas d'applications de l'approche GSTA parmi les collaborations que j'ai pu avoir jusqu'ici. Ce choix a été fait pour illustrer la diversité des

4. Plus de 800 téléchargements et installations jusqu'à présent. ([GiSedTrend](#))

environnements, à la fois par leurs caractéristiques physiographiques, mais aussi par leur échelle d'étude qui va des plus petites distances vers les plus grandes.

2.2.1 Une plage d'Espagne

Ce premier exemple d'application de l'approche GSTA selon le protocole que nous avons établi dans [Poizot *et al.* \(2006\)](#) et [Poizot & Méar \(2010\)](#), est tiré de [Poizot *et al.* \(2013\)](#). L'intérêt de ce travail réside dans plusieurs aspects :

- les résultats GSTA sont confrontés à des travaux basés sur l'utilisation de traceurs fluorescents ([Bellido *et al.*, 2011](#)), ces derniers servant de référence pour la détermination des directions réelles de transport du sable ;
- la zone d'étude se situe dans la zone de balancement des marées, secteur reconnu comme problématique pour une analyse type GSTA ([Masselink, 1992](#)) ;
- les paramètres statistiques sont définis sur la base de distributions granulométriques obtenues par tube à sédimentation, technique de mesure rarement utilisée dans les analyses GSTA pour la détermination des paramètres statistiques servant de base aux calculs.

La plage de Camposoto est située sur la façade atlantique des côtes d'Espagne, proche de la ville de Cádiz (Fig. 2.10). Les côtes d'Espagne sont prisées par les touristes et le tourisme est un secteur économique de premier plan pour le pays. Il est fondamental pour les plages de conserver un attrait dans le cadre du marché dit des « 3S » (Sea-Sun-Sand). Malheureusement, comme c'est le cas sur bon nombre de côtes dans le monde, la plage de Camposoto est soumise à une érosion régulière de la part des agents hydrodynamiques (houles essentiellement). Des opérations de ré-ensablement doivent avoir lieu régulièrement afin de préserver une frange sableuse suffisante pour que la plage reste attractive. Ces opérations sont coûteuses et il est dès lors nécessaire de suivre l'évolution de la plage pour conclure sur l'efficacité de telles mesures.

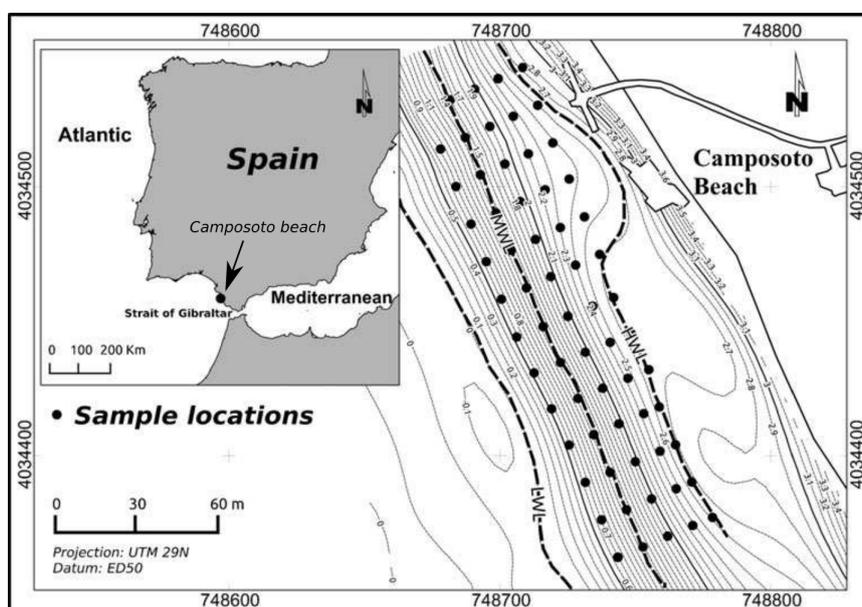
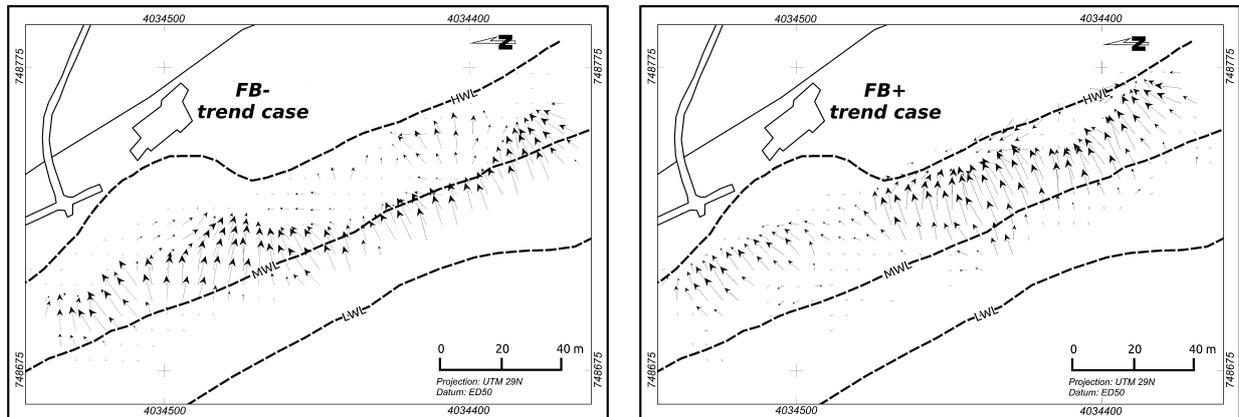


Figure 2.10 – Localisation de la plage de Camposoto (Espagne) et des points de prélèvements d'échantillons sédimentaires de surface. D'après [Poizot *et al.* \(2013\)](#).

La technique de référence pour confronter les résultats GSTA avec le transport réel, est celle de traceurs fluorescents ([Bellido *et al.*, 2011](#)). L'aspect fastidieux de la mise en œuvre de cette technique par traceurs a limité l'étendue géographique de son application, pour se restreindre à un secteur de la plage de Camposoto de dimension approximative

de 150 m de long sur 60 m de large entre les niveaux de basse mer et de haute mer de la marée (Fig. 2.10).



(a) Résultats GSTA du cas d'évolution $FB-$. (b) Résultats GSTA du cas d'évolution $FB+$.

Figure 2.11 – Résultats GSTA des deux cas d'évolutions qui ont été reconnus comme cohérents au regard des directions de transports données avec l'analyse par traceurs fluorescents. D'après Poizot et al. (2013).

Sur la figure 2.11 sont restituées les deux cartes montrant les directions de transport retenues après confrontation avec la technique de référence (traceurs fluorescents) (Bellido et al., 2011). Les cas $FB-$ (Fig. 2.11a) et $FB+$ (Fig. 2.11b) sont les deux cas d'évolution validés respectivement pour le transport du sable en bas de plage et celui en haut de plage.

Si le cas $FB-$ est un des deux cas classique de GSTA, il n'en est pas de même pour $FB+$. Ce dernier cas d'évolution est validé dans ces conditions pour la première fois et cela a été rendu possible, entre autre, grâce à l'approche exploratoire réalisée sur le jeu de données qui a permis de tester d'autres cas d'évolution que ceux classiques.

2.2.2 Un récif corallien de la Réunion

Le second exemple d'application de l'approche GSTA est tiré de l'article Cordier et al. (2012). La rédaction de ce travail a été réalisée dans le cadre de la thèse de E. Cordier. Ce dernier m'a contacté pour que nous puissions évaluer ensemble la validité de la méthode GSTA dans le cadre du transport des particules sédimentaires au sein d'un récif corallien qui, dans de tels environnements, sont essentiellement carbonatés.

Un premier intérêt dans ce travail a été que GSTA n'avait encore jamais été mise en œuvre jusque là pour déterminer les directions de transport des sédiments dans un récif de corail. Un second intérêt a été dans la morphologie des contours très accidentés de la zone d'étude (Fig. 2.12) qui devaient nécessairement être pris en compte tant leur impact sur le transport des sédiments semblait évident et prépondérant.

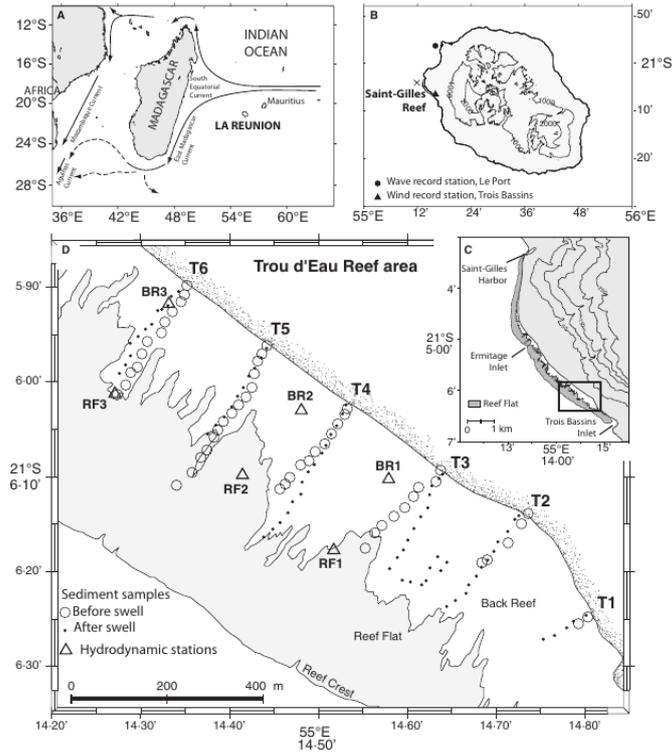


Figure 2.12 – Localisation de la zone d'étude du Trou d'Eau sur le site de l'Ermitage-La Saline, île de La Réunion (France), ainsi que des échantillons sédimentaires utilisés pour l'analyse GSTA. D'après Cordier et al. (2012).

Sur la figure 2.12 sont présents les localisations géographiques des échantillons de deux campagnes de prélèvements d'échantillons sédimentaire sur le site du Trou d'Eau dans le récif de corail de La Saline de la Réunion. La première mission d'échantillonnage sédimentaires a été réalisée après une longue période de calme dans le récif, juste avant une épisode de forte agitation d'amplitude annuelle, à l'issu de laquelle la seconde campagne de prélèvements a été conduite. En parallèle, des mesures hydrographiques de variations de hauteurs d'eau et de vitesses des courants, ont été aussi réalisées pour les deux conditions météorologiques (avant-après tempête).

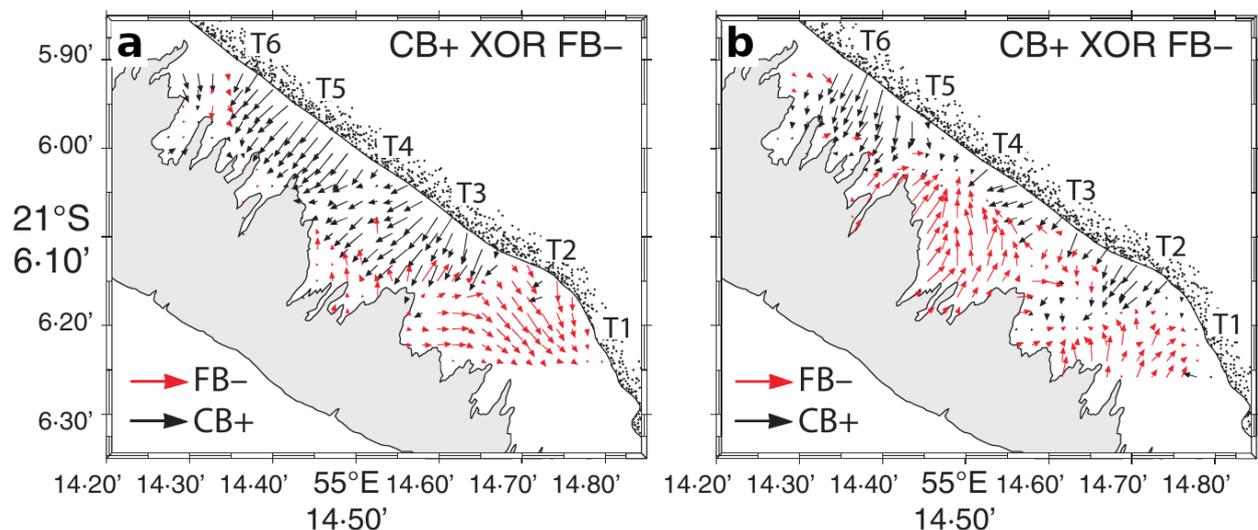


Figure 2.13 – (a), champ de vecteurs par analyse GSTA du cas d'évolution $CB+ XOR FB-$ avant tempête. (b), champ de vecteurs par analyse GSTA du cas d'évolution $CB+ XOR FB-$ après tempête. Extrait de Cordier et al. (2012).

L'analyse séparée de ces deux campagnes a permis de mettre en évidence et de ca-

racteriser le transport de sédiments carbonatés (d’origine corallienne) dans cette zone particulière du Trou d’Eau (Fig. 2.13).

La méthode GSTA appliquée a suivi le protocole établi dans [Poizot *et al.* \(2006\)](#) et [Poizot & Méar \(2010\)](#). Dans le cas présent, l’étude s’est bornée aux deux cas d’évolution historique $CB+$ et $FB-$. Néanmoins, par rapport à l’approche historique de [Gao & Collins \(1992\)](#), deux différences majeures ont été mises en œuvre :

- [Gao & Collins \(1992\)](#) proposent d’étudier le modèle d’évolution $CB+$ OR $FB-$, c’est à dire que le champ de transport résultant est, en chaque point du maillage, une combinaison indifférenciée des deux cas d’évolutions $CB+$ et $FB-$. Dans [Poizot & Méar \(2010\)](#), nous avons proposé l’utilisation d’une nouvelle combinaison logique entre les cas d’évolutions : le « ou exclusif » (XOR). Le résultat de son utilisation est qu’en chaque point du maillage, seule la direction d’un des deux cas du modèle est conservée. Les conditions qui permettent de faire ce choix sont détaillées dans [Poizot & Méar \(2010\)](#) ;
- les limites du récif externe du Trou d’eau (Fig. 2.12), ont été prises en compte dans le calcul des directions du champ de vecteurs, ce qui a permis de donner un maximum de détails et de validité des directions des vecteurs de transport. C’est un des apports principaux d’avoir intégré GSTA dans un SIG ([Poizot & Méar, 2010](#)).

La figure 2.13 présente les deux champs de vecteurs avant (a) et après tempête (b), qui ont été le plus en accord avec les mesures de courants et d’analyse des contenus sédimentaires réalisés en parallèle de GSTA. Le champ de vecteurs attribué au cas d’évolution $FB-$ est dans les deux cas celui qui représente le mieux de transport des particules sédimentaires dans la zone. Avant tempête (Fig. 2.13a), l’intérieur du récif n’est soumis qu’à de faibles courants liés au régime des marées micro-tidal du lieu. Le cas d’évolution $FB-$ retransmet bien le transport dans ces conditions et surtout la séparation entre la circulation des courants (très faible) vers le NW et celle (plus importante) vers de SE au niveau du transect $T3$ (Fig. 2.13a). Le champ de vecteur lié au cas $CB+$ avant tempête ne représente pas un transport réel de sédiment, mais est plutôt le résultat de l’accumulation de particules de plus en plus fines vers la côte. La surface couverte par les vecteurs de type $CB+$ n’est pas ici l’image d’un transport réel. Ce processus est qualifié de « lag deposit » par [McLaren \(1981\)](#). Après tempête, c’est toujours le cas $FB-$ qui est le plus en concordance avec les analyses connexes, et montre un transport majoritairement orienté du récif externe vers la côte entre les transects $T1$ et $T5$, avec toujours une légère discordance au niveau du transect $T3$ (Fig. 2.13b). Les vecteurs du champ lié au cas d’évolution $CB+$, sont interprétés de la même manière qu’avant tempête. Le transport bien marqué vers la côte lié au cas $FB-$ engendre une diminution des vecteurs $CB+$ qui restreint la zone de mélange à une petite fange côtière.

L’utilisation de la nouvelle combinaison logique XOR , alliée à la prise en compte de la complexité morphologique de certains contours de la zone d’étude, ont permis pour la première fois à l’approche GSTA de parvenir à exprimer relativement fidèlement les directions de transport de sédiments carbonatés dans un récif de corail.

2.2.3 Une baie du Japon

Le dernier exemple d’application de l’approche GSTA telle que nous l’avons proposé dans [Poizot *et al.* \(2006\)](#) et [Poizot & Méar \(2010\)](#), est le fruit d’une collaboration avec G. Kawakami du *Geological Survey of Hokkaido (Japon)*, publié en 2021 ([Kawakami *et al.*, 2021](#)). Parmi les contacts que j’ai pu avoir, ce travail illustre bien l’approbation de plus en plus large de la communauté, des propositions faites sur l’approche GSTA.

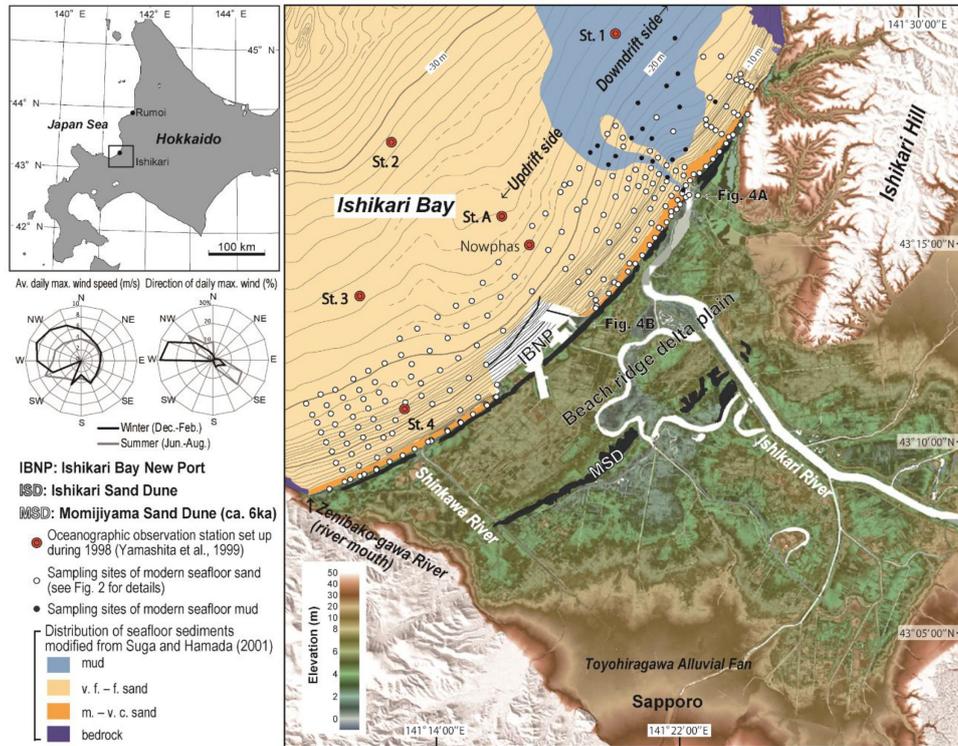


Figure 2.14 – Répartition des sédiments superficiels dans la baie d'Ishikari. Les cartes radar (à gauche) montrent la vitesse et la direction du jour vent maximum de 1990 à 2017 à l'Observatoire météorologique d'Ishikari (Agence météorologique japonaise). L'embouchure actuelle de la rivière Ishikari située au nord-est, montrant une forme fortement déviée. D'après Kawakami et al. (2021).

Les particularités que présente cette d'étude sont à plusieurs niveaux :

- le jeu de données sur lequel nous nous sommes basés pour réaliser les différentes analyses (y compris GSTA), est le résultat de plusieurs campagnes réalisées sur dix années ;
- l'objectif principal de l'étude se situe au niveau de l'embouchure de la rivière *Ishikari* qui se jette dans la baie du même nom. Les dimensions la zone d'étude intèressent un linéaire côtier de presque 40 km de long sur une dizaine de kilomètres vers le large ;
- la baie accueille en son milieu un complexe portuaire relativement récent avec des digues de grande taille (Fig. 2.14).

La première difficulté dans ce travail a été de faire la preuve de la validité du jeu de données sédimentaires issue de plusieurs missions de prélèvements sur plusieurs années (10 ans, entre 1996 et 2016). Pour cela, nous avons utilisé l'analyse variographique qui doit être conduite dans notre protocole GSTA, pour démontrer la présence de structurations spatiales des variables d'études (μ , σ et γ). Deux caractéristiques importantes de l'ensemble des missions ont concouru à valider le jeu de données : 1) elles ont toutes eu lieu au cours de la même période météorologique de l'année, c'est à dire en période estivale et 2) les mêmes protocoles de laboratoire ont été utilisés pour obtenir les distributions granulométriques. De fait ce qui pouvait apparaître au départ comme une condition rédhitoire à l'application de GSTA, c'est en fin de compte révélé être un atout.

Pourquoi cela ?

Dans une approche « classique », pour étudier une zone via GSTA, nous allons chercher à faire les prélèvements en une seule fois et le plus rapidement possible (relativement à la dimension de la zone). En effet, pour mettre en évidence un transport cohérent

sur la zone, il faut que ce soient les mêmes processus de transport qui aient influencé l'organisation spatiale des sédiments, ce qui est juste à mon sens. En menant toutes les analyses qui vont aboutir *in fine* aux calculs des paramètres statistiques nécessaires à GSTA, nous allons accumuler tout au long de la chaîne de traitement, différents types d'incertitudes et d'approximations, que je qualifierai de « bruits » dans la mesure du signal du ou des processus de transport. Ce bruit est considéré homogène sur le jeu de données. Dans l'analyse variographique, il est contenu dans ce qui est appelé « l'effet pépite », qui correspond au saut brutal de la semi-variance à l'origine. Cet effet n'est pas uniquement le résultat des erreurs de mesures, il contient aussi d'autres sources d'incertitudes en relation directe avec la nature, le nombre et l'organisation spatiale des processus mesurés.

Dans le cas du jeu de données de la baie d'*Ishikari*, les différents jeux de données obtenus ont aussi accumulé de la même manière tout un ensemble d'incertitudes (ou bruits). Le bruit étant par nature erratique (ou aléatoire), la sommation de ces quantités d'un jeu de données à l'autre, fini par éliminer les composantes aléatoires du signal. C'est ce qui s'est passé avec les données analysées ici, le mélange d'informations obtenues à des périodes comparables, avec des procédures de laboratoire identiques, a en fait permis d'enlever une certaine quantité d'incertitudes du jeu global.

Bien entendu, tout n'est pas parfait. En enlevant ce que j'ai qualifié de bruit dans le signal, c'est à dire des variations de « hautes-fréquences » (relativement à la fréquence du signal total), une partie du signal utile contenant de l'information sur le transport, est enlevée elle aussi. En conséquence, il ne reste plus que des variations « basses fréquences ». Dans le cas qui nous occupe, cela veut dire que nous n'avons plus accès aux variations à courtes distances (les hautes fréquences), elles ont été filtrées dans la procédure de construction du jeu de données, il ne nous reste plus que les grands traits du transport (les basses fréquences). Une conséquence directe pour l'étude menée ici est que les transports courtes distances au niveau de l'embouchure de la rivière sont partiellement gommés.

Le filtrage engendré par le mode de génération du jeux de données a aussi eu une autre conséquence : il a permis d'identifier un sous-ensemble de points pour lesquels le fonctionnement des processus de transport était clairement différents du reste du jeu de données. Ce sous-ensemble s'est avéré contenir les échantillons sédimentaires les plus proches de la côte. C'est ici à mon sens un autre bénéfice (inattendu) du filtrage opéré. J'explique cela par le fait d'enlever des variations de plus hautes fréquences exacerbe des caractéristiques propres éventuellement présents dans le jeu de données, de chaque sous-ensembles de points. En d'autres termes, en filtrant le bruit, les limites deviennent plus nettes. Ce sous-ensemble de points proches de la côte a donc fait l'objet d'une interprétation à part du reste du jeu de données (Fig. 2.15).

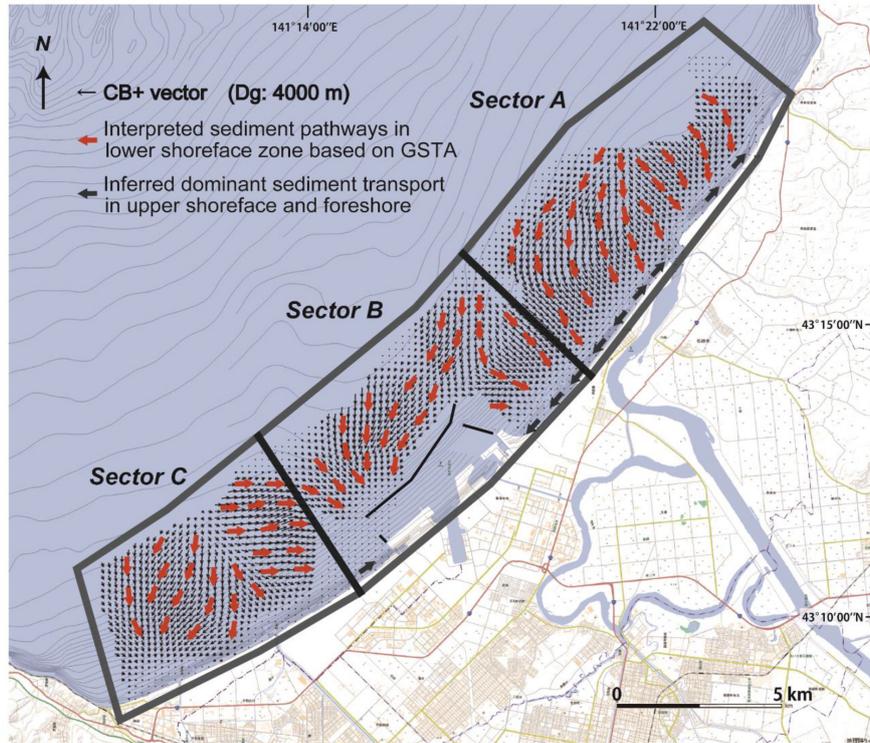


Figure 2.15 – Champs de vecteur du cas d'évolution $CB+$ (petites flèches noir), de l'interprétation des directions principales de transport (grosses flèches rouge) et du transport à la côte (grosses flèches noires). D'après Kawakami et al. (2021).

Le cas d'évolution $CB+$ a été retenu comme celui le plus en phase avec les transports connus dans la zone (Fig. 2.15). L'analyse du champ de vecteurs associé, a permis de reconnaître trois grandes zones distinctes de transport des sédiments dans la baie (Fig. 2.15). L'existence de ces cellules est à mettre en relation avec la présence du complexe portuaire au milieu de la baie. La taille et la longueur des digues construites sont extrêmement intrusives dans la zone d'étude. La circulation des sédiments s'en trouve affectée. Les digues sont des barrières à la dérive littorale, mais aussi plus au large, elles influencent les vitesses et directions des courants.

L'impact de la présence des digues du complexe portuaire sur le transport des sédiments dans la partie étudiée de la baie, est si important qu'il affecte l'ensemble de la zone, y compris au niveau de l'embouchure de la rivière. À nouveau, cet effet a pu être mis en évidence grâce à la prise en compte dans le calcul des vecteurs GSTA, de la présence des digues. Les transports des sédiments indiqués, laissent à penser que les entrées nord et sud du complexe vont accueillir de plus en plus de matériel sédimentaire au cours des années et que donc, des dragages devront très certainement être réalisés pour conserver les accès nécessaires à l'intérieur du port.

2.3 Conclusion

Les propositions que nous avons pu faire dans l'application de la démarche GSTA tel qu'elle avait été définie initialement par Gao & Collins (1992), ont permis, sur le fond : 1) une meilleure définition des paramètres utiles à son fonctionnement (par exemple, la D_g) ; 2) de standardiser un protocole de pré-traitements robustes pour la mise en place d'un jeu de données homogène. Sur la forme, la mise à disposition d'un outil logiciel (GiSedTrend) au sein d'un SIG, a ouvert la possibilité :

- de conduire des analyses exploratoires des jeux de données ;

- d'inscrire la démarche GSTA dans une nouvelle ère par la prise en compte de limites et morphologies présentes dans les zones d'études.

Valorisation des travaux

- ☞ 7 publications dans des revues à comité de lecture dont 5 en 1^{er} auteur
- ☞ 6 actes de congrès à comité de lecture
- ☞ 2 actes de congrès sans comité de lecture

Programmes de recherche rattachés

- ☞ **Régionaux**
 - TURBISANT (2015, Resp. : A. Murat), en tant que collaborateur ;
 - SMOLTS (2014, Resp. : A. Murat), en tant que collaborateur ;
 - GEDANOR (2014, Resp. : E. Poizot) ;
 - MECAQUA (2013, Resp. : E. Poizot).
- ☞ **Départementaux**
 - FLUMAT (2014, Resp. : A. Murat), en tant que collaborateur ;
 - CREPICOT (2013, Resp. : A. Murat), en tant que collaborateur ;
 - SALMOCOT (2011, Resp. : A. Murat), en tant que collaborateur.

Chapitre 3

La LBM pour l'analyse numérique d'écoulements turbulents

Question

L'approche de Boltzmann sur réseau est-elle adaptée à la modélisation de la turbulence autour de structures marines ?

Le passage au « tout numérique », c'est à dire l'utilisation de codes de calculs informatiques pour la résolution d'équations de processus physiques sur un ou plusieurs ordinateurs, a été une démarche logique dans l'évolution des travaux que j'ai menés jusqu'ici sur le transport sédimentaire.

La problématique du transport sédimentaire dans les approches numériques marines, est abordée essentiellement au travers d'une démarche en deux étapes. La première consiste à modéliser les vitesses et les directions de la masse d'eau en une, deux ou trois dimensions (c'est le domaine de la CFD (*Computational Fluid Dynamic*)). Dans la seconde, les contraintes induites par le fluide sont calculées pour déterminer si les sédiments peuvent être érodés, transportés ou déposés. Dans cette démarche, les déplacements sont une conséquence de ceux de la masse d'eau. Ainsi, je qualifie cette approche comme étant centrée fluide.

Dans les travaux réalisés jusque-là, mon approche du transport sédimentaire était plutôt centrée sédiment ou encore centrée particule. Je me suis donc d'abord intéressé aux approches numériques qui se focalisent sur le mouvement des particules. Ce sont les **automates cellulaires** (« Cellular Automata » - CA) qui ont retenu, dans un premier temps, mon attention. C'est une démarche Lagrangienne purement centrée sur les particules. Le principe est de mettre en place les règles de comportement sédimentaire, comme s'il s'agissait d'entités actives dotées de capacités à interagir avec leur environnement. Ce type d'approche offre des possibilités d'une modélisation fine du comportement des sédiments. Mais les moyens de calculs classiquement disponibles, ne permettent la prise en compte que d'un nombre limité de particules, encore trop éloigné de ce qui est nécessaire pour aborder des cas concrets.

En poursuivant la recherche d'approches nouvelles possiblement applicables aux problématiques du laboratoire, j'ai découvert la **méthode de Boltzmann sur réseau** ou « Lattice Boltzmann Method » (LBM). L'approche LBM n'avait fait l'objet que de peu d'intérêt pour les problématiques environnementales et encore moins en domaine marin. jusque-là, les applications de la LBM se situaient essentiellement dans les domaines industriels tels que la chimie, la métallurgie ou encore le médical, ceci étant due aux facilités d'implémentation que propose cette approche pour la simulation, par exemple, d'un fluide

multi-phase dans un domaine à géométrie complexe. Ce type de problématique étant relativement plus délicat à résoudre avec les d'autres approches.

J'ai alors initié des travaux sur la base de développements propres de codes LBM en utilisant de langage de programmation C++. Au cours de ma progression dans la maîtrise des aspects théoriques et pratiques de la LBM, j'ai rencontré à Paris, M. B. Chopard, Professeur de l'Université de Genève (Suisse). Ce dernier est considéré comme un de ceux à l'origine des développements récents de l'approche LBM. A cette occasion, je lui ai présenté mes premiers travaux de développement en LBM. Au cours de notre échange, M. B. Chopard m'a fait part du lancement prochain d'un programme international dans l'objectif de la mise en place d'une librairie de calcul parallèle dédiée à l'approche de Boltzmann sur réseau. De ce programme, aller naître, entres autres, 4 ans plus tard, la librairie de calcul LBM : **Parallel Lattice Boltzmann Solver - Palabos**¹([Latt et al., 2021](#)).

La méthode de Boltzmann sur réseau est utilisée relativement récemment en mécanique des fluides et s'inscrit dans la gamme des méthodes dites instationnaires. Ses principes dérivent de la théorie cinétique des gaz ([Boltzmann & Nabl, 1904](#)) et des automates cellulaires ([Hardy et al., 1973](#); [McNamara & Zanetti, 1988](#)). La simplicité des opérations mathématiques de la LBM, couplée à la progression constante des moyens informatiques massivement parallèles, favorisent son utilisation dans des problématiques de plus en plus larges.

Deux thématiques se sont présentées pour lesquelles j'ai pu investiguer les potentialités de la LBM en comparaison des approches classiques telles que les modèles RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), URANS (*Unsteady-RANS*) ou encore LES (*Large Eddy Simulation*)². La première dans le domaine de l'aquaculture, pour lequel nous souhaitions connaître la distribution spatio-temporelle des courants et des particules en suspension autour des cages de production. La seconde, dans le cadre des Énergies Marines Renouvelables (EMR) pour lesquelles nous souhaitions étudier les phénomènes turbulents proche du fond et dans le sillage de machines tournantes (hydroliennes). Ces thèmes avaient comme caractéristiques communes de nécessiter une modélisation de la turbulence (à nombre de Reynolds supérieur à 10 000) et des dimensions réelles des domaines modélisés compatibles avec les moyens de calculs à notre disposition.

Avant de détailler les travaux que j'ai pu mener et encadrer avec la LBM (3.3.2 et 3.3.3), il me semble utile d'en donner les notions théoriques de base (section 3.1) et aborder ensuite les aspects propres à son implémentation numérique (section 3.2).

3.1 Équation de Boltzmann

Le principe de l'équation de Boltzmann ([Boltzmann, 1872](#)) est de prédire le comportement et l'évolution d'un ensemble de particules en mouvement par la détermination des effets des collisions en fonction de leur position x et de leur vitesse ξ . Au lieu de considérer les particules individuellement, elles sont représentées sous forme d'un ensemble noté $f(x, \xi, t)$ correspondant à la fonction de distribution statistique des particules considérées, se trouvant en un point (x, t) à une vitesse ξ . Comme son nom l'indique, le modèle de Boltzmann sur réseau est basé sur l'utilisation de l'équation de Boltzmann (Eq.(3.1)) :

1. La librairie LBM [Palabos](#)

2. J'ai laissé tout de suite de côté l'approche DNS (*Direct Numerical Simulation*) qui aurait été beaucoup trop coûteuse en temps calcul pour les problématiques d'intérêts.

$$\partial_t f + \xi \cdot \nabla f = \Omega_f, \quad (3.1)$$

avec Ω_f l'opérateur de collision représentant les effets de la collision des groupes de particules entre eux. La notation Ω rappelle le nombre de complexions de la formule de Boltzmann³ en physique statistique.

Ainsi dans le modèle de Boltzmann sur réseau, l'équation de Boltzmann va servir à décrire l'état et l'évolution d'un fluide. Ce dernier, modélisé par l'équation de Boltzmann, obéit à la loi des gaz parfaits (Guo & Shu, 2013). Les grandeurs macroscopiques du fluide telles que le densité ρ , la vitesse U ou encore l'énergie e , peuvent être retrouvées respectivement par les Eqs.(3.2) :

$$\begin{aligned} \rho &= \int f d\xi, \\ \rho U &= \int \xi f d\xi, \\ \rho e &= \int \frac{c^2}{2} f d\xi, \end{aligned} \quad (3.2)$$

où c est la vitesse du son définie par $c = \xi - U$. La pression P est liée à la densité par les Eqs.(3.3) :

$$\begin{aligned} P &= \rho RT, \\ P(T = cte) &= \rho c^2, \end{aligned} \quad (3.3)$$

avec R la constante des gaz parfaits et T la température du fluide.

Guo & Shu (2013) montrent que l'équation de Boltzmann est équivalente aux équations de Navier-Stokes sous les conditions suivantes :

- le nombre de Mach faible ; $Ma = \frac{V}{c} < 0.3$,
- le nombre de Knudsen petit ; $Kn = \frac{\lambda}{l} < 0.001$,

où V est la vitesse relative du fluide autour d'un objet et l la longueur caractéristique de l'écoulement.

Pour satisfaire les principes de conservation de masse, des moments cinétiques et d'énergie, l'opérateur de collision Ω_f doit satisfaire :

$$\int \Omega_f \Phi(\xi) d\xi = 0, \quad (3.4)$$

avec $\Phi(\xi) = (1, \xi, \xi^2/2)$. Ce processus de collision induit une relaxation de la fonction de distribution vers un équilibre thermodynamique local :

$$f^{(eq)} = \frac{\rho}{(2\pi RT)^{D/2}} \exp\left(-\frac{c^2}{2RT}\right), \quad (3.5)$$

Les opérateurs de collision les plus courants sont basés sur des formes linéarisées, telles que celle à temps de relaxation simple (SRT) de *Bhatnagar-Gross-Krook* (BGK) (Bhatnagar *et al.*, 1954) :

$$\Omega_f^{BGK} = -\frac{1}{\tau}(f - f^{(eq)}), \quad (3.6)$$

avec τ , le temps de relaxation de l'opérateur BGK. La forme de ce dernier est la plus simple en LBM. Elle s'implémente aisément et sa simplicité la rend très efficace en terme de temps calcul. Avec l'opérateur BGK, l'équation de Boltzmann devient alors :

$$\frac{\partial f(x, \xi, t)}{\partial t} + \xi \cdot \nabla f(x, \xi, t) = \frac{1}{\tau}(f(x, \xi, t) - f^{(eq)}(x, \xi, t)). \quad (3.7)$$

3. Cette formule est gravée sur la tombe de L. Boltzmann à Vienne, voir (Formule de Boltzmann.)

L'opérateur de collision BGK ne fait intervenir qu'un seul paramètre (le temps de relaxation τ) et est basé sur une approximation linéaire de la distribution de particules dans l'espace des vitesses. Cela limite l'ordre de précision de la méthode et peut entraîner des erreurs numériques, en particulier dans les simulations nécessitant une haute précision.

Il existe en LBM d'autres opérateurs de collision. Les recherches théoriques portant essentiellement sur la définition d'opérateurs de collision sont la source d'un nombre important de travaux en LBM. Ces derniers visent à la mise en place d'opérateurs de collision capables de rendre compte de comportements complexes d'un fluide (écoulements turbulents), tout en essayant (sans toujours y parvenir) à garder une relative simplicité.

Il est reconnu aujourd'hui plusieurs familles d'opérateurs de collision, chacune apportant ses spécificités. Parmi celles-ci, il est possible d'en citer deux principales. La première est celle des opérateurs *Single Relaxation Time* (SRT) dont le plus célèbre est l'opérateur BGK (Bhatnagar-Gross-Krook, du nom des trois inventeurs) (Bhatnagar *et al.*, 1954). La seconde est celle des opérateurs *Multi-Relaxation Time* (MRT) (Shan & Chen, 2007). Dans ce dernier cas, l'opérateur de collision n'est plus une simple valeur mais une matrice, dont la taille varie en fonction du schéma de résolution adopté (voir 3.2).

Une fois les formulations théoriques établies et démontrées, elles doivent être appliquées dans un contexte numérique. Ce passage réclame une discrétisation en temps et en espace des formes continues des équations pour être résolues ensuite numériquement. C'est l'objet de l'approche Boltzmann sur réseau.

3.2 L'approche Boltzmann sur réseau : le solveur

Pour être résolue numériquement, la formulation continue de l'équation de Boltzmann (Eq.(3.1)) doit être transformée en une formulation discrète, en espace et en temps.

Cette opération est réalisée, dans l'espace, en ne conservant qu'un ensemble V de vitesses ξ_i en préservant les moments des f_i , depuis l'espace continu vers l'espace discret des vitesses (Shan *et al.*, 2006 ; Nie *et al.*, 2008). Ces dernières ne sont alors connues que sur un réseau de nœuds de l'espace (ou *lattice*) séparés d'une distance constante Δx . Le temps est quant à lui discrétisé en sous-instants d'une durée Δt .

La forme générale de l'équation de Boltzmann (Eq. 3.1) dans sa version discrète devient :

$$f_i(x + c_i\Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = \frac{\Omega_i(t + \Delta t) + \Omega_i(t)}{2}\Delta t + O(\Delta t^2, \Delta x^2). \quad (3.8)$$

En utilisant le changement de variable $\bar{f}_i(x, t) = f_i(x, t) - \frac{\Delta t}{2}\Omega_i(t)$, proposé par He *et al.* (1998) et Dellar (2001), cela permet la définition d'un schéma numérique explicite de l'Eq.(3.8) :

$$\bar{f}_i(x + c_i\Delta t, t + \Delta t) - \bar{f}_i(x, t) = \Delta t\Omega_i(t). \quad (3.9)$$

Ce changement de variable impose une modification de l'opérateur de collision qui dans le cas simple BGK prend la forme :

$$\Delta t\Omega_i(t) = -\frac{\Delta t}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{(eq)}(x, t)]. \quad (3.10)$$

En posant $\Delta t = \Delta x = 1$, arrive l'algorithme dit « *Collide & Stream* » qui est un schéma numérique explicite du second ordre :

$$\bar{f}_i(x + 1, t + 1) = \bar{f}_i(x, t) - \frac{1}{\tau + 1/2} [\bar{f}_i(x, t) - f_i^{(eq)}(x, t)]. \quad (3.11)$$

Les vitesses discrètes ξ_i sont définies pour un schéma discret donné, c'est à dire dans les directions de nœuds particuliers de la grille régulière, pondérées selon :

$$c_i \longrightarrow \frac{1}{c_s}, \quad \|c_i\| \in \mathbb{N}, \quad (3.12)$$

où c_s est une constante identifiée comme la vitesse du son sur la grille, $c_s = \sqrt{RT}\Delta t/\Delta x$ (Viggen, 2014) (Fig. 3.1).

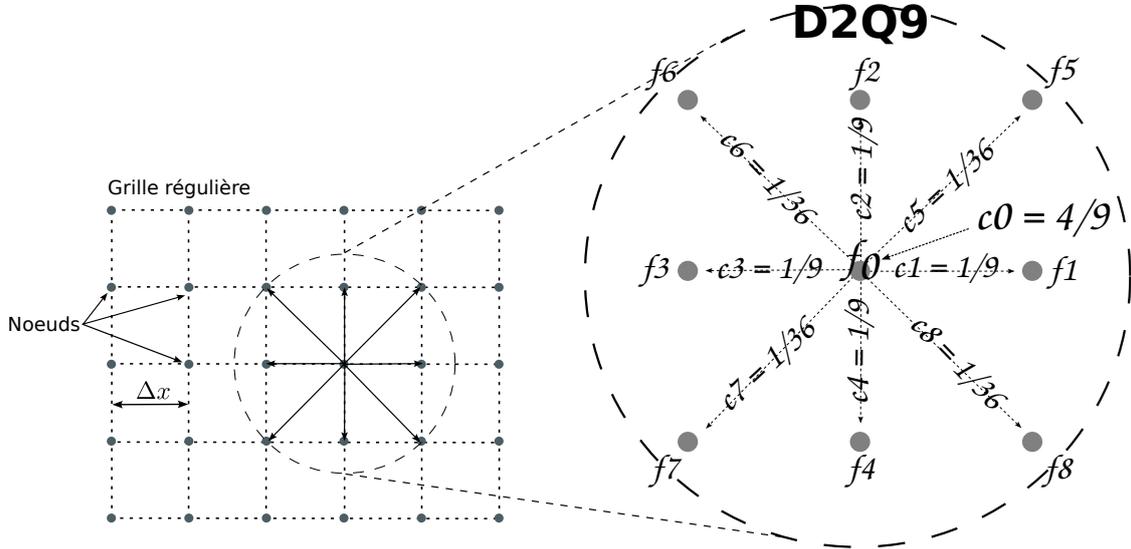


Figure 3.1 – Exemple du schéma de résolution $D2Q9$ en LBM. A gauche, la grille régulière montrant les chemins possibles des vitesses discrètes. A droite, la numérotation standard des vitesses aux nœuds, avec leurs valeurs de pondération respectives c_i et $c_s = 1/\sqrt{3}$.

La LBM possède de nombreux schéma de discrétisation tel que celui de la figure 3.1. Ils sont tous identifiés selon une nomenclature qui suit la règle suivante : $DdQq$, avec d la dimension (2 o 3) et q le nombre de vitesses f_i et leur poids c_i associés (Coreixas, 2018). Par exemple, le schéma $D2Q9$ (Fig. 3.1), décrit un schéma de résolution en 2 dimensions ($D2$) dans 9 directions ($Q9 : 8 + 1$, c'est à dire 8 périphériques et 1 au nœud de la maille considérée).

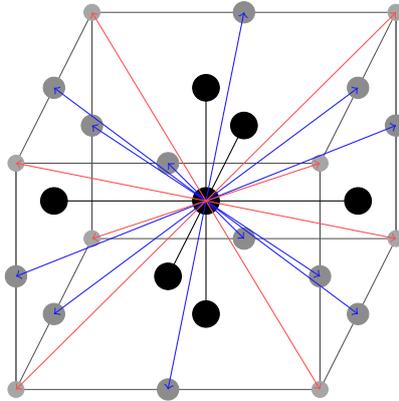


Figure 3.2 – Schéma de résolution $D3Q27$ en LBM. Les points et flèches de couleur noir, bleu et rouge, correspondent respectivement aux f_i avec des c_i de poids décroissant, allant de $2/27$ (noir), $1/54$ (bleu) et $1/216$ (rouge), avec $c_0 = 8/27$ (au centre de la maille) (Voir aussi Tab. 3.1).

La figure 3.2 présente un schémas de résolution $D3Q27$, c'est à dire en 3 dimensions avec 27 (26 + 1) directions de vitesses résolues. C'est un des schémas 3D les plus utilisés en

LBM. Le schéma $D3Q19$ est aussi souvent mis en œuvre en LBM et diffère du précédent en ne résolvant pas les 8 vitesses correspondantes aux coins du cube décrit par une maille de la grille (flèches rouge sur la figure 3.2). Ces schémas sont plus utilisés car les valeurs de pondérations c_i pour les directions des vitesses f_i correspondantes, tombent juste (Tab. 3.1).

Table 3.1 – Valeurs des coefficients pondérateurs des vitesses f_i pour les deux schémas de résolution $D3Q19$ et $D3Q27$. La première ligne $((0, 0, 0))$ donne les coefficients au nœud central de la maille et les lignes suivantes, ceux aux nœuds aux distances croissantes du nœud central.

f_i	Nombre	D3Q19	D3Q27
(0,0,0)	1	1/3	8/27
(1,0,0)	6	1/18	2/27
(1,1,0)	12	1/36	1/54
(1,1,1)	8		1/216

La démarche adoptée par la LBM a plusieurs avantages importants :

- le passage de 2D à 3D n’engendre pas de modification des formulations initiales. Seul le coût numérique change ;
- grâce à la résolution locale des schémas adoptés, les contours physiques du domaine modélisé peuvent être quasiment aussi complexes que souhaités, les limites se situant au niveau des capacités de calcul mis à disposition, par rapport à la résolution choisie (niveau de discrétisation du domaine modélisé) ;
- la méthode peut être aisément et efficacement massivement parallélisée, toujours en raison de la résolution locale des calculs.

Le code de calcul Palabos

En principe, écrire un programme informatique basé sur la méthode de Boltzmann sur réseau dans son cas le plus simple (BGK-SRT), peut se faire en quelques lignes de code avec un langage de programmation tel que Python. C’est là un des aspects intéressants de la LBM qui a suscité bon nombre de développements du cœur de la méthode. Cela devient un peu plus fastidieux lorsqu’il s’agit d’écrire des procédures flexibles, qui permettent de mettre en œuvre, par exemple, différents opérateurs de collision.

Mettre en place un modèle numérique LBM (c’est aussi le cas pour d’autres approches), c’est définir entre autres :

- un domaine de modélisation (une grille) avec ses caractéristiques de dimensions et de taille de maille ;
- les conditions aux limites du domaine ;
- les conditions initiales du modèle ;
- des paramétrisations physiques nécessaires à la simulation des processus en jeu ;
- des objets présents dans le domaine ;
- etc.

C’est aussi une fois les calculs réalisés, disposer d’outils adéquats pour l’exploitation des résultats, c’est à dire leur traitement, extraction, visualisation, exportation vers d’autres formats de données et analyse. Ces aspects ne doivent pas être négligés. Ils réclament en général un effort de développement plus important que celui à réaliser pour implémenter le cœur de la méthode de résolution elle-même.

Pour toutes ces opérations, il faut écrire du code informatique et si possible suffisamment général pour permettre la mise en place de modèles différents avec des caractéristiques adaptées. Dans un tel contexte, lorsque les développements sont intégrés de façon

homogène, on parle de « librairie de calcul ».

La méthode de Boltzmann sur réseau a fait l'objet de plusieurs librairies de ce type. Citons par exemple CLIMB (Computational methods with Intensive Multiphysics Boltzmann solver)⁴ dans la version non commerciale et ProLB pour la partie commerciale; Open Source Lattice Boltzmann Code - OpenLB - qui est projet collaboratif sous licence open-source AGPLv2 et Parallel lattice Boltzmann Solver Palabos (Latt *et al.*, 2021), qui est aussi un projet open-source inscrit sous licence AGPLv3. Ce sont là quelques noms des principales librairies disponibles qui offrent des capacités de résolution d'une large gamme de cas d'écoulements fluides différents, sur des plates-formes informatiques hétérogènes (clusters, multi-GPU).

Notre choix s'est porté sur la librairie Palabos parce qu'elle présente les caractéristiques suivantes :

- de bonnes performances en calculs parallèles ;
- une large gamme d'opérateurs de collisions différents déjà implémentés ;
- une communauté d'utilisateurs suffisante auprès de laquelle une aide peut être facilement obtenue ;
- des modifications et ajouts de nouvelles fonctionnalités possibles (open-source) ;
- aucun coût d'acquisition et disponible par téléchargement.

En terme d'exploitation des résultats, Palabos permet une sauvegarde dans plusieurs formats de fichiers standards qui peuvent être exploités par des applications tiers. Bien que les choses s'améliorent progressivement depuis, Palabos n'avait pas, au moment où nous avons fait le choix de son utilisation, une documentation précise et claire sur sa mise en œuvre, ce qui a rendu au début son apprentissage laborieux. Néanmoins, écrite en C++, la librairie Palabos suit et utilise fidèlement les paradigmes du langage, ce qui facilite au moins la lecture du code source et sa compréhension.

3.3 Cas d'applications de la démarche de Boltzmann sur réseau

Préambule

J'ai abordé la modélisation numérique du transport sédimentaire comme une suite logique, voire naturelle, à la manière de traiter cette problématique. En parallèle de mes autres activités de recherche, j'ai commencé le travail qui m'a amené dans un premier temps à faire un choix parmi différentes méthodes de modélisations numériques en domaine marin et de le porter sur la LBM.

Dans le même temps, un nouveau thème d'intérêt est apparu : les Énergie Marines Renouvelables (EMR), sur lequel un grand chantier a été lancé sous forme d'un AMI (Appel à Manifestation d'Intérêts) en 2014 par le président de la République de l'époque à Cherbourg. La raison du choix de Cherbourg pour ce lancement, était que l'AMI comportait, entre autres, un volet hydrolien (turbine marine) et que le site du Raz Blanchard (à 30 km de Cherbourg) était le premier site d'intérêt industriel au monde pour l'implantation de ce type de technologie. Notre laboratoire, le LUSAC-INTECHMER, a été naturellement sollicité pour participer aux travaux en relation avec l'hydrolien en mer.

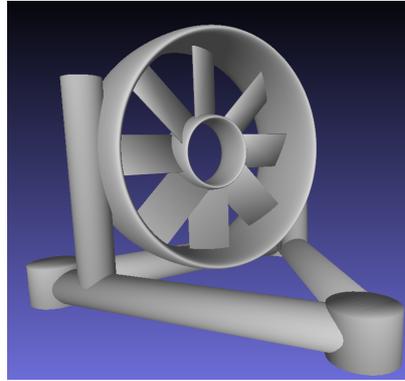
J'ai vu dans la thématique EMR une opportunité de développer les activités de modélisation LBM au sein du laboratoire. Tout en continuant à me perfectionner dans la mise

4. Anciennement LaBS, Lattice Boltzmann Solver.

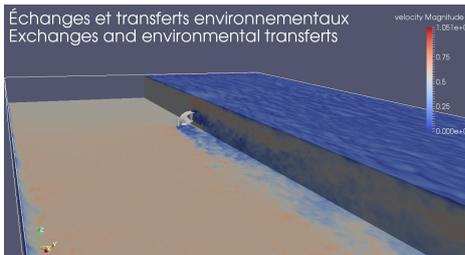
en œuvre du code de calcul de la librairie Palabos, j'ai initié des travaux de simulations de circulations fluides dans des contextes progressivement plus complexes (Fig. 3.3c et 3.3d). L'objectif était de valider le potentiel de la méthode Boltzmann sur réseau pour être appliquée à nos problématiques marines et de convaincre mes collègues de son exploitation. J'ai axé les travaux sur la modélisation d'écoulements autour d'hydroliennes en mouvement (Fig. 3.3), en me focalisant sur une forme proche de la turbine *OpenHydro*, prévue pour implantation dans le Raz Blanchard à ce moment là (Fig. 3.3a).



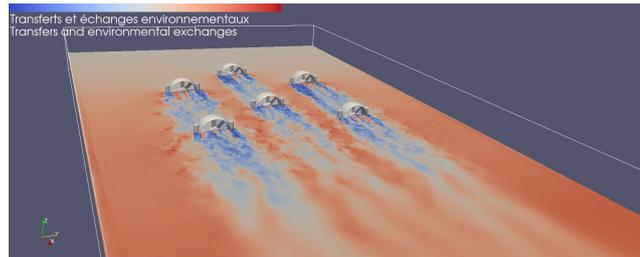
(a) Hydrolienne originale prise comme exemple dans les simulations tests.



(b) Géométrie de l'hydrolienne utilisée dans les simulations tests (c) et (d).



(c) Simulation LBM d'une hydrolienne (*OpenHydro*) dans un canal de courant.



(d) Simulation LBM de plusieurs hydroliennes (*OpenHydro*) dans un canal de courant.

Figure 3.3 – (a) Hydrolienne à axe horizontale *OpenHydro*. (b) le modèle numérique utilisé dans les simulations tests. (c) et (d) des exemples de diverses simulations visant à tester et estimer les potentialités de la méthode de Boltzmann sur réseau et à modéliser des écoulements en présence d'hydroliennes.

Dans ce cadre EMR, nous avons obtenu le financement de deux thèses. La première a été confiée à Mickael Grondeau et soutenue en 2018 sous le titre « *Modélisation des effets de sillage d'une hydrolienne avec la méthode de Boltzmann sur réseau* ». Elle était financée sous forme d'une bourse CIFRE en convention avec l'entreprise [Sirehna](#).

La seconde thèse a été l'œuvre de Philippe Mercier avec le titre « *Modélisation de la turbulence engendrée par la morphologie du fond marin : Approche locale LBM-LES* », soutenue en 2019 et financée dans le cadre du projet ANR-THYMOTE (Turbulence Hydrolienne : Modélisation, Observations, Tests en bassin). Ces deux thèses ont eu comme point commun d'utiliser la LBM comme technique de modélisation des circulations fluides. Bien qu'à cette époque, en raison de mon statut d'ingénieur d'Études, je n'ai pas pu figurer de manière officielle comme encadrant de ces travaux, j'y ai participé en co-encadrement, étant à l'origine du choix de la méthode de Boltzmann sur réseau. Dans les sections 3.3.2 et 3.3.3, je présente brièvement les travaux réalisés dans le cadre de ces deux thèses. Au paravant la section 3.3.1 fait un tour d'horizon rapide des technologies EMR.

3.3.1 Les énergies marines renouvelables

Par « Énergies Marines Renouvelables », ce sont les éoliennes en mer qui viennent en premier à l'esprit. Cette technologie est très ancienne. Les moulins à vent et à marée peuvent être considérée comme ses ancêtres. Le principe en est simple : faire tourner une hélice par la force du vent ou de l'eau, connectée à un générateur électrique. S'agissant d'éoliennes, il en existe aujourd'hui de nombreuses implantations à terre, mais ce sont les champs en mer qui suscitent le plus d'intérêts. Une première raison est qu'en mer, le vent est plus régulier qu'à terre. Une seconde raison est que les tailles des machines en mer sont plus importantes que celles à terre et produisent ainsi une plus grande quantité d'électricité. L'éolien en mer est la plus grande source de développement des EMR à l'heure actuelle car une des technologies les plus abouties en la matière. Longtemps en retard par rapport à d'autres pays européens, les côtes françaises vont voir sortir prochainement [ses premiers champs d'éoliennes en mer et de nouveaux projets sont en cours de réflexion](#)⁵. Le côté intermittent de la production reste toujours le point faible de l'éolien. Il est partiellement gommé par les techniques de gestion de parc toujours plus performantes et des tailles de machine qui permettent d'exploiter même de faibles vitesses de vent, ainsi que par la multiplicité des lieux de production. L'occupation de l'espace étant beaucoup moins contraint en mer qu'à terre, les champs en mer peuvent accueillir un nombre suffisant de machine pour venir rivaliser en quantité de production d'électricité avec des tranches de centrales atomiques classiques⁶. Néanmoins, l'installation de tels champs suscite toujours des oppositions liées à l'espace en mer retiré de l'exploitation par la pêche ou de la pollution visuelle notamment engendrée. Les impacts sur l'environnement d'installation de grands champs d'éoliennes sont aussi le sujet de nombreux travaux ([De Rock et al., 2021](#) ; [Legroux et al., 2017](#) ; [Vincent et al., 2017](#)) qui étudient les nuisances engendrées par les pâles et leur bruit, mais aussi les modifications des courants et du transport des sédiments ou encore la dilution dans l'eau d'éléments polluants présents sur les pieds des machines.

Il existe néanmoins d'autres technologies qui permettent d'extraire de l'énergie du milieu marin ([Dincer et al., 2018](#)).

L'énergie marémotrice utilise les variations du niveau marin liées à la marée. Le principe est que dans des zones telles que des anses ou des baies, soumises aux flux et reflux de la marée, l'entrée en soit bouchée avec un barrage. Des sections équipées de turbines génératrices d'électricité, sont aménagées pour laisser un passage à l'eau. Cette technique fonctionne dans les deux sens et l'aspect prédictible des marées fait que la production électrique est connue sur le long terme. L'usine de la [Rance](#), en service depuis 1966, est sur le territoire français le plus bel exemple d'usine marémotrice. Le fait qu'il existe peu d'endroits propices à l'installation de telles infrastructures sur les côtes, limite son utilisation. S'ajoute à cela que l'impact sur les conditions environnementales du lieu d'implantation n'est pas négligeable ([Caude et al., 2017](#) ; [Bonnot-Courtois et al., 2002](#)).

L'énergie houlomotrice est extraite des mouvements horizontaux, verticaux et du déferlement des vagues et de la houle. De nombreux concepts et prototypes ont vu le jour pour produire de l'électricité des mouvements oscillants, mais aucune technologie n'a fait l'unanimité jusqu'à présent. Le « [Pelamis](#) » de la société Ocean Power Delivery est un des prototypes les plus connus pour tirer de l'énergie de la houle. D'autres technologies existent ([Folley, 2016](#)) mais sont encore le plus souvent à l'état de prototype. Potentiellement, cette énergie serait exploitable sur de nombreux sites soumis régulièrement à l'arrivée de houles. A l'instar du vent, la production est soumise aux aléas météorologiques et donc difficile à gérer en terme de production électrique.

5. Voir <https://www.eoliennesenmer.fr/presentation>

6. Le champ de « [Centre Manche 2](#) » devrait produire 1 GW en 2031.

L'énergie thermique des mers (ETM) ou Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) exploite les calories de l'eau des océans. Le principe est d'utiliser une eau de surface d'une température supérieure ou égale à 25°C pour vaporiser un liquide à faible point d'ébullition, tel que l'ammoniac, pour entraîner une turbine et produire de l'électricité. L'eau profonde de l'océan est quant à elle utilisée pour condenser la vapeur. Sur son principe, cette ressource serait quasi inépuisable, mais son rendement est relativement faible par rapport aux coûts d'investissement des structures nécessaires. Le pompage de l'eau est aussi un poste consommateur d'énergie qui vient en diminution du rendement global. Plusieurs lieux d'implantation de tels systèmes sont possibles : à partir de la côte avec la mise en place de constructions dédiées depuis lesquelles les pompes sont réalisés ou directement sur place avec des systèmes flottants (Jalihai *et al.*, 2021). L'impact environnemental n'est pas neutre. Le déploiement de cette technologie à grande échelle engendrerait une diminution de la température des eaux de surface et une augmentation de celle de fond dans les lieux de déploiement. Les conséquences de la modification de la circulation des eaux profondes ou de fonds sont difficiles à estimer, mais il est certain qu'une variation ne serait-ce que de quelques millidegrés Celsius aurait un impact non négligeable sur la densité des eaux et donc leur mouvement.

L'énergie osmotique utilise le principe de la différence de salinité entre deux eaux, par exemple, entre une eau de mer et une eau douce. Deux réservoirs fermés remplis pour l'un d'eau douce et pour l'autre d'eau de mer, sont séparés par une membrane semi-perméable qui bloque les ions de grosse taille (Na^+ et Cl^-) et laisse passer les molécules d'eau plus petites H_2O . L'eau la moins salée va chercher à aller vers l'eau la plus salée à travers la membrane. La surpression générée permet d'actionner une turbine productrice d'électricité. Cette technologie a comme avantages d'avoir un très faible impact écologique et d'être prévisible en terme de production (pas de notion d'intermittence de production). Le rendement est encore faible par m^2 de membrane et les coûts de nettoyage des filtres et de la membrane sont encore importants au regard du rendement obtenu. Néanmoins, cette technique a un gros potentiel et suscite de l'intérêt. Les lieux d'implantation sont relativement nombreux à travers la planète, puisqu'il s'agit des embouchures de fleuves ou rivières, ce qui offre la possibilité d'un déploiement à grande échelle.

Enfin, j'en termine avec ce tour d'horizon des EMR, par l'énergie hydrolienne issue des courants de marée, car c'est dans ce contexte que se situent les travaux présentés à la suite. Le principe en est tout aussi simple de celui d'une éolienne, mais tout se passe sous l'eau. L'utilisation de l'écoulement de l'eau pour faire tourner une roue ou une hélice n'est pas nouvelle. Les moulins à eau à roue verticale ou horizontale d'autrefois peuvent être considérés comme des ancêtres (Fig. 3.4).



(a) (<https://cdt47.media.tourinsoft.eu>)



(b) (<https://patrimages.maregion-sud.fr/articlesmoulin>)

Figure 3.4 – (a) moulin à roue verticale. (b) moulin à roue horizontale.

Des développements récents relancent la filière et concrétisent le regain d'intérêts suscité par la nécessité d'une production électrique diversifiée, écologique et décarbonée⁷. La confusion peut être faite avec les usines marémotrices, qui tirent elles-aussi l'énergie de la marée. Mais dans ce dernier cas, c'est l'énergie potentielle de la marée qui est extraite. Avec l'hydrolien en mer, c'est l'énergie cinétique des courants engendrés par la marée, qui est utilisée par des machines placées « librement » dans un espace ouvert. La ressource est quasi inépuisable et la production complètement prévisible. Du point de vue technique, une hydrolienne est beaucoup plus petite qu'une éolienne pour dégager une même puissance. De nombreux concepts différents ont été proposés depuis quelques années et il serait trop long d'en faire état ici, mais il est possible de dégager deux grandes familles de par leur principe général : les machines à axe vertical et celles à axe horizontal (Fig.3.5). Les sites d'intérêt dans le monde pour la technologie hydrolienne sont ceux dans lesquels règnent des vitesses moyennes de courants de marée relativement importantes ($> 2 \text{ m.s}^{-1}$)(Fig. 3.6). De ce fait seules les zones côtières qui possèdent des marnages importants sont actuellement susceptibles d'accueillir des hydroliennes (Fig. 3.6a). Le plus grand marnage observé dans le monde se trouve dans la baie de Fundy, au Canada avec 15 à 16 mètres au maximum. En France, le plus grand marnage est dans la baie du Mont St Michel, où il peut atteindre jusqu'à 13 mètres⁸(Fig. 3.6b).

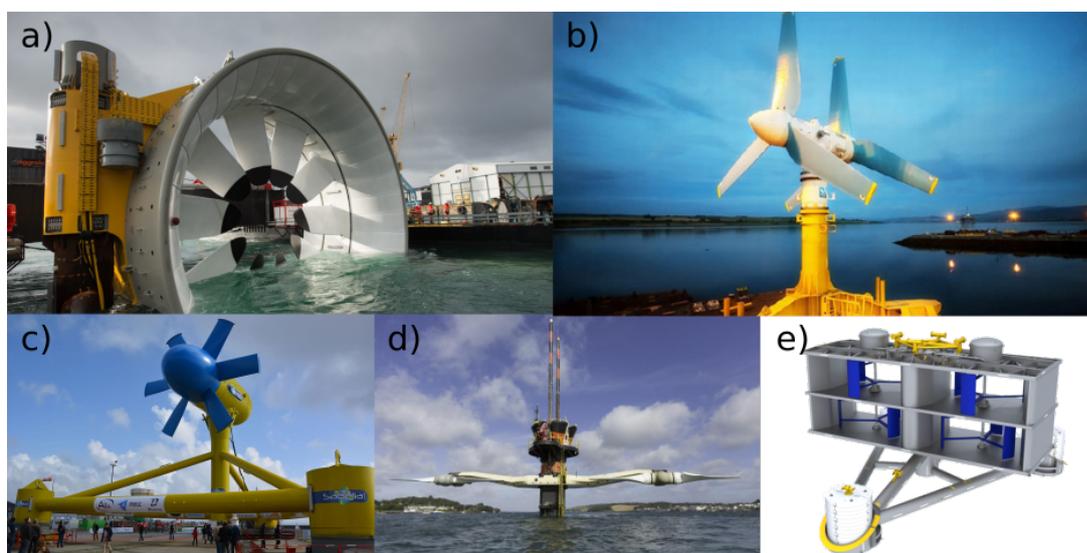
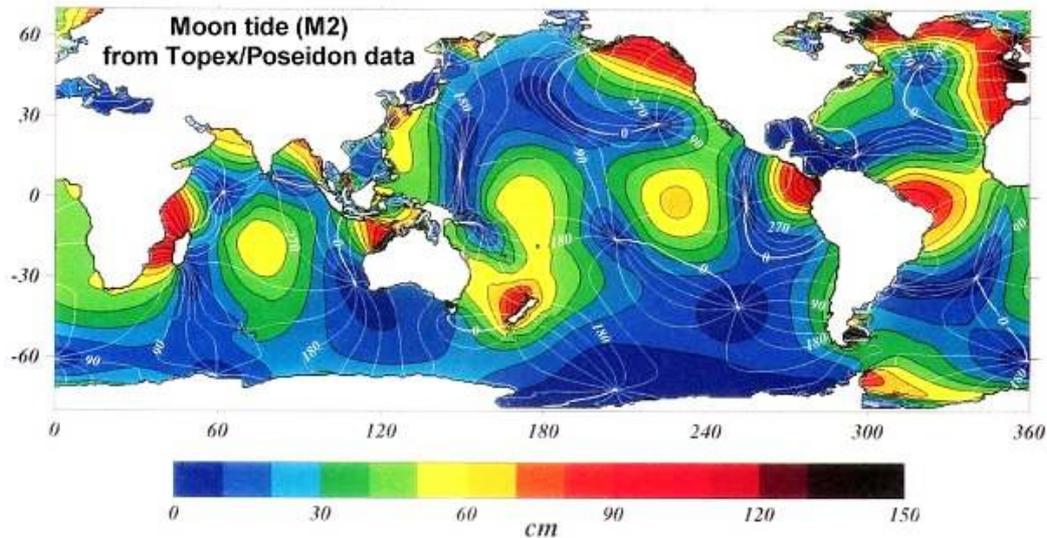


Figure 3.5 – Exemples de diverses technologies d'hydroliennes déployées et testées sur des sites d'essais en mer. a), b), c), d) : turbines à axe horizontal (OpenHydro, SIMEC, Sabella, Siemens). e) : turbine à axe vertical (HydroQuest).

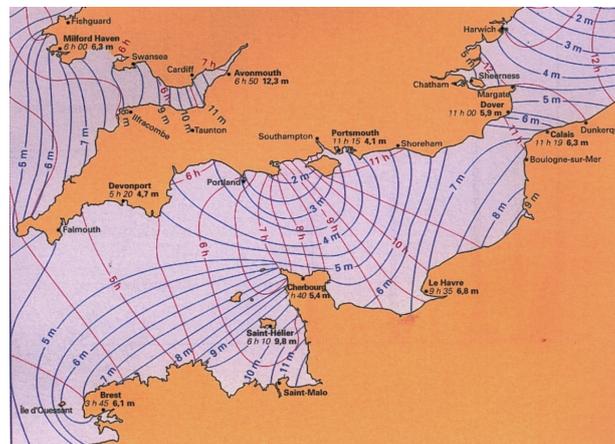
Les côtes françaises Atlantique et Manche sont soumises à des régimes de marées importants (Fig. 3.6). Le Raz Blanchard est le lieu où se trouvent les vitesses de courant de marée les plus rapides d'Europe et les troisièmes au monde. Du fait de la proximité géographique de la centrale électrique de Flamanville (quelques kilomètres au sud du Raz Blanchard), ce lieu a été le premier d'intérêt industriel au monde par la présence de lignes haute-tension qui permet de diminuer les coûts d'investissements nécessaires à l'exploitation d'une ferme d'hydroliennes. A l'heure actuelle, il n'y a encore aucune ferme de turbines en exploitation dans le monde, seuls quelques sites de tests sont ou ont été équipés (Orcades en Écosse, Paimpol-Bréhat en France).

7. Voir par exemple le projet de la société [Hydroquest](#).

8. C'est aussi considéré comme le plus grand marnage d'Europe.



(a) Grâce au satellite TOPEX/Poseidon de la NASA qui mesure la hauteur de la surface des océans, les oscillations de cette dernière dues à l'attraction gravitationnelle des astres et étoiles qui entourent la Terre, peuvent être mesurées et cartographiées (Nasa).



(b) Iso-valeurs de marnages (lignes bleu) en mètres et des heures de marées (lignes rouge) référencées au port de Brest. Les hauteurs de marnage sont les plus importantes côté français de la Manche, en baie du Mont-St-Michel. Le resserrement des lignes de marnage au niveau du Raz Blanchard indique un fort gradient de hauteur d'eau, qui engendre régulièrement des vitesses de courants de l'ordre de 4 à $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Figure 3.6 – (a) l'intensité des variations de hauteur d'eau sur les océans de la planète dues à l'onde M2 (onde semi-diurne de la Lune). (b) les variations de hauteur d'eau et la progression en heure de l'onde marée en Manche.

Le développement de l'hydrolien en mer a connu un grand intérêt au moment du lancement de l'AMI-EMR de 2014. Le Raz Blanchard a été, à ce moment là, un des principaux site sur lequel se sont concentrées les attentions et les travaux. L'installation de tels équipements à grande l'échelle (entre plusieurs dizaines, voir centaines de machines), n'avait encore jamais été envisagé. Qu'il s'agisse des aspects industriels (construction des machines) ou des aspects environnementaux (impacts), pratiquement tout était à découvrir.

Pour modéliser des écoulements naturels (donc turbulents), il faut en toute rigueur mettre en œuvre une approche instationnaire. La méthode de Boltzmann sur réseau est une de ces méthodes (Marie *et al.*, 2009). Elle va donc être adaptée pour la simulation des perturbations turbulentes engendrées dans le sillage d'un obstacle, telle qu'une turbine (Wood & Deiterding, 2015) dans une veine d'eau comme l'a montré Grondeau (2018),

ainsi que pour la génération de structures turbulentes à partir d'obstacles ou de fortes rugosités sur le fond (Mercier, 2019).

3.3.2 La turbulence

Les écoulements naturels sont turbulents par essence, parce que ce sont tous des systèmes ouverts dissipatifs (au sens de la thermodynamique). C'est l'échelle d'observation qui va faire la distinction entre les approches théoriques et pratiques d'études des écoulements en environnement.

Le courant d'un fleuve ou d'une rivière lorsqu'il est observé de loin (à quelques kilomètres de distance verticale, par exemple), paraît tout à fait constant et homogène, proche de la linéarité. Si l'observateur se rapproche, il va voir apparaître des premières discontinuités dans l'écoulement générale (des tourbillons). En se rapprochant encore, d'autres discontinuités (ou structures turbulentes) plus petites vont apparaître au sein des précédentes, etc.. Les tourbillons de grandes tailles donnent de l'énergie à ceux plus petits, successivement en cascade, jusqu'à la dissipation finale de l'énergie sous forme de chaleur à l'échelle moléculaire (échelle visqueuse). C'est la célèbre cascade de Kolmogorov (Kolmogorov, 1941c,a,b ; Tikhomirov, 1991) (Fig. 3.7).

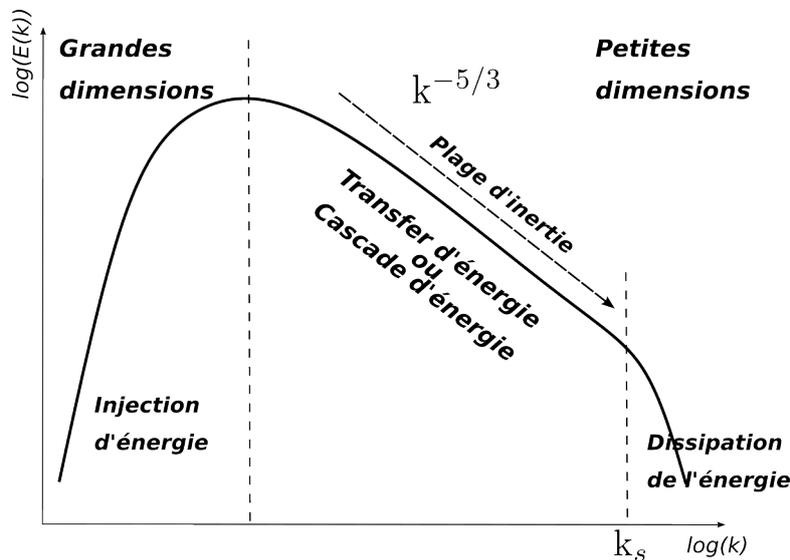


Figure 3.7 – Cascade d'énergie de Kolmogorov. L'énergie cinétique des structures tourbillonnaires décroît à mesure que leur taille diminue avec une pente exponentielle de $-5/3$. k_s (« Kolmogorov scale ») représente l'échelle de dissipation de Kolmogorov en dessous de laquelle les forces visqueuses sont dominantes et où l'énergie se dissipe sous forme de chaleur.

En principe, la méthode Boltzmann sur réseau permet d'avoir accès à des échelles aussi fines que voulu. Pour modéliser la turbulence, c'est la taille de la maille choisie qui va servir de coupure (ou de limite) aux tailles des structures modélisées. Néanmoins, accéder à des hauts nombres de Reynolds ($> 10\,000$) tout en ayant accès à des résolutions fines de la turbulence peut s'avérer coûteux en temps calcul, voir prohibitif.

L'intérêt de modéliser une hydrolienne et son sillage, est d'obtenir des informations aussi précises que possible de différentes natures, telles que :

- les efforts mécaniques sur la machine (les pales, le pied, etc.) ;
- le niveau d'énergie extrait de l'écoulement ;
- les caractéristiques du sillage derrière la machine ;
- etc.

Le principale intérêt du travail de Grondeau (2018) a été de modéliser le sillage proche derrière une turbine, entre 1D et 15D, D étant le diamètre de l'hélice de l'hydrolienne.

Une fois les caractéristiques du sillage en aval d’une turbine connues, ce travail peut être exploité pour définir le placement optimal des machines les unes par rapports aux autres à l’intérieur d’un champs, afin d’extraire un maximum d’énergie de l’écoulement général amont.

Pour retransmettre correctement le sillage généré par la présence d’une turbine dans l’eau, il faut dissocier deux aspects de la machine :

- les parties fixes de la turbine (pieds, embase, tuyère, etc.) ;
- les parties mobiles (pales).

Modélisation d’un objet immergé

La librairie LBM Palabos offre deux manières différentes pour placer des objets à l’intérieur du domaine de simulation fluide :

- par identification directe au moment de l’initialisation de la grille du domaine, des cellules sur lesquelles aucun calcul de collision ne sera fait (cellules non fluides) ;
- par l’utilisation d’un modèle maillé de l’objet à insérer, construit par un outil logiciel de maillage tiers (Blender, MeshLab, etc.) et convertit ensuite pour être placé dans le domaine de modélisation.

Une fois l’objet placé à l’intérieur du domaine de modélisation, il est nécessaire de définir les conditions d’adhérence au niveau des frontières de l’objet. En LBM, la condition d’adhérence de type *bounce-back* est possible pour n’importe quelle géométrie. Le *bounce-back* et ces variantes (*half-way bounce-back*, *full-way bounce-back*) sont très efficace pour des objets/structure immobiles, avec une facilité d’implémentation et un coût en calcul faible.

La figure 3.8 contient trois graphiques correspondant aux variations des valeurs du nombre de Strouhal, du coefficient de portance C_L et du coefficient de traînée C_D , pour différentes résolutions de mailles d’un cylindre (de 25 à 200 mailles). Les résultats sont basés sur un domaine LBM dont les caractéristiques sont présentées sur la figure 3.9a. La figure 3.9b est un agrandissement sur le cylindre immergé illustrant les premiers décrochements de l’allée de von Kármán pour un nombre de Reynolds égale à 100. Les conditions d’adhérence sur le cylindre sont de type *full-way bounce-back*. À partir d’une résolution de 80 mailles sur le cylindre, la LBM est en accord avec les résultats de la littérature. Cette condition est donc valable pour les parties fixes de l’hydrolienne.

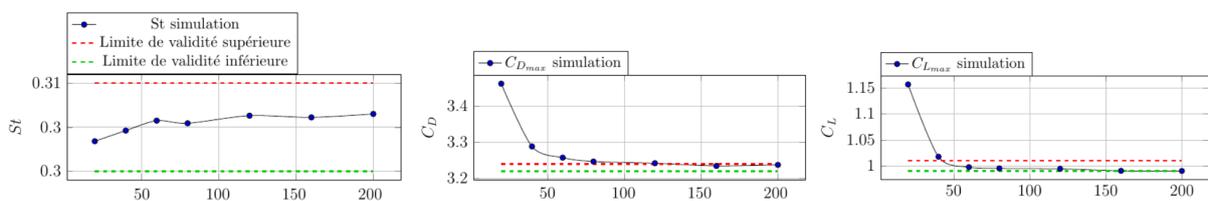
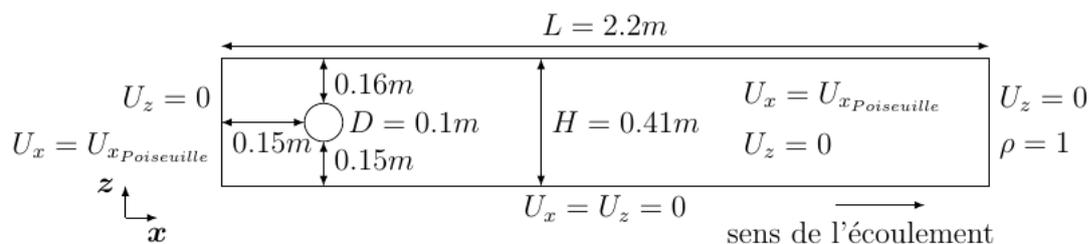
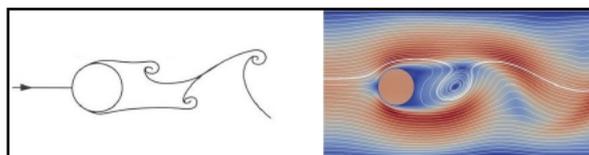


Figure 3.8 – Validation de la modélisation LBM par comparaison du nombre de Strouhal (St), du coefficient de portance (C_L) et du coefficient de traînée (C_D) avec leur plage de validité respective (Schäfer et al., 1996). D’après Grondeau (2018)



(a) Dimension du domaine modélisé en LBM basé sur le cas de référence de Schäfer et al. (1996).



(b) Allée de von Kármán derrière un cylindre immergé modélisé en LBM sur les bases du domaine (a) ($Re = 100$).

Figure 3.9 – Modélisation d’une allée de von Kármán en LBM. (a) dimension du domaine LBM modélisé. (b) zoom au niveau du premier décrochement juste derrière le cylindre. D’après Grondeau (2018).

La condition *bounce-back* n’est pas valable dans le cas d’un objet en mouvement dans un fluide, elle ne permet la définition que d’une seule condition d’adhérence fixe. Pour les parties mobiles de l’hydrolienne, c’est la technique *Immersed Boundary Method* (IBM) (Peskin, 1977) qui a été utilisée. Elle permet de définir des conditions spécifiques d’adhérences aux frontières des objets. L’IBM est valable pour des objets mobiles et aussi fixes, mais elle est plus complexe à mettre en place et a un coût en calcul plus important que la condition *bounce-back*. L’IBM n’est donc appliquée que sur les parties mobiles.

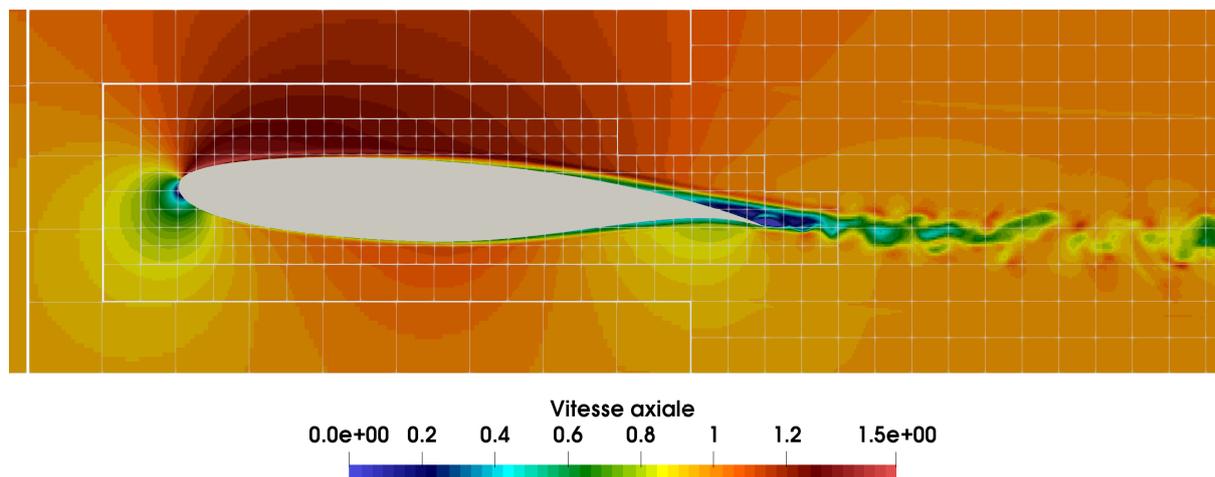


Figure 3.10 – Modélisation avec Palabos du champ de vitesse axiale adimensionnée autour d’un profil d’aile avec une incidence de 4 degrés (Nakayama, 1985). D’après Grondeau (2018)

Il existe différentes façons d’implémenter l’IBM. Celle présente initialement dans la librairie Palabos ne permettait pas une bonne représentation des vitesses proches des parois de pale. Elle a donc été adaptée (Grondeau, 2018) à l’issue d’une série de comparaisons avec à la fois des cas tests (ERCOFTAC (Nakayama, 1985)) de la littérature (Fig. 3.10) et d’autres codes de calcul (ProLB). Des différences sensibles sont encore présentes très localement sur les pales, notamment au niveau du bord de fuite de l’aile, où la taille de

la maille ne représente pas bien la finesse de l'aile à cet endroit. Néanmoins, les écoulements amont et aval ainsi que les efforts sont proches des valeurs de références dès que l'on s'éloigne des pales. Avec les modifications apportées, le sillage généré par les parties tournantes de l'hydrolienne est considéré comme bien représentatif.

Une fois définies les conditions numériques des écoulements au niveau de la machine, il faut établir celles de l'écoulement général, avant de finalement s'intéresser au sillage aval.

Modélisation de la turbulence amont

Pour que la modélisation du sillage derrière une hydrolienne soit la plus proche possible des conditions réelles dans lesquelles doivent être placées ces machines, il faut générer en entrée du domaine modélisé un courant aillant un certain niveau de turbulence.

La technique *Divergence-Free Synthetic Eddy Method* (DFSEM) (Jarrin, 2008) a été implémentée pour permettre de générer un champ de vitesse turbulent dont les caractéristiques sont choisies en fonction des besoins. Le principe est d'ajouter aux vitesses moyennes du courant (\bar{U}) en entrée, des fluctuations u' qui répondent à l'équation :

$$u'(x) = \sqrt{\frac{1}{N}} \sum_{k=1}^N \frac{q_L(|r_k|)}{|r_k|^3} r_k \times \alpha_k, \quad (3.13)$$

avec $q_L(a) = \sqrt{\frac{16V_B}{15\pi L^3}} \sin(\pi a)^2 a$ la fonction de forme qui permet de définir les caractéristiques de chaque tourbillon :

- α_k , l'intensité ;
- L , le diamètre ;
- $r_k = \frac{x-x_k}{L}$.

V_B est le volume du domaine DFSEM.

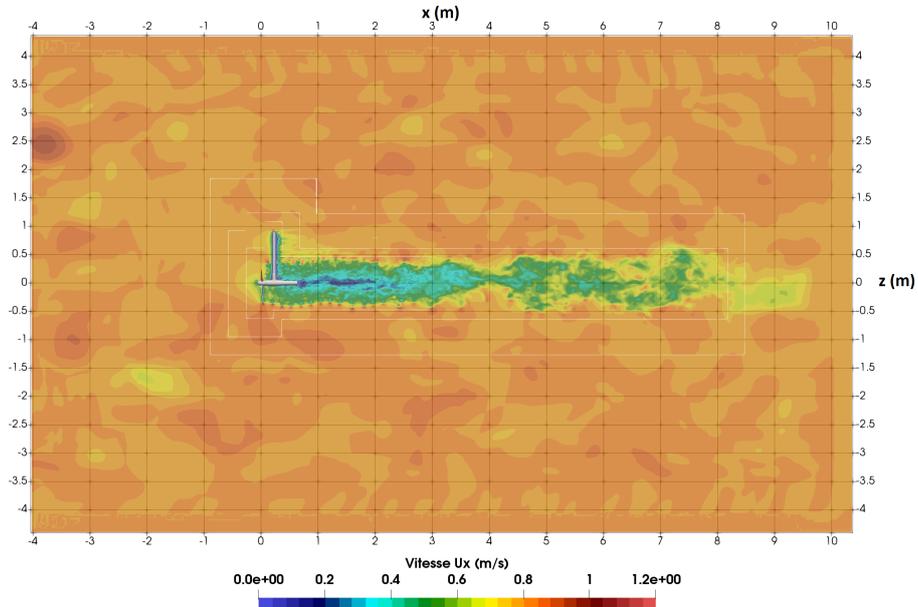


Figure 3.11 – Simulation d'une hydrolienne avec la génération d'un champ de vitesses amont turbulent (DFSEM) en LBM. D'après Grondeau (2018).

La figure 3.11 est un exemple de domaine LBM modélisant une hydrolienne dans une veine d'eau. Le champ de vitesse en entrée du domaine (face gauche de la grille de simulation ($X = -4m$)) est généré avec l'ajout de structures turbulentes via l'approche DFSEM. Le taux de turbulence qui est dans ce cas de 3%, est défini par l'expression :

$$I = 100 \sqrt{\frac{0.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})}{(\overline{U_x^2} + \overline{U_y^2})}}. \quad (3.14)$$

Sur l'exemple de la figure 3.11, le niveau de turbulence d'entrée est assez bien conservé dans la direction de l'écoulement (de gauche vers la droite). Les plus grosses structures tourbillonnaires sont les plus pérennes alors que les plus petites disparaissent plus rapidement. Le choix de la taille de la maille du domaine est prépondérant pour la propagation et la conservation des structures turbulentes générées. Ce choix doit aussi tenir compte des coûts de calcul. La taille de maille va donc jouer un rôle de filtre passe-bande, permettant la conservation des structures de taille supérieure à la longueur de coupure.

Le sillage de l'hydrolienne

Les développements successifs ont permis de mettre en place un contexte numérique LBM-Palabos favorable à l'étude fine du sillage proche derrière une hydrolienne.

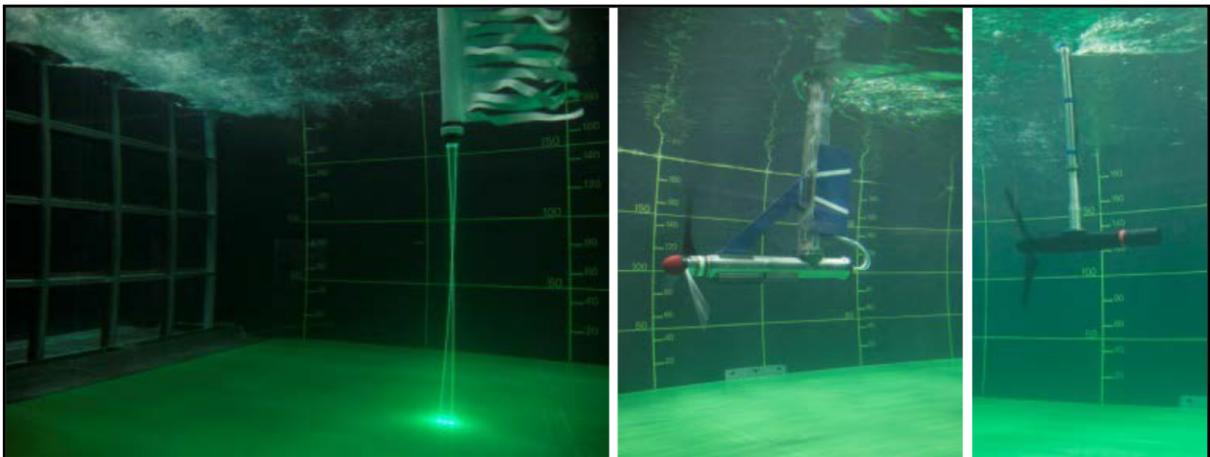


Figure 3.12 – *Essais et mesures en bassin (Ifremer, Boulogne), d'une hydrolienne tri-pales (Mycek et al., 2014). D'après Grondeau (2018).*

La simulation d'une hydrolienne et de son sillage basée sur ces travaux préliminaires a donc pu être mise en place. Une hydrolienne tri-pales (Fig. 3.13) a été prise comme modèle pour être placée dans le domaine de simulation LBM (Fig. 3.14). Ses caractéristiques de forme, correspondent à celle de turbines utilisées dans des essais en bassin (Mycek et al., 2014). Ces travaux ont permis de confronter les résultats numériques avec les mesures (Fig. 3.12).

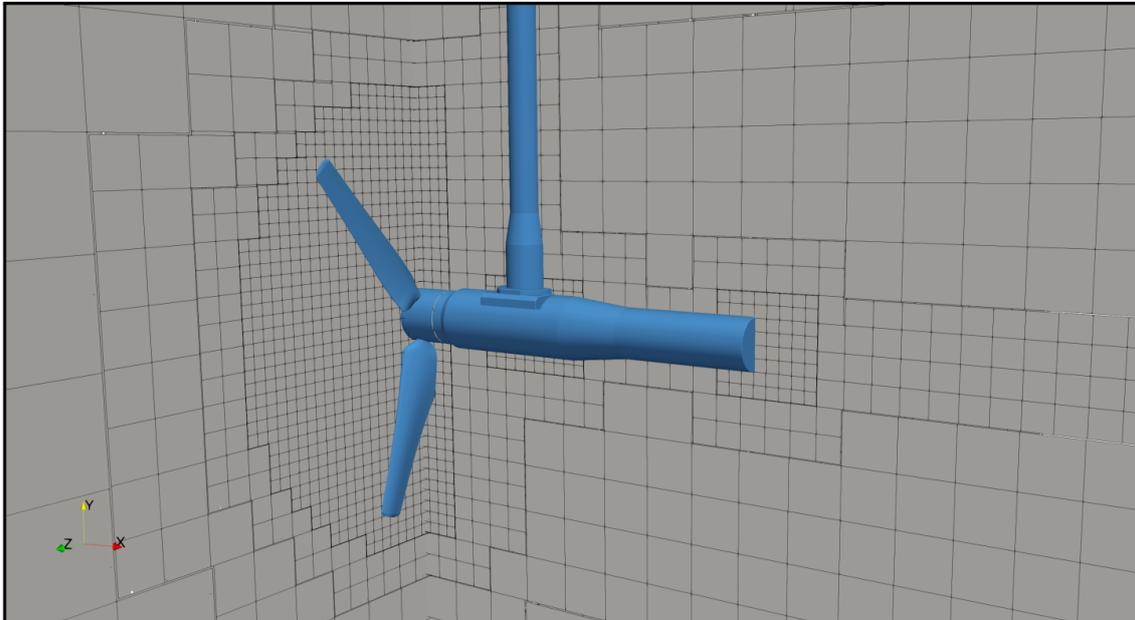


Figure 3.13 – Modèle d’hydrolienne tri-pales placée dans le domaine de simulation LBM. Les grilles de raffinement sont représentées. D’après [Grondeau \(2018\)](#).

La figure 3.13 représente le modèle d’hydrolienne tri-pales reconstitué numériquement et placé dans le domaine de modélisation LBM. Les limites des mailles sont aussi représentées pour illustrer les niveaux et les lieux de raffinements dans le domaine autour de la machine et de ses différentes parties (pales, mat, corps).

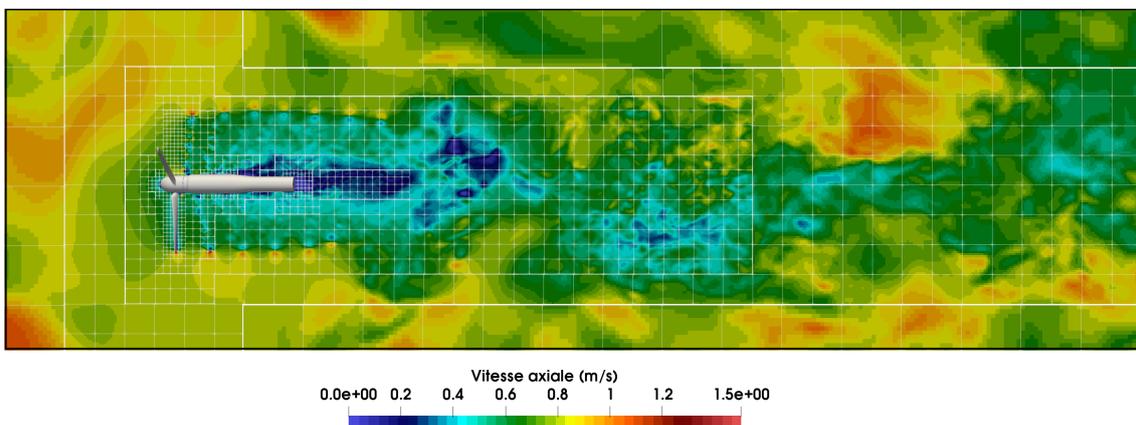


Figure 3.14 – Champ des vitesses instantanées et maillage autour de l’hydrolienne tri-pales ([Mycek et al., 2014](#)), pour un taux de turbulence $I = 12.5\%$. D’après [Grondeau \(2018\)](#).

Trois niveaux de turbulence d’entrée générés par DFSEM ont été modélisés, respectivement 3%, 8% et 12,5% (Fig. 3.15), pour étudier l’évolution du sillage derrière la machine⁹. Le tableau 3.2 résume les différentes valeurs de la DFSEM qui ont été testées pour les trois cas d’intensité turbulente.

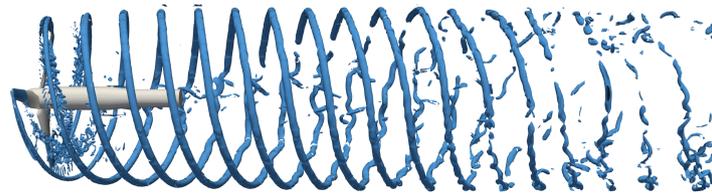
9. Le cas sans turbulence, $I = 0\%$, a aussi été réalisé et n’est pas présenté ici.

Table 3.2 – Les différentes valeurs des paramètres caractéristiques de la DFSEM, testées pour trois niveaux de turbulence $I = [3\%, 8\%, 12.5\%]$.

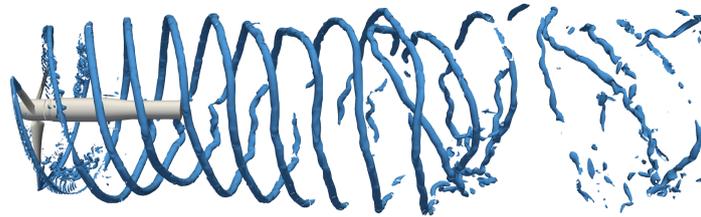
	3%	8%	12.5%
Vitesse de convection (m.s^{-1})	0.8	0.8	0.8
			0.25
Taille des tourbillons L (m)	1.0	1.2	0.66
			1.2
Densité de tourbillons (d_k)	1	1	1
Tenseur de Reynolds ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$)	0.0008928	0.005184	0.01638
			0.04
	0.035	0.035	0.035
Résolution de maillage (m)	0.011	0.011	0.025
			0.011

La figure 3.15 illustre le comportement des tourbillons de bout de pale générés par la rotation de l'hélice en fonction des niveaux de turbulence d'entrée. Ces tourbillons sont mis en évidence au travers de l'utilisation du critère λ_2 . Ce dernier a été développé par [Jeong & Hussain \(1995\)](#) pour définir le centre des structures turbulentes présentes dans un écoulement fluide.

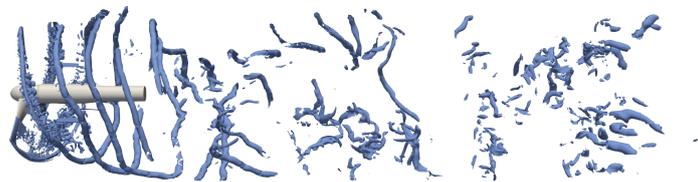
Il est clair (Fig. 3.15) que plus le niveau de turbulence ambiant est élevé, moins grande est la distance sur laquelle les tourbillons de bout de pale gardent leur cohérence. Les différentes simulations mises en place ont permis de définir qu'à partir d'une distance de 2D à 3D derrière l'hélice de la turbine, les sillages modélisés sont en accord avec les essais en canal (pour $I = [3\%, 8\%, 12.5\%]$). Ainsi à partir d'une distance comprise entre 8D et 10D selon les taux de turbulence ambiante, les caractéristiques de l'écoulement en amont sont retrouvées en aval de la turbine.



(a) $I = 3\%$.



(b) $I = 8\%$.



(c) $I = 12.5\%$.

Figure 3.15 – Isocontour de critère λ_2 des tourbillons de bout de pale de l’hydrolienne (Mycek et al., 2014) pour différentes intensités turbulentes d’entrée. D’après Grondeau (2018).

La conservation des niveaux de turbulence d’entrée dans le domaine de simulation s’est avérée être sensible à la résolution de la maille, en particulier pour $I = 12.5\%$. Suite à ces constatations, des analyses spectrales et spatiales du sillage derrière l’hydrolienne, notamment celui généré par les bouts de pale, ont été conduites pour déterminer les paramètres du modèle DFSEM-LBM-LES donnant des résultats les plus proches de la littérature. La résolution du maillage alors retenue est de $\Delta x = 1.11 \times 10^{-2}m$ pour les trois intensités turbulentes.

Les informations qui ont été obtenues grâce à la mise en place des modèles DFSEM-LBM-LES sont fondamentales pour définir les meilleures conditions de mise en place d’un ensemble de turbines. Ces simulations donnent à la fois des indications précieuses et des outils pour construire d’autres types de modèles mettant en jeu des structures immergées de nature différente (voir Chap.4).

3.3.3 La turbulence du fond

Dans des lieux tels que le Raz Blanchard, la masse d’eau est turbulente. La figure 3.16 contient une image prise dans le Raz Blanchard par temps calme. Il est possible d’y distinguer les irisations de surface caractéristiques de tourbillons venant dissiper leur énergie à la surface de l’eau. Certains de ces vortex peuvent être de grande taille, jusqu’à plusieurs dizaines de mètres de longueur caractéristique.

En absence de tout obstacle dans la masse d’eau, cette turbulence prend son origine au niveau du fond. La figure 3.17 est une image extraite d’une séquence vidéo prise par une caméra remorquée verticalement derrière un bateau. Sur cette vue rasante du fond, prise au profit d’un moment où la caméra s’est couchée sur un côté, il est possible de

distinguer des irrégularités du fond, principalement dues à la présence de blocs rocheux de tailles métriques. Il est évident que de telles morphologies de fond sont à l'origine de turbulences d'autant plus importantes et énergétiques que les vitesses des courants sont élevées.



Figure 3.16 – Dans le Raz Blanchard, par temps calme, la surface de l'eau est marquée par la présence de structures turbulentes de grandes tailles (jusqu'à ≈ 20 m).

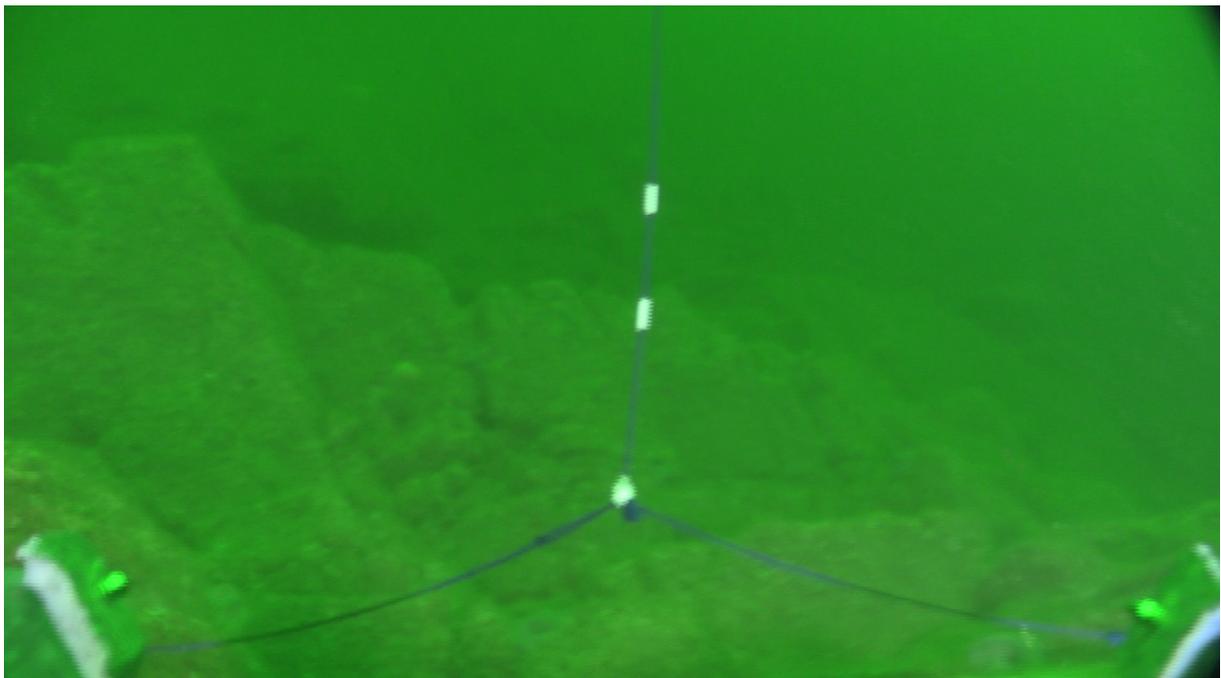


Figure 3.17 – Prise de vue rasante du fond du Raz Blanchard acquise par vidéo sous-marine (ANR HYD2M).

Dans le cadre des EMR dans un lieu comme le Raz Blanchard, il est essentiel de connaître les caractéristiques de la turbulence du milieu avant la pose de turbines de production électrique. Comme cela a été étudié dans la section 3.3.2, le niveau turbulent est un aspect fondamental à connaître, pour définir le placement optimal des turbines entre elles. C’est une contrainte forte et structurante qui va déterminer le nombre de turbines possibles et leur placement relatif pour converger vers le niveau de production électrique maximale.

L’ANR « **T**urbulence **H**ydrolienne : **M**odélisation **O**bservations **T**Ests en bassin » (THYMOTE) a eu comme objectif d’améliorer les connaissances des processus turbulents des sites hydroliens pour aider les entreprises intéressées par l’installation de turbines, à prévoir la fatigue, le rendement et le positionnement des machines.

La méthode de Boltzmann sur réseau a été choisie pour réaliser les simulations numériques. L’objectif de la thèse de M. Philippe Mercier (Mercier, 2019) a été de réaliser des simulations numériques des processus de formations de tourbillons à partir de rugosités présentes sur le fond marin, représentant de manière idéalisée des blocs rocheux.

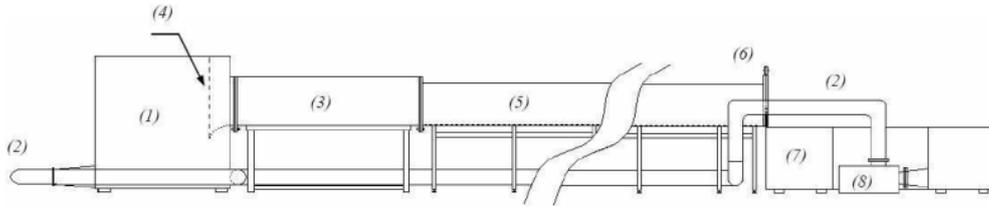
Une première série de travaux a permis de valider la LBM pour le traitement de la problématique visée, via la confrontation des résultats des simulations à des cas de référence de la littérature et des expérimentations en canal. L’étude de la génération des structures turbulentes dans des cas plus complexes et à partir de conditions proches de la réalité des sites hydroliens, a été menée dans un second temps.

La LBM étant relativement nouvelle dans les problématiques environnementales et à l’instar d’autres méthodes du même type, il est nécessaire de démontrer qu’il est possible de reproduire avec la LBM des résultats issus d’essais expérimentaux, avant de s’attaquer à l’objectif cible.

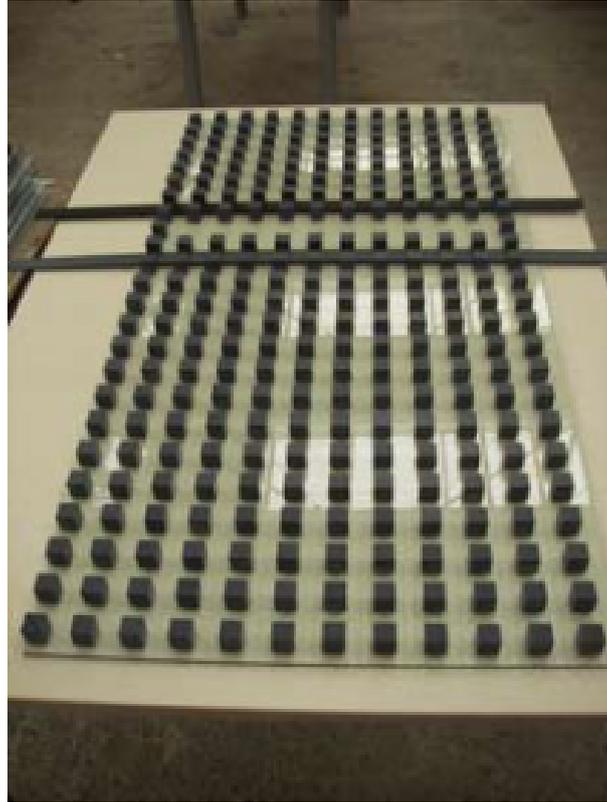
Comme expliqué dans la section 3.2, le point principal dans la méthode de Boltzmann sur réseau est de choisir l’opérateur de collision qui va être le mieux adapté aux conditions de simulations souhaitées. Dans le cas présent, l’opérateur choisi est le BGK régularisé intégrant un modèle de turbulence sous maille de type Smagorinsky, ainsi qu’une force volumique basée sur le modèle de Guo *et al.* (2002).

Comparaison avec un cas expérimental en canal

Florens (2010) a réalisé un travail en canal visant à étudier la couche limite turbulente au voisinage d’obstacle. Pour cela, elle a mis en place un essai en canal hydraulique dans lequel a été placée sur le fond, une matrice de cubes régulièrement espacés (Fig. 3.18). Les configurations du canal sont reprises numériquement pour bâtir un canal numérique en LBM-LES.



(a) Caractéristiques du canal hydraulique expérimental ($L : 20 \text{ m}$, $l : 1.1 \text{ m}$, $h : 0.5 \text{ m}$) de l'IMFT (Florens, 2010).



(b) Matrice de cubes disposée au fond du canal hydraulique.

Figure 3.18 – Essai expérimental en canal hydraulique pour l'étude de la couche limite turbulente en présence de macro-rugosités (Florens, 2010).

Afin d'être dans les mêmes conditions que lors des essais en canal, le flux en entrée du modèle est généré avec des caractéristiques turbulentes via l'approche des tourbillons synthétiques (*Synthetic Eddy Method* - SEM) (Poletto *et al.*, 2013). La figure 3.19 comporte deux vues en 3 dimensions. La figure 3.19a est un zoom sur un cube du domaine et les tracés d'iso-contours de λ_2 permettent de mettre en évidence les structures tourbillonnaires générées par la présence du cube dans le flux. La figure 3.19b est une vue en 3 dimensions de l'ensemble des cubes modélisés du domaine LBM-LES. Deux coupes, transversale et longitudinale, mettent en évidence les normes des vitesses du fluide. Le nombre de Reynolds est dans le cas présent de 3.6×10^4 .

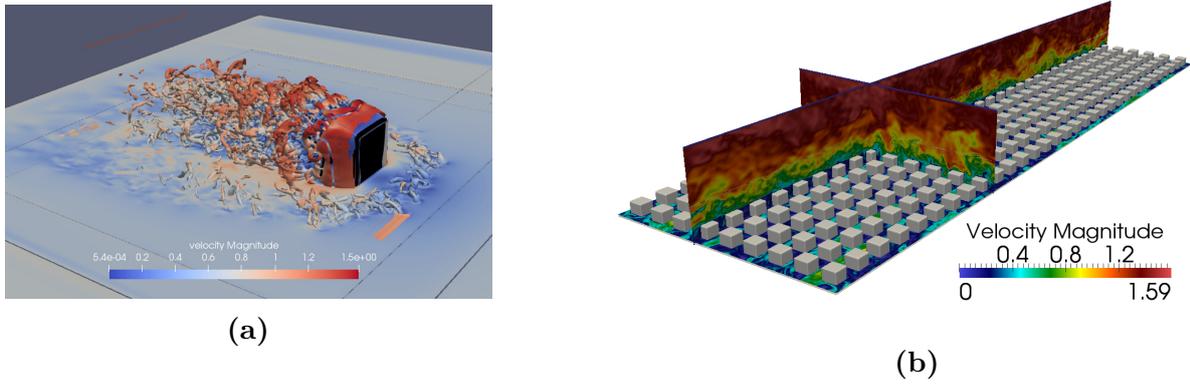


Figure 3.19 – (a) Structures tourbillonnaires présentes dans le sillage d’une macro-rugosité cubique visualisées par tracé d’iso-contours de λ_2 . (b) Vue d’ensemble des rugosités et coupes de norme de vitesses instantanées d’une simulation LBM-LES. D’après [Mercier \(2019\)](#).

La figure 3.20(a) présente la comparaison de profils verticaux de vitesse longitudinale (dans l’axe du domaine de modélisation et du canal d’essai), en 3 points de mesure du canal (Fig. 3.21). Sur la figure 3.20(b) et pour les 3 mêmes points, ce sont les vitesses verticales qui sont comparées entre LBM-LES et l’expérience en canal.

Les profils simulés de vitesse longitudinale sont globalement très proches des données expérimentales, les points A et B étant ceux montrant le plus de différences. Pour ces deux points, les gradients de vitesse au niveau de l’extrémité latérale des cubes sont importants.

Les vitesses verticales sont elles-aussi bien représentées dans le modèle en comparaison du cas expérimental. Seul pour le point A, une légère inversion des directions est notée au niveau supérieur du profil vertical (Fig. 3.20b).

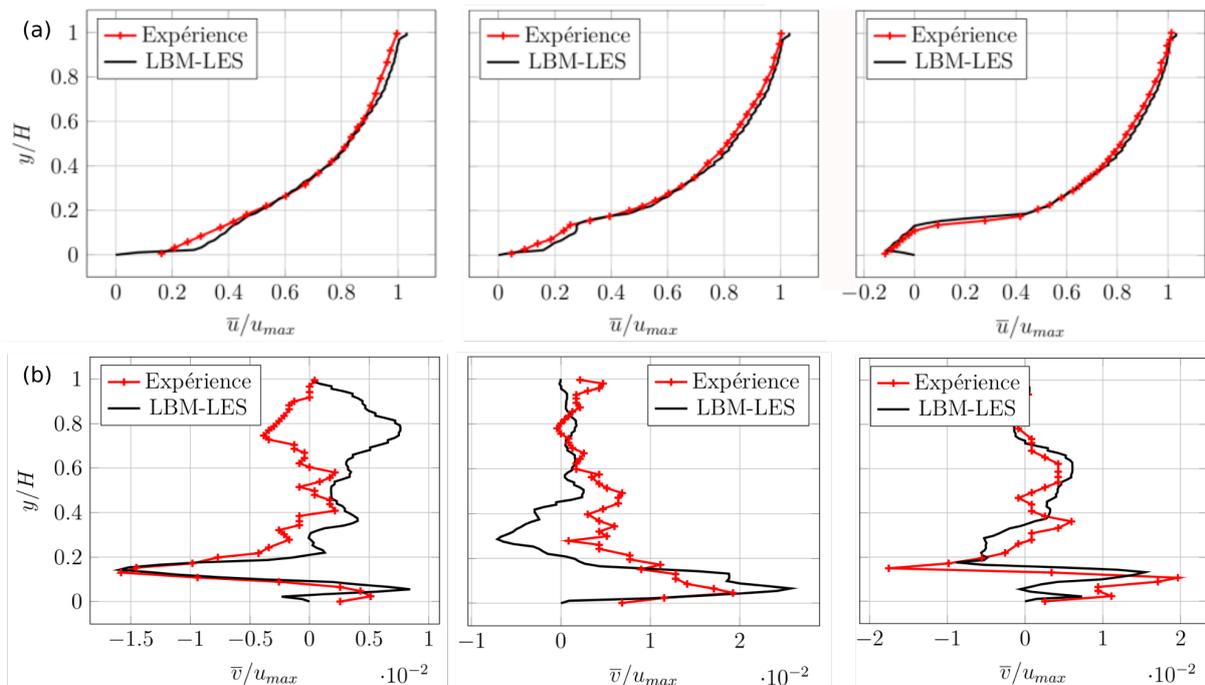


Figure 3.20 – (a) comparaison de profils verticaux de vitesse longitudinale en 3 points mesurés dans l’expérience en canal ([Florens, 2010](#)). (b) comparaison de profils de vitesse verticale sur les 3 mêmes points de l’expérience en canal ([Florens, 2010](#)). D’après [Mercier \(2019\)](#).

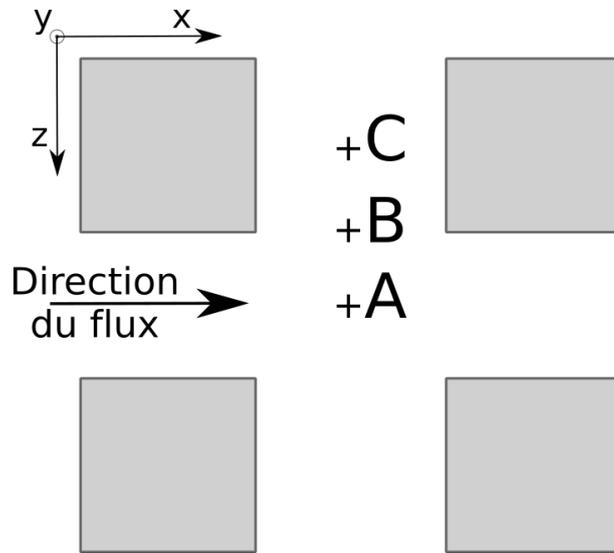


Figure 3.21 – Position des points de mesures dans l’expérience de Florens (Florens, 2010).

L’approche de Boltzmann sur réseau montre clairement ses capacités à reproduire l’expérimentation en canal de Florens (2010). Ces résultats permettent d’envisager avec confiance la modélisation de la génération de structures tourbillonnaires à partir d’un fond réaliste du Raz Blanchard.

Simulation sur une bathymétrie réaliste

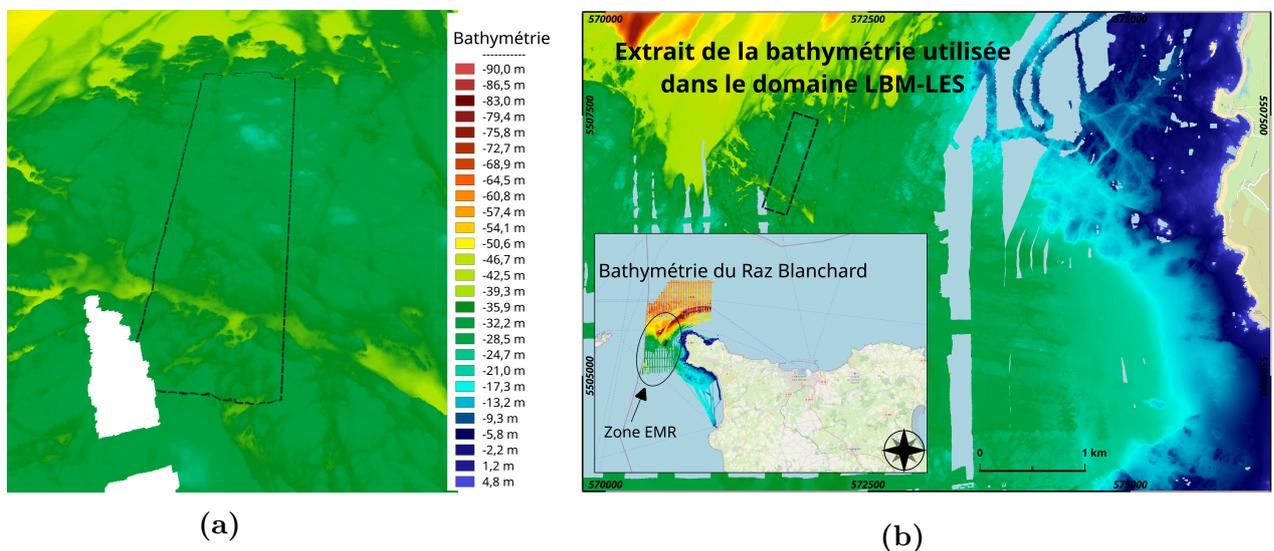


Figure 3.22 – (a) vue en 3D de la bathymétrie de la zone modélisée (pointillés) et (b) localisation générale du domaine de simulation (pointillés).

La figure 3.22a est un extrait de la bathymétrie du Raz Blanchard mis en place dans le modèle LBM-LES pour l’étude de la génération de structures tourbillonnaires générées par les macro rugosités du fond. Les dimensions réelles de la zone sont de 920 m de long (X) par 240 m de large (Y), avec des profondeurs comprises entre -46 m (dépression au sud) et -27 m (au niveau du pointement rocheux au nord).

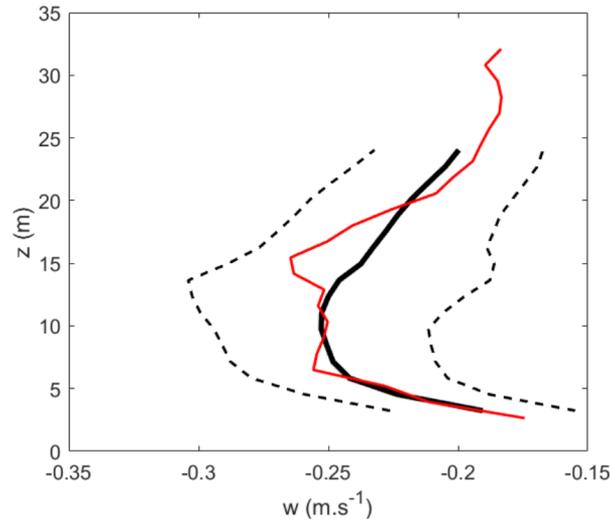


Figure 3.23 – Profils de variance des vitesses verticales dans le Raz Blanchard. En rouge données mesurées par un ADCP et en noir les données simulées trait plein. Les traits en pointillés correspondent à la variance des profils verticaux des vitesses simulées. D’après [Mercier \(2019\)](#).

La comparaison entre des mesures ADCP et les résultats de simulation, montre que le modèle LBM-LES réussit globalement à bien retransmettre l’organisation des vitesses verticales au dessus d’une portion de bathymétrie du Raz Blanchard.

Par la validation des profils verticaux de vitesse, il est alors possible de visualiser l’organisation des structures turbulentes au dessus du fond. La figure 3.24 est composée de deux images, la première (Fig. 3.24a) montre un zoom sur une portion brute du domaine simulé qui contient un affleurement rocheux. La seconde (Fig. 3.24b) représente la même portion avec la visualisation en isosurface de critère λ_2 , des structures turbulentes générées au dessus de l’affleurement rocheux et sur ses environs immédiats. Les formes et les directions prises par les structures tourbillonnaires apparaissent extrêmement complexes.

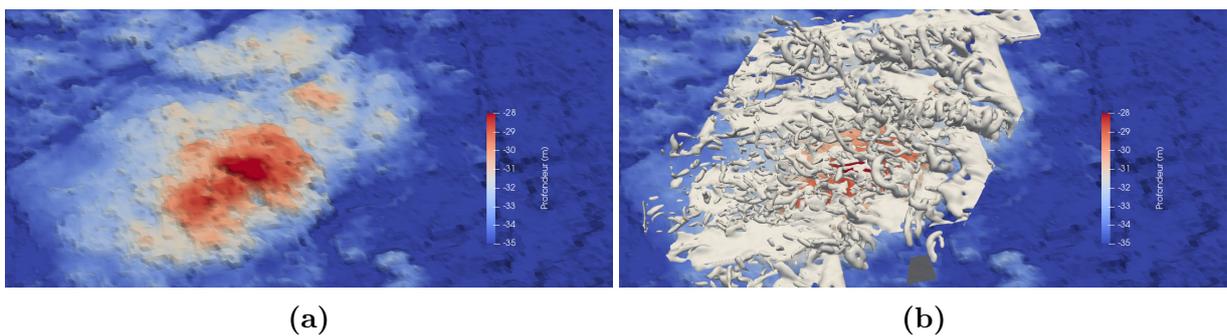


Figure 3.24 – (a) zoom sur l’affleurement rocheux présent au nord de la bathymétrie simulée (Fig. 3.22a). (b) visualisation des structures turbulentes générées au dessus de l’affleurement rocheux en isosurface de critère λ_2 .

Ces résultats permettent de donner une image certainement plus représentative de la réalité, au regard de celle classiquement donnée de vortex circulaires et réguliers (isotropes). Ces observations appellent aussi à considérer les mesures des vitesses *in situ*, notamment ADCP, avec beaucoup plus de prudence dans leur interprétation et aussi dans leur traitement.

3.3.4 LBM pour l'aquaculture

La rade de Cherbourg est l'unique lieu sur les côtes françaises métropolitaines où se trouve une exploitation de saumon en eau de mer. L'installation de cette industrie dans la grande rade n'est pas le fruit du hasard, mais une opportunité de tirer profit des caractéristiques environnementales d'un lieu unique en Europe, de part ses dimensions et l'histoire de sa genèse.

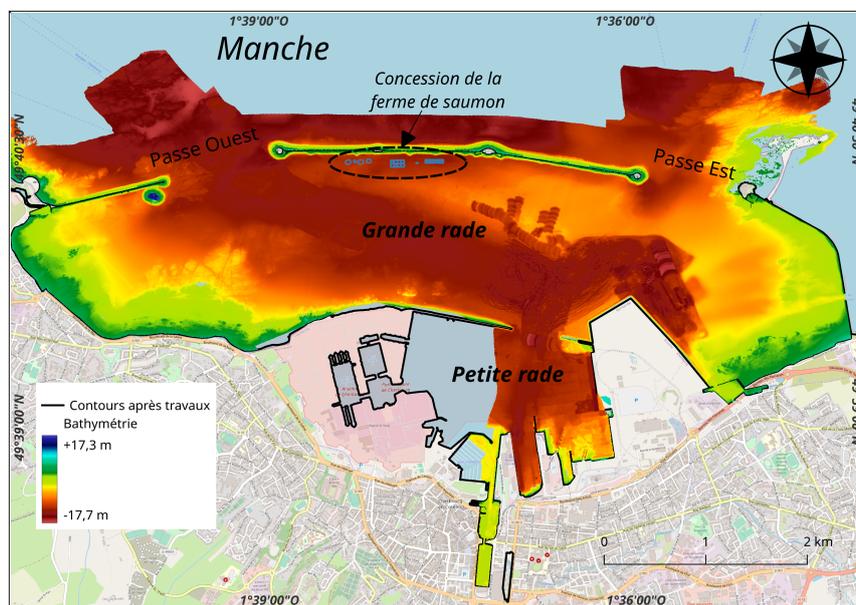


Figure 3.25 – Rade de Cherbourg dans ses nouveaux contours (2017).

Avec une superficie d'environ 15 km², la rade de Cherbourg est en fait constituée de deux parties, la petite et la grande rade (Fig. 3.25). Soumise à un régime de marée macrotidal, le marnage peut atteindre 8 m en marée d'équinoxe de vive-eau. Cette variation de hauteur d'eau s'accompagne de courants qui, dans la grande rade, sont orientés d'ouest en est au flot et inversement au jusant. Au cours d'un cycle de marée, l'essentiel de la masse d'eau déplacée sort et entre, dans la grande rade, par les passes de l'est et d'ouest. L'intensité des courants est faible en moyenne (entre 0.3 et 0.5 m.s⁻¹), mais peut approcher en certains endroits au cours des marnages les plus importants jusqu'à 1.0 m.s⁻¹.

Avec la présence des digues qui protègent de l'agitation du large et le renouvellement deux fois par jour de l'eau, l'intérieur de la grande rade offre ainsi un cadre idéal à l'installation d'une ferme aquacole spécialisée dans la production de saumon.

Malgré ce contexte environnemental favorable et des méthodes de production favorisant le bien être animal¹⁰, un certain nombre de poissons sont tout de même victime d'attaques parasitaires, causant des sur-mortalités.

Les exploitants de la ferme ont sollicité la réalisation d'une série de travaux visant à essayer d'identifier les mécanismes responsables de la présence de parasites.

Un premier programme a été mis en place visant à obtenir une cartographie des communautés benthiques présentes en rade de Cherbourg (GEDANOR, projet financé par le Conseil Régional de Basse-Normandie (CRBN)) (Fig. 3.26). Ce travail nous a permis d'estimer si de potentielles sources parasitaires pouvaient être présentes en rade de Cherbourg.

10. La société SaumonFrance qui exploite le site de production, a choisi de limiter le nombre de poisson par filet afin de favoriser leur déplacement et limiter les risques de propagation de maladies par contagion.

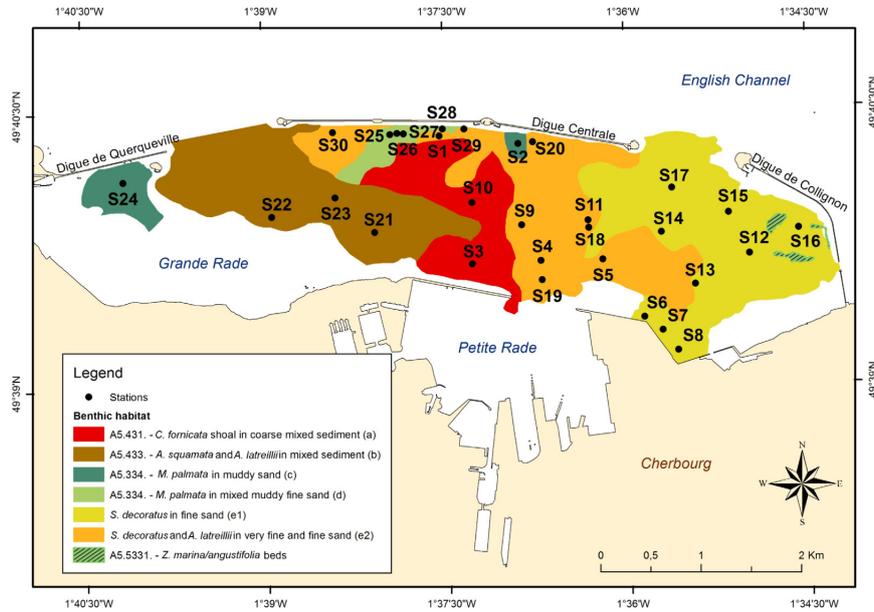


Figure 3.26 – Carte des habitats benthiques de la rade de Cherbourg, d’après Baux et al. (2017).

En parallèle, j’ai mis en place un modèle numérique LBM-LES 2D afin de simuler tout d’abord l’organisation des courants autour d’une structure immergée, et d’introduire ensuite des particules afin de suivre leur déplacement au cours du temps (Fig. 3.27). La contrainte majeure était que le modèle puisse atteindre des nombres de Reynolds de 10 000. Les lignes plus épaisses présentent sur la figure 3.27 référencées (a), (b) et (c), représentent les zones dans lesquelles ont été placées initialement des particules.

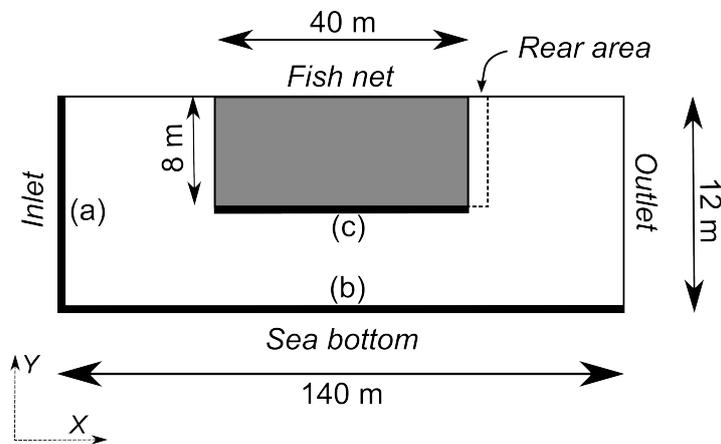


Figure 3.27 – Caractéristiques du domaine de simulation LBM-LES mis en place. (a), (b) et (c) sont les lieux de présence initiale de particules. D’après Poizot et al. (2016).

Deux simulations ont été réalisées avec deux valeurs de Reynolds différentes, respectivement 300 et 10 000. La figure 3.28 est illustrée des résultats de la modélisation des courants et de la répartition des particules pour des nombres de Reynolds de 300 sur ses deux premières lignes et de 10 000 sur ses deux dernières lignes. Les lignes de courant sont représentées pour aider à mieux visualiser l’organisation et la complexité croissante (avec le nombre de Reynolds) de la distribution des vitesses dans le domaine modélisé. Les particules en suspension sont colorées en fonction de leur lieu de présence initial. Les particules bleues sont initialement placées en entrée (Fig. 3.27(a)), les vertes sur le fond du domaine (Fig. 3.27(b)) et les rouges en bas de la cage de poisson (Fig. 3.27(c)).

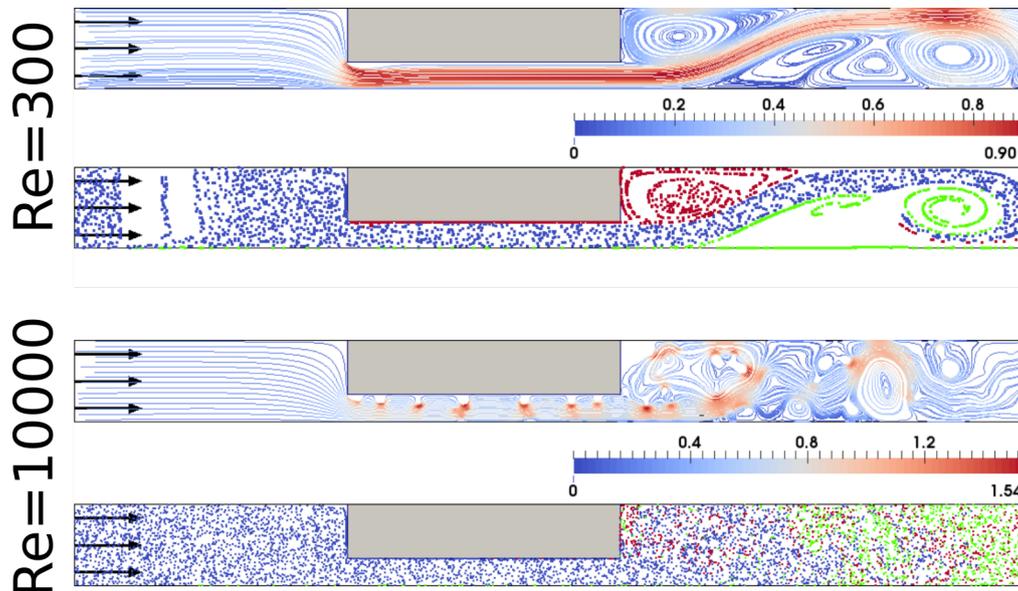


Figure 3.28 – Distribution des vitesses et des particules après un temps d’initialisation autour d’une cage de poisson pour deux valeurs de Reynolds, 300 (les deux figures du haut) et 10000 (les deux figures du bas). Les particules sont colorées en fonction de leur lieu de présence initial, bleu en entrée du domaine, vert pour le fond et rouge au fond de la cage, respectivement (a), (b) et (c) sur la figure 3.27. D’après [Poizot et al. \(2016\)](#).

Pour la simulation avec un nombre de Reynolds de 300, les vitesses des courants sont maximales, sans surprise, en dessous de la cage de poisson. Les vitesses importantes piègent principalement les particules provenant de l’entrée (bleues) du domaine. Elles sont aussi responsables du décollement des particules sur le fond (vertes) qui restent principalement piégées dans le vortex le plus éloigné derrière la cage. Les particules initialement présentes en dessous de la cage de poisson (rouges), sont quant à elles piégées dans une cellule de courant tourbillonnaire immédiatement en arrière de la cage.

Les résultats de la simulation avec un nombre de Reynolds de 10 000 se veulent être plus proche de la réalité en ce qui concerne la répartition des courants notamment. L’organisation spatiale des vitesses autour de la cage est beaucoup plus complexe. Si les vitesses maximales sont encore localisées sous la cage, elles sont présentes à l’intérieur d’une série de vortex, comparable à une allée de Von Karman. De plus grosses cellules tourbillonnaires sont aussi présentes plus en amont de la cage avec des vitesses plus faibles. Une cellule tourbillonnaire composée d’une série de plus petits vortex de vitesse élevée est présente immédiatement dans le sillage de la cage. Avec cette valeur de Reynolds, les particules provenant du champ lointain (bleues), sont réparties de manière homogène dans le domaine, avec quelques points de concentration un peu plus élevés dans les vortex les plus marqués du domaine. Les particules placées initialement sur le fond (vertes), sont pour la majeure partie expulsées dans le champ lointain de la cage. Seule une très faible partie quasi négligeable se trouve piégée en arrière de la cage. Quant aux particules présentes en dessous de la cage, elles se trouvent pour l’essentiel piégées dans le vortex immédiatement dans sillage de la structure, avec une concentration importante dans une zone de courants faibles proche de la surface.

Ce travail a permis de donner des premiers éléments de réponse sur les causes et provenances des contaminations parasites des cages de production de saumons en rade de Cherbourg. Avec le programme GEDANOR, il a été possible d’estimer que la rade de Cherbourg ne possédait pas un potentiel de contamination en parasites plus élevé que ce qui existe en dehors de la rade. Les travaux de modélisation LBM ont montré en revanche un possible processus « d’auto-contamination » des cages. Les particules en suspension

présentent dans les environs proches des cages de fortes probabilités d'être piégées dans des cellules tourbillonnaires immédiatement en arrière, ce qui empêche leur dispersion loin des cages. Ainsi, si une contamination s'initie dans une cage, le processus d'auto-contamination allié à la promiscuité des animaux, a de fortes chances d'engendrer à plus ou moins courts termes une pandémie à l'échelle de la ferme de production.

3.4 Conclusion

En domaine côtier, ce sont les mouvements de la masse d'eau qui sont le moteur principal du transport sédimentaire. J'ai identifié la méthode de Boltzmann sur réseau (LBM) comme une approche viable pour la modélisation numérique hydrodynamique marine. Néanmoins, dans l'état actuel des développements, la LBM ne peut être appliquée qu'à des contextes géographiques restreints. L'ajout de la composante particulaire au sein de la LBM est encore un chantier en soi, mais les principes fondamentaux de la méthode laissent la possibilité non seulement d'intégrer des approches déjà existantes par ailleurs, mais surtout d'en développer de nouvelles spécifiquement adaptées à la LBM. Le concept central de la LBM représenté par l'opérateur de collision, est à mon sens le creuset des travaux dans lesquels doivent se forger les approches et développements nouveaux de l'étude du transport sédimentaire en milieu marin, ce qui ouvre de larges perspectives d'investigations.

Valorisation des travaux

- ☞ 6 publications dans des revues à comité de lecture dont 2 en 1^{er} auteur
- ☞ 13 actes de congrès à comité de lecture
- ☞ 2 actes de congrès à comité de lecture

Programmes de recherche rattachés

☞ Nationaux

- ANR-FEM HYD2M (2016-2019, budget global : 2500 k€) - Hydrodynamique du Raz-Blanchard : Mesures et Modélisation. Porteur : M2C UNICAEN. En tant que collaborateur ;
- ANR-FEM THYMOTE (2016-2019, budget global : 1910 k€) : Caractérisation de la turbulence dans le Raz-Blanchard. Porteur : LUSAC. En tant que collaborateur ;
- ANR/ITE PHYSIC (2016-2019, budget global : 1927 k€) : Processus Hydro-Sédimentaires en Interaction avec les courants. Porteur : SHOM. En tant que collaborateur ;
- FEDER/FSE ADEME PASEAFIC (2015-2019, budget global : 121 k€) - Protection At SEA against Fouling In Current. Porteur Cnam/Intechmer. En tant que porteur du programme.

☞ Régionaux

- MECABIO (2012, Resp. : E. Poizot)

:

☞ Départementaux

- GENTURB (2019, Resp. : E. Poizot)
- DYSFORCE (2018, Resp. : Y. Méar). En tant que collaborateur ;
- DYCES (2017, Resp. : Y. Méar). En tant que collaborateur.

Chapitre 4

Projets de recherche sur le thème du transport sédimentaire

Je voudrais poursuivre mes travaux sur le thème du transport sédimentaire en milieu marin. Si la modélisation numérique est l'objectif principal, elle ne peut pas se dissocier de l'analyse de données de terrain, qui doit donner la « vérité terrain » sans laquelle il n'est pas possible de juger de la qualité de la simulation numérique.

Lorsque l'on souhaite vérifier la justesse d'un modèle numérique hydrodynamique, le réflexe naturel est de le comparer à des mesures de courant réalisées dans la zone d'étude. Avec le développement des modèles hydro-sédimentaires, une des questions fondamentales est de savoir comment valider les résultats donnés pour la partie sédimentaire du modèle.

L'étude du transport sédimentaire via les caractéristiques granulométriques des particules a montré certaines limites. Malgré les propositions d'améliorations des conditions d'analyses, il est nécessaire de poursuivre ce travail en généralisant cette approche à d'autres paramètres que ceux granulométriques, afin d'augmenter le degré de fiabilité et de fidélité dans la détermination des directions de transport des sédiments en milieu marin. **Quelles sont les variables les plus représentatives du transport dans un lieu donné ? Quelles sont les conditions hydrodynamiques liées à un type de transport donné ?** Je souhaite poursuivre ces travaux et proposer une nouvelle démarche que je nomme *Multi-proxy Sediment Trend Analysis* (MSTA) (voir 4.1). Cette dernière doit permettre d'aboutir à la connaissance la plus juste et fiable possible des transports réels des sédiments. Le fait que cette approche se base sur des données de terrain est fondamental à mon sens pour disposer de l'information nécessaire pour juger ensuite de la véracité des résultats issus de modèles numériques hydro-sédimentaires.

Dans le cadre de ma participation à l'encadrement de la thèse de [Mignot \(2023\)](#)¹, j'ai initié des travaux de modélisation numérique du transport des sédiments basés sur l'utilisation du duo CROCO/MUSTANG. L'intérêt est de déterminer le devenir de radionucléides lorsqu'ils sont relâchés dans un environnement tel que celui de la rade de Cherbourg. La version 2 de MUSTANG intègre la prise en compte de processus sédimentaires complexes, tels que le mélange de tailles granulométriques (cohésif et non-cohésif), ou encore les éventuels effets de masquage (des particules les plus petites gênées dans leur transport par les plus grosses), pour ne citer que les principaux.

Le second volet du projet de recherche PROTEC porté par Gwendoline Grégoire du laboratoire INTECHMER-LUSAC démarre en septembre 2023. Il offre un cadre d'application idéal à la mise en place d'un modèle hydro-sédimentaire basé sur les codes de calculs CROCO et MUSTANG (voir 4.2). L'objectif est de s'attacher à expliquer les causes de l'engraissement chronique en sédiment de l'Anse du Cul-de-Loup. La présence de sédi-

1. Soutenue en octobre 2023

ments fins et d'autres plus grossiers, va permettre une mise en œuvre de MUSTANG dans ses caractéristiques fondatrices.

Le programme PROTEC offre aussi l'opportunité de conduire une approche numérique intégrée. L'activité d'ostréiculture présente dans la zone d'étude, teste de nouveaux modes de productions. Les tailles et les morphologies des nouvelles structures ne sont pas accessibles directement par une modélisation RANS travaillant à l'échelle de l'anse. Pour sa thèse, [Kervella \(2010\)](#) a travaillé à une paramétrisation des effets des tables ostréicoles sur l'hydrodynamique et le transport sédimentaire dans un modèle RANS. Ce travail combinant mesures de terrains, expérimentations de laboratoire et approche numérique, offre des perspectives d'amélioration, qui peuvent être abordée notamment avec la LBM. La modélisation hydrodynamique fine à l'échelle d'une structure de production ou à un ensemble d'entre elles, peut donner des informations de haute résolution de l'impact sur l'écoulement. L'intensité de la pénalité sur l'écoulement peut être alors estimée et appliquée aux nœuds sous l'influence des structures de production d'un modèle de plus large étendue.

Une démarche similaire peut être conduite pour la partie sédimentaire. Une modélisation fine des mouvements des particules aux abords proches des structures peut fournir des informations au modèle hydro-sédimentaire d'emprise régionale. Si pour la partie hydrodynamique des modèles, les procédures sont déjà en place, il n'en est pas de même pour la partie sédimentaire. Même si de rares travaux ont déjà été tentés dans l'approche LBM, qui mélangent processus hydrodynamiques et particulaires, en domaine marin, l'essentiel reste à faire. L'intégration d'un modèle de transport sédimentaire au sein de la LBM est un sujet de fond auquel je veux consacrer une partie de mon activité de recherche.

4.1 De GSTA vers MSTA

Objectif

Déterminer les directions des transports particulaires réelles à partir d'échantillons sédimentaires.

Au chapitre 2, j'ai présenté la méthode GSTA ainsi que les évolutions et les propositions que nous avons pu faire pour inscrire cette approche dans une démarche plus robuste. De manière générale, quel que soient les auteurs, l'objectif de tous les travaux est d'améliorer la connaissance des directions de transport des sédiments. McLaren *et al.* (2007), Le Roux *et al.* (2002) et Poizot *et al.* (2008) ont listé les différentes sources d'incertitudes (qualifiées de « bruit » par McLaren *et al.* (2007)) qui contribuent à altérer la définition du champ de vecteurs de transport de sédiments. Trois grandes catégories d'incertitudes sont reconnues :

- celles liées à la distribution spatiale des échantillons sédimentaires ;
- celles liées à la mesure des paramètres statistiques sur chaque échantillon ;
- celles liées aux choix du ou des cas d'évolution traité(s).

Les deux premières sources ont été traitées dans les articles déjà cités et surtout celles liées aux incertitudes spatiales, ont été le sujet principal des travaux menés jusqu'à présent. Restent les incertitudes liées aux cas d'évolutions (tel que $CB+$, par exemple) qui sont étudiés lorsque l'approche GSTA est appliquée, je les identifie sous le terme ***incertitudes du modèle***.

Les travaux de McLaren (1981) ont établi les deux cas d'évolutions qui étaient le plus probables avec l'utilisation des trois paramètres statistiques (μ , σ et γ) : $CB+$ et $FB-$. Les auteurs qui à la suite ont proposé des alternatives à STA© pour définir GSTA, n'ont jamais travaillé sur cet aspect de l'approche de McLaren. Ces modèles d'évolutions ont été largement repris et acceptés par la communauté. Pourtant, des travaux ont démontré d'une part que la seule utilisation des deux cas d'évolutions initiaux ne parvenait pas à définir le vrai transport des sédiments (Masselink, 1992 ; Maillet *et al.*, 2011) et d'autre part que des cas d'évolutions différents étaient possibles, tout du moins expliquaient mieux le transport réel observé directement sur le terrain (Bartholdy *et al.*, 2007 ; Barnard *et al.*, 2013 ; Cartier & Héquette, 2013 ; Poizot *et al.*, 2013 ; Plomaritis *et al.*, 2013).

Avec Poizot & Méar (2008, 2010), nous avons donné la possibilité de pouvoir définir d'autres cas d'évolutions (d'autres modèles) en se restreignant toujours aux trois paramètres statistiques initiaux. L'objectif était de donner la possibilité d'avoir une approche exploratoire du jeu de données préalablement au choix de l'analyse finale qui allait être réalisée. Dès lors, les champs de transports liés aux modèles tels que B (« Better sorted ») ou FB (« Finer and Better sorted ») pouvaient être calculés.

Déjà dans Poizot & Méar (2010), nous avons ajouté la possibilité de tenir compte de certaines morphologies ou obstacles qui peuvent parfois être présents dans la zone d'étude. Le modèle GSTA standard basé sur les trois paramètres statistiques peut être exprimé sous la forme :

$$\vec{T}_t = f(\mu, \sigma, \gamma), \quad (4.1)$$

avec \vec{T}_t le champs de vecteurs représentant les directions de transports des sédiments. La prise en compte de certains obstacles ou obstructions donne alors un modèle de la forme :

$$\vec{T}_t = f(\mu, \sigma, \gamma, G), \quad (4.2)$$

avec G qui représente la contribution au modèle de la prise en compte des obstacles

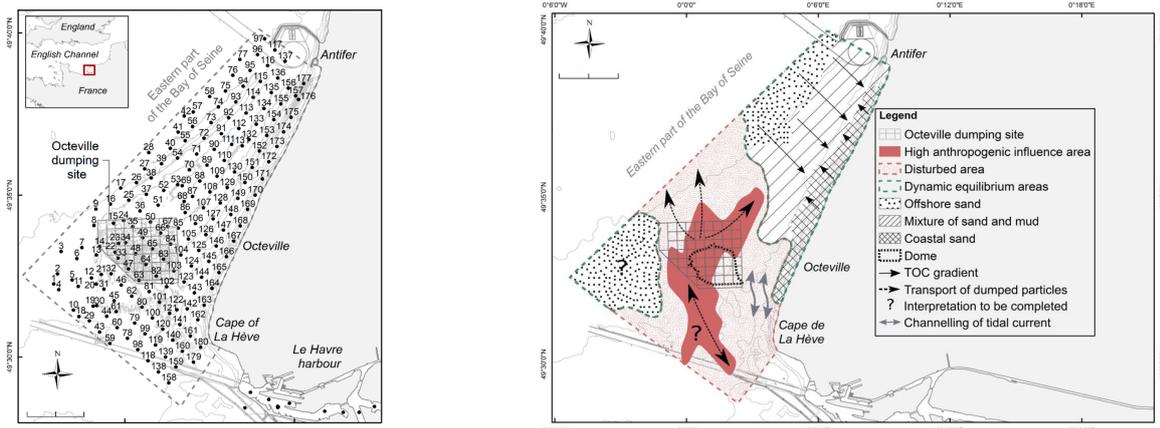
en question. Le modèle final est enrichi par l'ajout d'une variable supplémentaire. Cet apport d'information a pour effet de compléter le modèle initial pour diminuer les erreurs liées au modèle d'évolution étudié.

L'idée est maintenant de généraliser cette démarche et d'élargir à d'autres variables la possibilité de définir un modèle qui soit plus en accord et/ou plus complet, pour la détermination du champ de transport des sédiments. En d'autres termes, il faut se donner la possibilité de définir les directions de transport des sédiments non seulement avec les variables historiques (μ , σ et γ), mais aussi en les remplaçant et/ou complétant par n'importe quel autre type de variable.

Variables géochimiques : un galop d'essai.

Dans cette section sont présentés les résultats d'un travail réalisé par Noémie Baux (Baux *et al.*, 2022) dans le cadre de son post-doctorat au Cnam/Intechmer du xxx au xxx, que j'ai participé à encadrer.

Dans ce travail, l'idée principale a été de remplacer les trois variables μ , σ et γ issues des distributions granulométriques des échantillons sédimentaires, par trois autres variables géochimiques, issues de mesures d'une part du spectre de rayons X et d'autre part de spectrométrie infra-rouge.

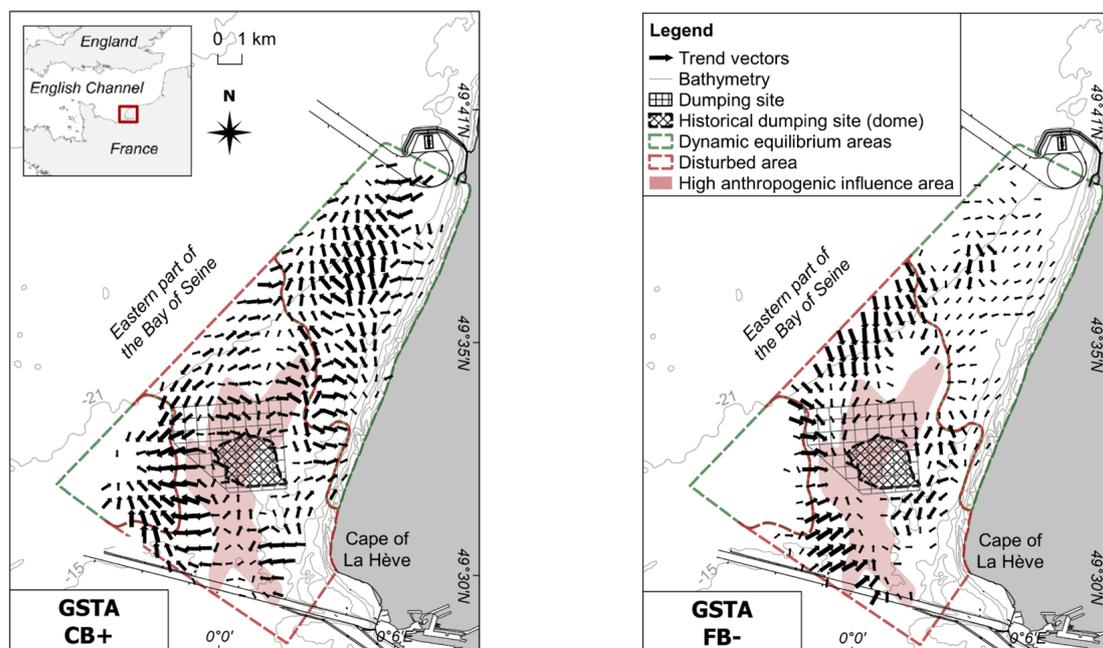


(a) Carte de localisation des échantillons sédimentaires.

(b) Résumé cartographique du transport sédimentaire issue de l'analyse des échantillons (Baux *et al.*, 2019)

Figure 4.1 – (a) Carte de localisation des échantillons sédimentaires. (b) Interprétation des transports sur la zone du dépôt de dragage d'Octeville, baie de Seine (France). D'après Baux *et al.* (2022).

Au cours de son travail de thèse Baux (2018) a réalisé une série de prélèvements sédimentaires sur un site localisé en baie de Seine orientale au large du cap d'Octeville (Fig. 4.1). Ce travail s'intéresse à l'influence des dépôts de dragage du port du Havre qui sont en partie effectués sur le site d'Octeville (Fig. 4.1a). La question principale est de connaître les directions dans lesquelles vont se disperser les sédiments déposés, en particulier, ceux les plus fins. Sur la carte de la figure 4.1b, la seule étude de la répartition granulométrique des sédiments, ne permet pas d'avoir une connaissance exhaustive des directions de transports des sédiments depuis la zone de dépôt. C'est une conséquence de la complexité de cette partie de la baie de Seine, avec une hydrodynamique marine forte (courant de marée et houle) et une influence du fleuve Seine tout proche non négligeable. La morphologie des fonds est aussi relativement complexe, puisqu'aux variations et structures naturelles, viennent s'ajouter les perturbations anthropiques via les dragages et chenalizations réalisées pour la navigation.



(a) Champ de vecteurs de transport des sédiments déterminé selon l'approche GSTA de Poizot & Méar (2010) pour le cas d'évolution CB+ seul.

(b) Champ de vecteurs de transport des sédiments déterminé selon l'approche GSTA de Poizot & Méar (2010) pour le cas d'évolution FB- seul.

Figure 4.2 – (a) Modèle d'évolution CB+. (b) Modèle d'évolution FB-. D'après Baux et al. (2022)

Lorsque l'analyse GSTA classique est réalisée selon le protocole établie dans Poizot & Méar (2010) pour les deux cas standards d'évolution, respectivement CB+ et FB-, l'influence des dépôts sur le site d'Octeville est difficilement mis en évidence (Fig. 4.2). En effet, les paramètres statistiques définis sur les distributions granulométriques des échantillons sédimentaires prélevés dans la zone d'Octeville ont un degré de représentativité moyen voir faible, selon les endroits, du transport des sédiments.

Pourquoi ici les paramètres statistiques ne sont-ils pas représentatifs du transport ?

Les courbes granulométriques de la zone d'étude montrent des allures multi-modales. Des travaux réalisés dans d'autres contextes (Gao & Collins, 1992 ; Le Roux & Rojas, 2007 ; McLaren & Bowles, 1985) ont présenté des distributions granulométriques multi-modales et l'approche GSTA a pu fournir néanmoins des résultats acceptables.

Il est probable que les modes (ou les sédiments) en relation avec les apports artificiels au niveau du dépôt de dragage, ne soient pas à l'origine en relation dynamique avec les sédiments en place. Lorsque des courbes granulométriques montrent plusieurs modes et que les sédiments correspondant à ces modes sont endémiques à la zone, il y a de plus fortes chances que les paramètres statistiques calculés sur les distributions granulométriques (même si elles sont multi-modales), soient représentatifs du transport des sédiments. Dans le cas du dépôt de dragage d'Octeville, les sédiments apportés n'ont aucune relation hydrodynamique avec ceux en place (l'apport est artificiel). C'est d'ailleurs une des caractéristiques recherchées par ceux qui ont choisi de déposer les résidus de dragage (en général du matériel fin à très fin) sur ce site. L'objectif étant que ce déséquilibre soit le moteur d'une dispersion la plus rapide possible dans le milieu marin ouvert.

En reprenant une analogie avec le traitement du signal, un parallèle peut être fait avec les courbes granulométriques. Les courbes granulométriques d'un sédiment sur lequel l'en-

semble des classes ont été soumises aux mêmes agents de transports, vont montrer une signature caractéristique des agents de transports. En venant ajouter à ce signal de base, un autre issu d'un sédiment sans aucune relation hydrodynamique avec les agents de transport, le signal initial est bruité, moins clair. Ainsi, les paramètres statistiques définis sur de tels signaux (ou distributions granulométriques), vont être l'image fidèle d'un signal bruité, donc bruités eux-mêmes.

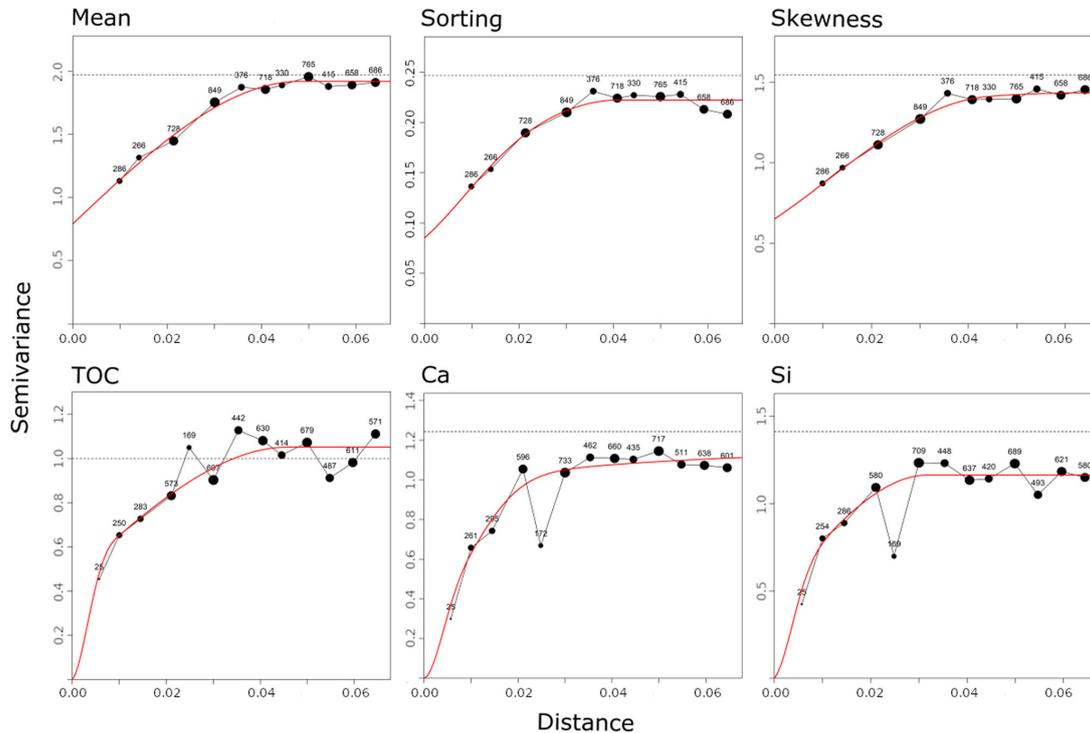


Figure 4.3 – *Semi-variogrammes de la moyenne (μ), écart-type (σ) et asymétrie (γ) (graphiques du haut) et du TOC, Ca et Si (graphiques du bas). D'après Baux et al. (2022).*

L'idée est de remplacer les paramètres μ , σ et γ standards de GSTA par d'autres plus représentatifs. Dans le cas du dépôt de dragage d'Octeville, le choix s'est porté sur des paramètres géochimiques mesurés sur les échantillons sédimentaires de la zone : le Carbone Organique Total (*COT*), le Calcium (*Ca*) et le Silicium (*Si*). Je ne détaillerai pas ici la méthodologie qui a amené à faire ces choix présentée dans Baux et al. (2022), pour me concentrer sur les résultats et leurs conséquences dans la démarche GSTA.

La figure 4.3 est composée des semi-variogrammes des trois paramètres statistiques standards de GSTA (ligne du haut). Les graphiques de la ligne du bas de la figure 4.3, sont ceux des trois variables géochimiques (*TOC*, *Ca* et *Si*). Sur ces graphiques, les variables géochimiques possèdent une structuration spatiale (une auto-corrélation) meilleure que les paramètres statistiques descriptifs. Le comportement à l'origine des semi-variogrammes « géochimiques » est beaucoup mieux définis (aucun effet pépité). Cela veut dire que l'organisation spatiale des paramètres géochimiques est plus fidèle à la réalité captée au moment de l'échantillonnage. Le signal obtenu est plus clair, moins bruité.

Cette puissance supérieure des paramètres géochimiques est dans le cas présent encore plus évidente avec le *Ca* et le *Si*. En effet, leur semi-variogramme respectif montre une « cassure » dans la semi-variance, à une distance approximative de 2200 m (0.02°). Cette distance est exactement la taille moyenne de l'étendue du dépôt de dragage d'Octeville. En conséquence, pour ces deux variables, deux semi-variogrammes se juxtaposent, un premier en relation avec le signal du dépôt de dragage et le second avec le signal de fond.

La figure 4.4 est composée d'une carte montrant différents champs de vecteurs qui

correspondent à des gradients de variations de quatre modèles différents. Ces derniers sont ceux construits à partir des trois variables géochimiques, selon le tableau 4.1.

Table 4.1 – *Correspondance entre les gradients géochimiques et les modèles étudiés avec les cas d'évolutions correspondant à la nomenclature GSTA standard.*

Modèles	Évolution de la concentration			Traduction dans les cas GSTA standards
	TOC	Ca	Si	
HHH	+	+	+	FP+
HHL	+	+	-	FP-
HLH	+	-	+	FB+
HLL	+	-	-	FB-

H pour « Higher » et L pour « Lower ».

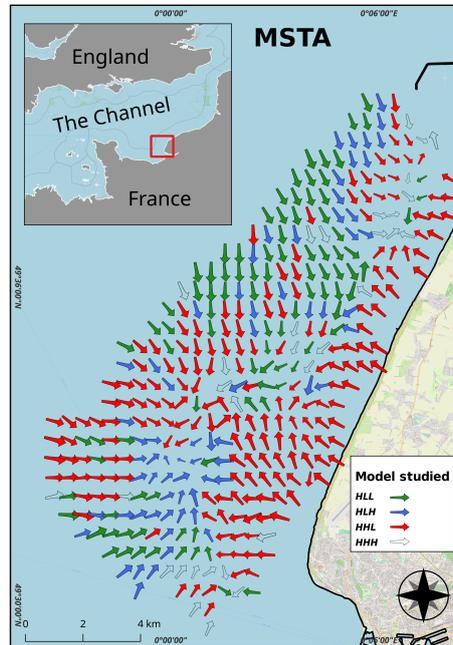


Figure 4.4 – *Champ des gradients de variations des paramètres TOC, Ca et Si selon quatre modèles différents de variation des paramètres géochimiques (Tab. 4.1).*

Dans le cas présent, plusieurs modèles ont été proposés (Tab. 4.1, colonne « Modèles »), mais tous sont basés sur 3 paramètres TOC , Ca et Si de sorte que le champ de vecteurs s'exprime de la manière suivante :

$$\vec{T}_t = f(TOC, Ca, Si), \quad (4.3)$$

en référence à l'expression du modèle d'origine de l'approche GSTA (Eq. 4.1).

Multi-proxy Sediment Trend Analysis - MSTa

Dans [Baux et al. \(2022\)](#), nous avons remplacé toutes les variables d'origine de GSTA (μ , σ et γ), par un ensemble de variables géochimiques (TOC , Ca et Si). La généralisation de cette démarche va amener à proposer une nouvelle approche que nous avons nommé « **Multi-proxy Sediment Trend Analysis (MSTa)** ».

Pourquoi se limiter à trois variables ?

En se limitant toujours aux trois mêmes paramètres (ou variables), le modèle GSTA a l'avantage d'avoir une approche homogène et constante quelque soit le site étudié. Cet aspect a d'ailleurs facilité la création d'outils logiciels permettant une mise en œuvre de GSTA, en « boîte noire ». En raison de cette apparente facilité, la nécessaire connaissance du fond de la méthode est masquée. En faire l'économie, c'est aller au devant de certaines désillusions. L'universalité des trois paramètres statistiques de GSTA n'est pas toujours possible.

En fonction des sites d'études, de leurs spécificités morphologiques, hydrodynamiques ou encore sédimentaires, le nombre et la nature des variables qui peuvent être nécessaires à l'établissement du modèle montrant les directions réelles de transport des sédiments, peuvent être différents. Le choix des variables pour l'établissement de ce modèle doit être guidé de sorte à diminuer le plus possible le niveau d'incertitudes, ou en d'autres termes le niveau de bruit.

Il faut donc rendre possible l'établissement d'un modèle avec un nombre indéterminé de variables, de sorte à ce que la définition du champ de vecteurs suive l'expression :

$$\vec{T}_t = f \left(\sum_{i:1}^n \theta_i \right), \quad (4.4)$$

avec $\sum_{i:1}^n \theta_i \subset \Theta$, Θ étant l'ensemble de toutes les variables possibles et/ou mesurées pour un cas d'étude donné. Cette généralisation du nombre de variables, doit aussi se faire au niveau de la nature de celles-ci. Les variables doivent pouvoir être quantitatives (valeurs numériques), mais aussi qualitatives (codages alpha-numériques ou facteurs).

Enfin pour être encore plus complet et reprendre ce qui a déjà été fait dans [Poizot & Méar \(2010\)](#), il doit toujours être possible de tenir compte de limites physiques du domaine et de les intégrer dans le modèle, de sorte ce qu'il soit établi finalement suivant l'expression :

$$\vec{T}_t = f \left(\sum_{i:1}^n \sum_{j:1}^m \theta_i, g_j \right), \quad (4.5)$$

avec $\sum_{j:1}^m g_j \subset G$, G étant l'ensemble des toutes contraintes spatiales morphologiques et/ou logiques possible sur le domaine d'étude.

À partir de l'Eq.(4.5), deux aspects pour l'établissement concret du modèle doivent être définis : 1) le choix des variables et 2) l'hypothèse de direction de transport.

Le choix des variables

Le choix des variables, parmi l'ensemble de celles éventuellement possibles sur un site d'étude, doit être guidé par une règle relativement simple : chaque variable doit apporter un niveau d'information significatif au modèle, en minimisant le niveau d'incertitude globale.

Dans l'exemple des variables géochimiques de [Baux et al. \(2022\)](#), celles choisies l'ont été parmi un ensemble de plus de quarante variables mesurées. Ce choix a été réalisé par une analyse multi-factorielle, qui a permis de mettre en évidence et de classer les variables les plus significatives (celles présentes dans les pôles de forte inertie du nuage de

point). D'autres analyses doivent aussi pouvoir être combinées, telle que l'étude variographique, pour permettre de faire un choix de variables sur leurs caractéristiques spatiales (auto-corrélation). Dans [Baux et al. \(2022\)](#), non seulement *TOC*, *Ca* et *Si* représentaient un pôle informatif dans l'analyse factorielle, mais elles présentaient en même temps une bonne auto-corrélation.

L'hypothèse de direction de transport

Il s'agit ici de définir quel va être le sens de variation qui montre le transport effectif des particules sédimentaires pour chaque variable. Dans GSTA, la variable μ (moyenne) pour le cas de variation (ou modèle) *CB+*, devient « Coarser ». Le transport des sédiments résulte dans une augmentation de la moyenne² : $\mu_i < \mu_j$ avec i et j les indices de deux points distincts de l'espace (géographique). Le choix de la direction d'évolution pour chaque variable doit être défini sur l'ensemble du modèle.

Cet aspect est encore pour le moment celui qui réclame le plus de travail et d'attention. Dans [Baux et al. \(2022\)](#), le modèle final n'a été défini qu'à l'issue d'une série d'analyse de chaque cas d'évolution, pour retenir en chaque point le plus représentatif. En reprenant le tableau 4.1, quatre modèles ont été retenus (première colonne) pour l'ensemble des points de la zone. Pour donner un exemple, le cas *HHH* se traduit de la manière suivante : $TOC_i < TOC_j$ AND $Ca_i < Ca_j$ AND $Si_i < Si_j$.

Il va falloir rechercher les outils d'analyses les plus pertinents à l'établissement du meilleur (ou du moins mauvais) modèle de variation pour chaque variable.

Encore un peu plus de géostatistique

L'étude d'un processus environnemental qui se déploie de manière continue sur l'espace géographique, ne peut être réalisée en règle générale qu'à partir de prise de mesures en des points discrets du même espace. En conséquence, ce qui est étudié ce n'est pas le processus lui-même, mais une représentation (ou une image) de ce dernier, à travers l'échantillonnage qui en a été fait. En géostatistique, cette image est identifiée comme une variable régionalisée (VR). L'analyse du comportement de cette variable est le principe fondateur de tous les développements et travaux en géostatistique.

La recherche du meilleur modèle de variation d'une VR sur l'espace est guidé en géostatistique par les caractéristiques intrinsèques de la VR, elles-mêmes héritées de la manière avec laquelle la VR a été obtenue (ou mesurée). En fonction des caractéristiques de la VR, l'obtention de son modèle de variation va être plus ou moins représentatif de la réalité et aisé à déterminer, lorsqu'il existe.

La géostatistique s'est développée dans un contexte de relative « pauvreté » de l'information disponible sur le processus étudié. Pour combler ce manque ou cette perte d'information (lié à la VR), des développements théoriques et pratiques spécifiques ont été fait. Avec la mise à disposition de moyens d'investigations et de mesures de l'environnement de plus en plus performants³, les données sont à la fois en résolution et en volume, plus denses. Dans ce nouveau contexte, certains outils de la géostatistique sont plus difficiles à mettre en œuvre du fait de la lourdeur des calculs. La dimension temps apparaît comme une difficulté supplémentaire lorsque les mesures de la VR se répètent sur

2. En unité métrique.

3. le plus souvent aujourd'hui numériques.

le même espace géographique. L'analyse géostatistique doit aussi permettre de dégager un modèle de variation de la VR sur des séries temporelles. Ces contraintes ont naturellement suscité le développement de nouveaux outils géostatistiques.

Les *Stochastic Partial Differential Equations* (SPDE) sont un récent domaine de développement en géostatistique qui adressent les difficultés de la recherche des modèles géostatistiques spatio-temporels complexes (Lindgren *et al.*, 2022). Les SPDE sont des outils mathématiques puissants pour modéliser des phénomènes dynamiques complexes en tenant compte à la fois des aspects déterministes et stochastiques présents dans ces systèmes continus ou spatialement distribués.

Les mesures environnementales sont naturellement empreintes d'un niveau plus ou moins important d'incertitudes (biais et erreurs de mesures) qui ne sont pas toujours pris en compte dans les analyses et les interprétations, du fait principalement des difficultés théoriques et pratiques que cela engendre. Nous avons d'ailleurs déjà vu au chapitre 2, que l'aspect stochastique était déjà identifié par McLaren sous la notion de « bruit ».

Les SPDE offrent la possibilité d'intégrer dans l'analyse les effets non-stationnaires des VR, puisque l'opérateur différentiel travaille par nature localement. Ainsi, des variations brutales ou rapides peuvent être identifiées et éventuellement prises en compte dans le modèle final (Lindgren *et al.*, 2011 ; Poggio *et al.*, 2016). Sur le plan pratique, les SPDE évitent la construction de la matrice de covariance spatiale utilisée classiquement en géostatistiques (connu sous l'expression « problème du grand n »), qui engendre des coûts importants de calcul voir impossibles à réaliser dans le cas de grand jeux de données.

Il y a donc un intérêt évident à intégrer les SPDE dans les pré-traitements de l'approche MSTA. Les informations qui en résultent vont améliorer l'acuité avec laquelle chaque variable du modèle MSTA est perçue, ce qui va renforcer naturellement la qualité de la modélisation du transport sédimentaire définie sur la base de données de terrain.

Un projet d'ANR est en cours de rédaction⁴, dans lequel je vais prendre en charge les aspects liés aux traitements des données issues de mesures de terrain et de laboratoire, en vue d'une détermination fine des directions de transport des sédiments. Dans ce cadre, je propose la mise en œuvre d'une modélisation SPDE combinée à une approche de type MSTA.

4. Le dépôt du dossier est prévu début 2024.

4.2 Modélisation numérique du transport sédimentaire

4.2.1 Le couple CROCO/MUSTANG

Objectif

Améliorer la modélisation numérique des déplacements particulaires en domaine marin.

Les codes de calcul les plus courants pour la modélisation numérique du transport sédimentaire permettent de simuler séparément différents mécanismes de transport (voir ??). Aucun d'entre eux, jusqu'à ce jour, ne permet de simuler le transport de cortèges sédimentaires dans toutes ses formes, conditions et processus (voir ??).

La modélisation du transport sédimentaire à l'échelle d'une baie ou d'une mer, ne peut être envisagée pour le moment, qu'au travers de la mise en œuvre de codes de calcul couplant un modèle hydro-dynamique avec un modèle de transport sédimentaire. Le premier est en général basé sur les équations de « Navier-Stokes » (voir ??) et donne au second les informations de vitesse et direction de la masse d'eau, qui servent à définir des contraintes sur les particules solides.

Pour traiter les problématiques qui m'intéressent, j'ai choisi d'utiliser le couple CROCO (Coastal and Regional Ocean COmmunity model) (Auclair *et al.*, 2022) et MUSTANG (MUd and Sand TRANsport modellinG) (Le Hir *et al.*, 2011 ; Grasso *et al.*, 2015 ; Mengual *et al.*, 2017).

CROCO résulte de l'intégration des développements de plusieurs codes (MARS3D, HYCOM, etc.) dans ROMS-AGRIF. Ce code de calcul est capable de travailler à la fois sur des problématiques côtières (petites distances et courtes durées) et régionales (grandes distances et plus longues durées) et de gérer les interactions entre les deux.

Le code MUSTANG qui simulent le transport sédimentaire, est peut-être une des approches les plus complètes actuellement disponible, mais aussi vraisemblablement, une des plus complexes à mettre en œuvre. Le modèle MUSTANG dans sa version 2 vient d'être récemment couplé à CROCO. La thèse de Mignot (2023) a permis de dresser un premier bilan sur la manière de mettre œuvre le couple CROCO/MUSTANG. Elle a aussi mis en évidence tout le travail qui reste à réaliser pour une initialisation d'une configuration sédimentaire proche de la réalité (mélange horizontal et vertical de cortèges sédimentaires variés). Je souhaite poursuivre ce travail pour tester et surtout valider les résultats de MUSTANG.

4.2.2 Les premiers travaux avec CROCO

Question

Quels sont les effets d'une activité humaine industrielle sur l'environnement ?

Depuis 2020, le Cnam/Intechmer a identifié la baie de Tatihou comme de zone atelier pour ses travaux. Ce lieux concentre sur quelques kilomètres carrés, l'ensemble des principales problématiques côtières actuelles. Cette partie de la côte à l'est du Cotentin (Normandie, France) est sous la pression d'activités anthropiques ostréicoles et touristiques. Comme de nombreuses bordures côtières, elle est aussi sous l'action de l'évolution climatique et en particulier de la montée des eaux. Quelques lieux encore restés naturels abritent des biotopes avec des biocénoses qu'il est nécessaire de conserver.

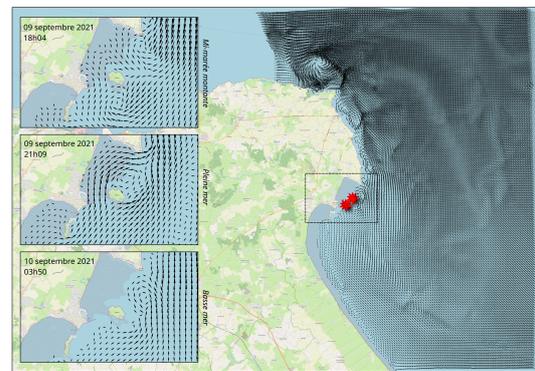
Le programme scientifique « **ET**ude **I**ntégrée du **S**ite atelier de l'**E**stuaire de la **S**aire à l'île **TA**tihou » (ETISiESTA), financé par le Conseil Départemental de la Manche, a

permis d'initier des premiers travaux dans la baie de Tatihou.

Des mesures de courantologie ont été réalisées à l'aide de deux courantomètres Doppler Seaguard en deux points distincts autour de l'Île de Tatihou (Fig. 4.5a) du 09 septembre 2021 au 07 octobre 2021. J'ai mis en place une première configuration CROCO pour la simulation des variations de vitesse et de hauteur d'eau sur un domaine couvrant l'est du Cotentin (Fig. 4.5b).



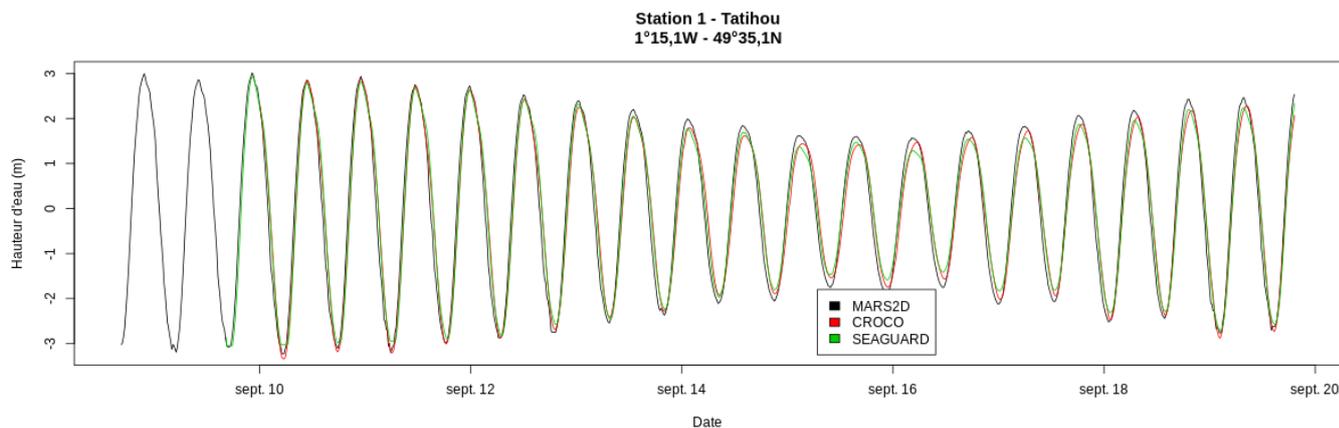
(a) Position des courantomètres Seaguard autour de l'Île de Tatihou.



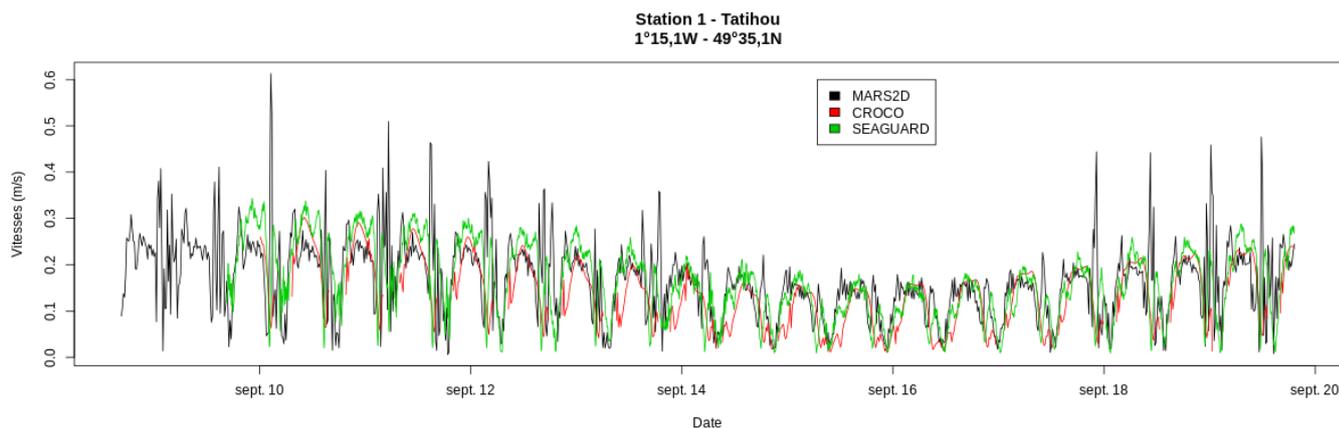
(b) Domaine de simulation CROCO et champs de vitesses.

Figure 4.5 – (a) Localisation des points de mesures de courantologie du 09 septembre 2021 au 07 octobre 2021. (b) Étendue du domaine de simulation CROCO et champs de vitesses à mi-marée, pleine mer et basse mer.

La figure 4.6 est composée de deux graphiques. La figure 4.6a met en comparaison les variations de hauteurs d'eau entre les mesures de terrain au point 1 (Fig. 4.5a) et les résultats des codes MARS2D d'une part (travail non publié de P. Bailly-du-Bois) et CROCO d'autre part. La figure 4.6b compare les variations des vitesses entre les mêmes sources.



(a) Comparaison des variations de hauteurs d'eau.



(b) Comparaison des variations de vitesses.

Figure 4.6 – (a) Variations des hauteurs d'eau et (b) des vitesses, entre les mesures de terrain Doppler (vert) et les résultats des sorties de modèles Mars2D (noir) et CROCO (rouge) sur le point 1 ($1^{\circ}15,1W - 49^{\circ}35,1N$) (Fig. 4.5a).

Ces premiers travaux sont relativement positifs. La simulation des variations des hauteurs d'eau issue du modèle CROCO est bien en accord avec les mesures, notamment sur la période de morte-eau (entre les 14 et 18 septembre). Pour les vitesses, les résultats CROCO surestiment légèrement par rapport aux mesures, mais ne présentent pas de sauts erratiques comme ceux présents sur les résultats de la simulation MARS2D.

Il reste à prendre en considération l'impact des tables ostréicoles sur les courants. La différence entre les résultats du modèle CROCO et les mesures des courants sur la deuxième station (Fig. 4.5a), montre que le modèle surestime en ce lieu des vitesses des courants, bien que les directions soient justes. Ce résultat s'explique par le fait que la présence des tables qui constituent des obstacles à la circulation de la masse d'eau, n'est pas prise en compte dans le modèle.

4.2.3 RANS et LBM

Objectif

Raccorder échelles régionales et locales dans un modèle de transport sédimentaire.

En aquaculture

Dans [Poizot *et al.* \(2016\)](#), nous avons mis en évidence le piégeage de particules en suspension dans le sillage des structures immergées et qu'il existait un phénomène d'« auto-contamination » des cages de production. Dans ce travail, ces dernières étaient considérées imperméables au passage du courant ainsi qu'aux particules.

Pour rendre compte de manière encore plus fidèle des conditions environnementales réelles, les structures modélisées doivent être perméables au passage de l'eau et des sédiments. La simulation de l'organisation des courants autour et à l'intérieur de structures immergées ouvre des perspectives intéressantes pour quantifier les flux d'éléments dissous (niveau d'oxygène, concentration en nutriments, etc.) et particulaires (fraction fine, sable fin, fèces, etc.). Ces informations sont cruciales pour l'aquaculteur qui doit connaître son potentiel de production et vérifier les bonnes conditions environnementales d'élevage ou de cultures. Elles sont aussi importantes pour les gestionnaires et les responsables de la conservation du milieu, pour estimer l'impact de l'activité industrielle.

La figure 4.7 correspond à un résultat d'une simulation LBM en 3D de structures immergées représentant une série de cages de production de saumons présentes en rade de Cherbourg. Les cages sont représentées par des parallélépipèdes (au nombre de 8). Les frontières des cages sont perméables au courant. Les vitesses les plus fortes sont représentées en rouge et les plus faibles en bleu.

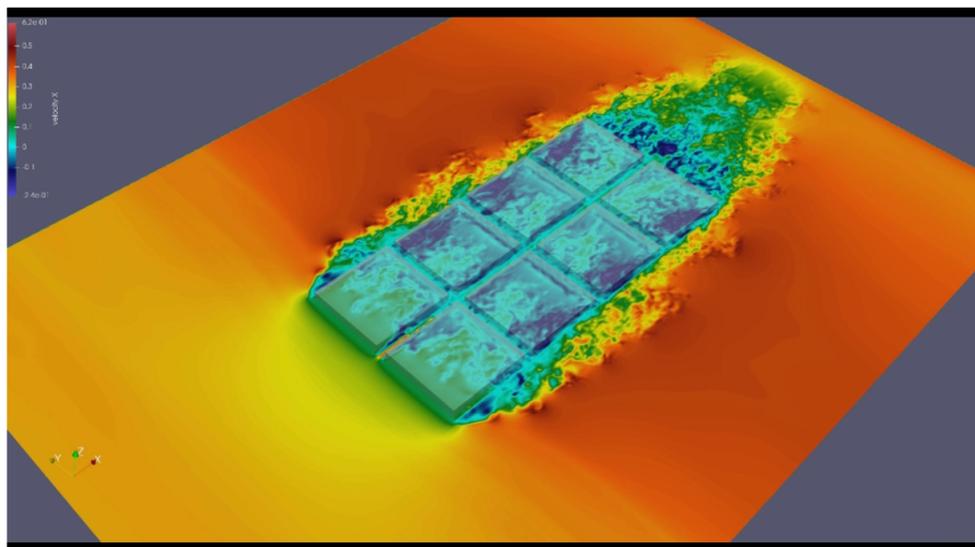


Figure 4.7 – Simulation LBM en 3D de la circulation fluide autour et à l'intérieur de structures immergées.

Pour ne pas avoir des temps de calculs trop importants, la grille de calcul utilisée dans ce cas possède une résolution de $\Delta x = 20$ cm. Cette valeur ne permet pas de modéliser complètement les mailles des filets des cages. Ces derniers sont modélisés via une approche *Actuator Line Model* (ALM) ([Shamsoddin & Porté-Agel, 2014](#)), aussi mise en œuvre dans [Grondeau *et al.* \(2019\)](#) pour modéliser une hydrolienne à axe vertical. Pour réaliser des simulations à des nombres de Reynolds suffisamment important ($Re \geq 10^5$) afin d'être

le plus proche possible des conditions réelles, un modèle de turbulence de sous maille de type LES est utilisé, ce qui aboutit à un modèle ALM-LBM-LES. L'opérateur de collision LBM choisit est de type *regularized BGK* (voir 3.1) pour ces caractéristiques de stabilité (Malaspinas, 2015).

J'ambitionne de poursuivre des travaux avec la LBM dans l'objectif de mettre en place des modélisations imbriquées CROCO-LBM. Les échelles de validité les plus fines permises avec CROCO se superposent aux échelles de travail les plus larges encore accessibles avec la LBM (Fig. 4.8). La capacité de la LBM à résoudre l'écoulement avec de fortes résolutions autour d'objets ou structures présents dans la masse d'eau (voir 3.3), va donner des informations de haute résolution pour aider à contraindre l'écoulement aux nœuds des modèles CROCO avec une résolution moins bonne.

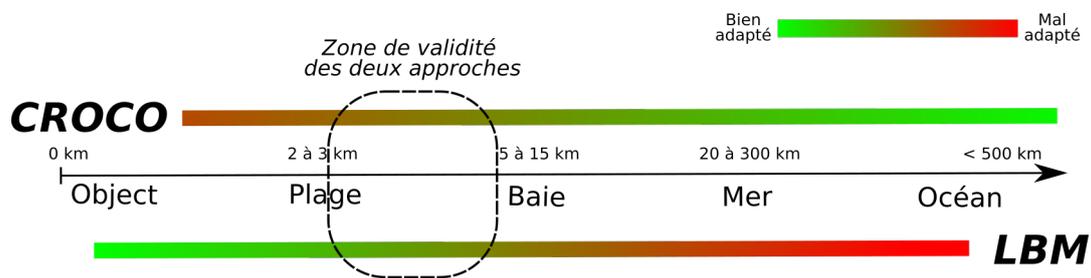


Figure 4.8 – Raccordement des échelles de travail entre CROCO et la LBM.

En ostréiculture

Je compte appliquer la même approche dans le cadre du second volet du programme PROTEC⁵ qui va démarrer en septembre 2023. Un aspect de ce programme concerne la mise en place d'un modèle hydro-sédimentaire dans l'anse du Cul-de-Loup (est Cotentin, Normandie, France) que je dois prendre en charge.

Dans cette anse est pratiquée depuis de nombreuses années la culture d'huîtres. Le nombre de concessions d'exploitation est longtemps resté relativement constant, ce qui avait permis d'atteindre un certain état d'équilibre environnemental. A la fois des travaux d'endigement au nord-est de l'anse et il y a un peu plus de vingt ans, une augmentation progressive du nombre de concessions, ont détruit cet équilibre. Aujourd'hui l'anse du Cul-de-Loup est à environ 60% couverte par des tables ostréicoles (Fig. 4.9). L'équilibre environnemental a été rompu. D'un côté, un fort engraissement sédimentaire du fond de la baie est enregistré allant de paire avec la disparition de certaines populations végétales, en particulier des zoostères. De l'autre côté, les producteurs notent une diminution de leur rendement, avec une forte disparité à l'intérieur de la baie.

5. **Projet de Territoire** : Anse du Cul-de-Loup. Projet régional financé par l'Agence de l'eau Seine-Normandie.



(a) <https://www.expedia.nl>.



(b) <https://www.communes.com>.

Figure 4.9 – Zones de culture d’huîtres sur table aux abords de Saint-Vaast-La-Hougue.

Le premier volet du programme PROTEC a permis de dresser un état des lieux de l’état environnemental de l’anse du Cul-de-Loup. Grâce à ce travail, le fonctionnement hydro-sédimentaire de l’anse est globalement connu.

Il reste néanmoins encore difficile de réaliser des prévisions sur le devenir de cet anse dans un contexte d’augmentation du niveau moyen des mers. Les incertitudes augmentent encore avec le fait que depuis un an environ, certains producteurs ostréicoles changent leur technique de culture pour passer des tables classiques (Fig. 4.9), à de nouvelles structures de production, plus imposantes.

La mise en place d’un modèle hydro-sédimentaire de l’anse du Cul-de-Loup peut aider à répondre à la question sur son devenir. Il peut aussi, dans le même temps, être un outil pour tester d’éventuelles propositions pour une gestion raisonnée et résiliente (pour l’industrie et l’environnement) de l’anse.

Dans un premier temps, un modèle CROCO/MUSTANG va se baser sur les résultats de PROTEC (premier volet) et va avoir comme objectif de retransmettre le fonctionnement hydro-sédimentaire tel qu’il a été observé. Pour la partie hydrodynamique, ce modèle va profiter de l’expérience acquise dans le cadre du travail dans la baie de Saint-Vaast-la-Hougue (voir 4.2.2), les conditions hydrodynamiques étant très proches entre les deux zones. Le modèle sédimentaire MUSTANG va profiter, quant à lui, de l’expérience acquise dans le cadre de la thèse de Mme Morgane Mignot (Mignot, 2023), les cortèges sédimentaires dans la zone étant relativement homogènes.

En parallèle, des modèles ALM-LBM-LES vont être construits afin de fournir des informations précises de contraintes hydrodynamiques à l’échelle, pour les premiers, de plusieurs linéaires de table de production telles que celles en cours d’utilisation et pour les seconds, de plusieurs linéaires des nouvelles structures de production en cours de déploiement. Cette mise en place va se nourrir des travaux sur les cages de production de saumons de la rade de Cherbourg (Fig. 4.7). Ainsi, les différences de contraintes hydrodynamiques vont être prise en compte dans le modèle CROCO et donner une estimation de l’impact du nouveau mode production.

4.3 Conclusion

Les réflexions de fond sur la nouvelle démarche MSTA que je souhaite proposer prochainement, ont tiré profit du travail préliminaire réalisé dans [Baux *et al.* \(2022\)](#). La généralisation de GSTA s'accompagne d'une complexification de la méthode, mais c'est à mon sens le prix à payer pour avoir de meilleurs résultats. Il reste encore des points de fonds importants à régler, notamment dans le choix du modèle à inférer. Cet aspect est encore à travailler, mais des pistes ont déjà été testées, pour identifier les variables les plus appropriées dans la définition du modèle.

La composante géographique naturelle aux données environnementales (la position géographique de l'information), confère aux méthodes d'analyses telles que MSTA d'être intégrées dans un SIG. Dans un tel environnement l'approche MSTA complète ses capacités à déterminer les directions de transport des sédiments, en prenant en compte, les limites physiques du domaine, un obstacle ou encore la bathymétrie de la zone d'étude. Concrètement, MSTA va être intégré à un logiciel SIG.

Enfin dans la constante recherche de l'amélioration de l'analyse des variables environnementales, les SPDE offrent de nouvelles perspectives dans la définition de modèles d'évolutions en ajoutant dans l'analyse la dimension temporelle à celle spatiale déjà prise en compte. Cette unification est nécessaire pour tirer pleinement profit des données récoltées de manière récurrente sur un domaine. Les SPDE doivent ainsi permettre de mieux séparer les variations cycliques des tendances de fond.

La région Normandie, entres autres, est une région importante de production d'huîtres et de moules. L'implantation sur le littoral de ce type d'exploitation a des effets environnementaux majeurs sur les zones investies. Les modèles numériques sont des outils supplémentaires qui doivent permettre un accompagnement des producteurs pour une meilleur gestion de leur production et des conditions environnementales qui règnent au sein de leur exploitation. Ils peuvent aussi donner des indications aux gestionnaires du domaine public littoral sur les mesures et les décisions à prendre en matière de conservation des activités économiques et de l'environnement. Le mélange d'échelles de travail et des processus nécessaires à prendre en compte vont réclamer de la même manière un mixage des approches numériques. Dans ce cadre, l'utilisation conjointe de codes de calculs LBM et RANS est à mon sens une démarche à explorer.

Chapitre 5

Conclusion générale

L'utilisation et surtout le développement des outils et pratiques numériques ont toujours été au cœur de tous mes travaux en géoscience. A l'origine, cette double approche n'a pas été aussi aisée à pratiquer qu'elle peut l'être à l'heure actuelle. Depuis, le numérique ayant envahi tous les secteurs et domaines des géosciences, l'emploi de l'informatique est devenu évident, presque nécessaire.

Mon poste d'ingénieur d'études puis maintenant d'ingénieur de recherche avec sa composante informatique forte, aurait pu me cantonner à des activités de laboratoire plus qu'à celles de terrain. Bien au contraire, j'attache une très grande importance à l'observation et à la mesure *in-situ*. Une grande partie des travaux que j'ai réalisés, l'ont été dans l'objectif d'une exploitation toujours plus poussée des données récoltées.

Je considère l'information de terrain comme un fait. Toute la difficulté dans sa captation, réside dans une mesure appropriée et précise. Dans cet objectif, le choix de la nature et du moyen de mesure est un premier point fondamental. Un second point réside dans la maîtrise de la chaîne d'acquisition de l'information pour en éliminer autant que possible, toutes les sources d'incertitudes. Parce que la donnée de terrain est souvent parcimonieuse et qu'en domaine marin elle a un coût plus élevé qu'à terre, « faire parler » l'information de terrain au maximum est une recherche permanente dans mes travaux.

Pour la détermination des directions de transport des sédiments, la démarche GSTA (voir Chap. 2) se base sur des échantillons de terrain et sur l'idée que les cortèges sédimentaires présents ont enregistré la ou les traces du ou des processus de transport. Toutes les propositions faites dans mes différentes publications et celles à venir, sont motivées par la recherche des meilleurs proxies du transport et de la façon la plus efficace de les mettre en évidence. La démarche MSTA poursuit dans ce sens.

En géomatique, la recherche du passage vers le numérique est permanente. Lorsqu'on observe (par la mesure, notamment) les processus *in-situ* dans toute leur complexité, leur traduction informatique va s'attacher à retransmettre cette même complexité. C'est pourquoi, dans le travail préalable de modélisation les vitesses et directions des courants, nécessaires pour modéliser le transport des sédiments, je me suis d'abord intéressé à l'approche LBM (voir Chap. 3). Les moyens de calcul déceimment accessibles ne permettent pas à la LBM des modélisations hydrodynamiques sur de grandes emprises, néanmoins elle peut donner des informations plus précises pour aider les simulations aux échelles régionales.

Depuis quelques années, un regain d'intérêt apparaît dans le domaine de l'« Intelligence Artificielle » (IA). Les technologies de l'IA sont aujourd'hui massivement utilisées, notamment par les grandes sociétés de l'Internet, qui ont développé, entres autres, des

outils leur permettant d'adapter dynamiquement les contenus des pages Web à quasiment chaque utilisateur. Ce nouvel engouement est du au fait que ces technologies intéressent aussi d'autres secteurs que celui de l'Internet, tels que ceux de l'automobile, la médecine ou la défense, pour n'en citer que quelques uns. L'IA permet de traiter et d'analyser de grandes quantités de données de manière plus efficace, d'automatiser des tâches complexes et d'améliorer les prévisions et les modèles. Elle est déjà largement utilisée en géosciences tel que, dans l'exploration pétrolière et gazière, la cartographie, la prévision des risques naturels et climatiques, la modélisation et simulation ou encore les énergies renouvelables. Il y a donc un intérêt évident à l'utilisation de cet outil dans les travaux que je souhaite poursuivre.

En septembre 2022, j'ai été sollicité pour participer à l'encadrement de la thèse de Mme Sebastian Anju : « Quantification et réduction des incertitudes dans les modèles d'écoulements côtiers - Application à la presqu'Île du Cotentin » hébergée au LUSAC sous la direction de M. Jérôme Thiébot de l'Université Caen Normandie. L'objectif consiste, pour l'essentiel, à identifier puis minimiser les incertitudes dans les résultats des modèles numériques hydrodynamiques. Ce travail va intégrer à ma demande, un volet traitant de l'utilisation de réseaux de neurones. S'agissant soit de l'optimisation de paramètres d'entrée des modèles, soit dans la mise en place de méta-modèles, l'IA, via des réseaux de neurones d'apprentissage profond, est une voie à investiguer pour apporter des éléments de réponses à la problématique de cette thèse.

A moyen terme, pour aider à assembler les résultats des modèles de large emprise avec ceux de plus petite emprise dans le cadre du transport sédimentaire, je souhaite m'appuyer sur les résultats de la thèse de Mme Sebastian Anju pour investiguer les possibilités des outils IA, à faciliter le mixage d'information issue des modèles. En intégrant cette démarche dans le cadre de la géomatique, j'y vois les possibilités d'unification à la fois des résultats de terrain, issus notamment de l'approche MSTA, avec ceux des modèles numériques, les premiers venant en contrainte de validation des seconds.

L'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) est de mon point de vue une reconnaissance de compétence en matière de recherche. Aussi, la possibilité de superviser des étudiants en doctorat, augmente les capacités d'explorer des thèmes et axes de recherche nouveaux et participe ainsi à maintenir un dynamisme au sein de l'équipe de recherche.

Bibliographie

- Asselman, N.E.M. 1999. Grain-size trends used to assess the effective discharge for flood-plain sedimentation, river Waal. *The Netherlands. Journal of Sedimentary Research*, **69**(1), 51–61.
- Aubry, P. 2000. *Le traitement des variables régionalisées en écologie. Apports de la géomatique et de la géostatistique*. Thèse de Doctorat, Université CLAUDE BERNARD - LYON 1, France.
- Auclair, Francis, Benshila, Rachid, Bordoï, Lucie, Boutet, Martial, Brémond, Maurice, Caillaud, Matthieu, Cambon, Gildas, Capet, Xavier, Debreu, Laurent, Ducouso, Nicolas, Dufois, François, Dumas, Franck, Ethé, Christian, Gula, Jonathan, Hourdin, Christophe, Illig, Serena, Jullien, Swen, Corre, Matthieu Le, Gac, Solène Le, Gentil, Sylvie Le, Lemarié, Florian, Marchesiello, Patrick, Mazoyer, Camille, Morvan, Guillaume, Nguyen, Cyril, Penven, Pierrick, Person, Renaud, Pianezze, Joris, Pous, Stéphane, Renault, Lionel, Roblou, Laurent, Sepulveda, Andres, & Theetten, Sebastien. 2022. *Coastal and Regional Ocean COmmunity model*.
- Barnard, P.L., Foxgrover, A.C., E.P.L., Elias, Erikson, L.H., Hein, J.R., McGann, M., Mizell, K., Rosenbauer, R.J., Swarzenski, P.W., Takesue, R.K., Wong, F.L., & Woodrow, D.L. 2013. Integration of bed characteristics, geochemical tracers, current measurements, and numerical modeling for assessing the provenance of beach sand in the San Francisco Bay Coastal System. *Marine Geology*, **345**(nov), 181–206.
- Bartholdy, J., Christiansen, C., & Pedersen, J.B.T. 2007. Comparing spatial grain-size trends inferred from textural parameters using percentile statistical parameters and those based on the log-hyperbolic method. *Sedimentary Geology*, **202**(3), 436–452.
- Baux, N. 2018 (Nov.). *Dynamique d'habitats benthiques sous contraintes anthropiques : le cas du site de dépôt de dragage d'Octeville*. Ph.D. thesis, Normandie Université.
- Baux, N., Pezy, J-P., Bachelet, Q., Baffreau, A., Méar, Y., Poizot, E., Guyonnet, B., & Dauvin, J-C. 2017. Soft bottom macrobenthic communities in a semi-enclosed Bay bordering the English Channel : The Rade de Cherbourg. *Regional Studies in Marine Science*, **9**, 106 – 116.
- Baux, N., Murat, A., Faivre, Q., Lesourd, S.c, Poizot, E., Méar, Y., Brasselet, S.n, & Dauvin, J-C. 2019. Sediment dynamic equilibrium, a key for assessing a coastal anthropogenic disturbance using geochemical tracers : Application to the eastern part of the Bay of Seine. *Continental Shelf Research*, **175**, 87–98.
- Baux, N., Murat, A., Poizot, E., Méar, Y., Gregoire, G., Lesourd, S, & Dauvin, J-C. 2022. An innovative geostatistical sediment trend analysis using geochemical data to highlight sediment sources and transport. *Computational Geosciences*, **26**(2), 263–278.
- Bellido, C., Anfuso, G., Plomaritis, T. A., & Rangel-Buitrago, N. 2011. Morphodynamic behaviour, disturbance depth and longshoretransport at Camposoto Beach (Cadiz, SW Spain). *Journal of Coastal Research*, **64**, 35–39.

- Bhatnagar, P. L., Gross, E. P., & Krook, M. 1954. A Model for Collision Processes in Gases. I. Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component Systems. *Physical Review*, **94(3)**, 511–525.
- Boltzmann, L. 1872. Weitere studien über das wärme-gleichgewicht unter gasmolekülen. *Wien. Ber.*, **66**, 275–370.
- Boltzmann, L., & Nabl, J. 1904. *Encyklopädie der Mathematischen Wis-senschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen*. Spinger. Chap. Kinetische theorie der materie, page 600.
- Bonnot-Courtois, C., Caline, B., L’Homer, A., & Le Vot, M. 2002. *The Bay of Mont-Saint-Michel and the Rance Estuary*. Editions Technip.
- Cartier, A., & Héquette, A. 2013. The influence of intertidal bar-trough morphology on sediment transport on macrotidal beaches, northern France. *Zeitschrift für Geomorphologie*, **57(3)**, 325–347.
- Caude, G., Clément, P., Pillet, D., & Vindimian, E. 2017. *Gestion sédimentaire de l’estuaire de la Rance*. Tech. rept. Ministère de l’Environnement, de l’Énergie de la Mer et le Ministère de l’Économie et des Finances.
- Chang, Y. H., Scrimshaw, M. D., & Lester, J. N. 2001. A revised Grain-Size Trend Analysis program to define net sediment transport pathways. *Computers & Geosciences*, **27**, 109–114.
- Cordier, E., Poizot, E., & Méar, Y. 2012. Swell impact on reef’s sedimentary processes : a case study of the La Reunion fringing reef. *Sedimentology*, **59(7)**, 2004–2023.
- Coreixas, C. G. 2018 (Feb.). *High-order extension of the recursive regularized lattice Boltzmann method*. Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- De Rock, P., Hattab, T., & Vaz, S. 2021. *Etude du risque d’effet des espèces halieutiques à l’éolien flottant dans le Golfe du Lion : rapport technique et méthodologique*. Tech. rept. Institut Français pour la Recherche et l’Exploitation de la Mer.
- Dellar, P. J. 2001. Bulk and shear viscosities in lattice Boltzmann equations. *Phys. Rev. E.*, **64**, 031203.
- Dincer, I., Rosen, M. A., & Khalid, F. 2018. Ocean (Marine) Energy Production. *Pages 335–379 of : Comprehensive Energy Systems*. Elsevier.
- Florens, E. 2010. *Couche limite turbulente dans les écoulements à surface libre : étude expérimentale d’effets de macro-rugosités*. Ph.D. thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse III, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), UMR 5502.
- Folley, M. 2016. *Numerical Modelling of Wave Energy Converters*. Elsevier Science & Technology Books.
- Gao, S. 1996. A Fortran program for grain-size trend analysis to define net sediment transport pathways. *Computers & Geosciences*, **22(4)**, 449–452.
- Gao, S., & Collins, M.B. 1991. A critique of the ”McLaren method” for defining sediment transport paths-discussion. *Journal of Sedimentary and Petrology*, **61(1)**, 143–146.
- Gao, S., & Collins, M.B. 1992. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of ”transport vectors”. *Sedimentary Geology*, **80**, 47–60.

- Grasso, F., Le Hir, P., & Bassoullet, P. 2015. Numerical modelling of mixed-sediment consolidation. *Ocean Dynamics*, **65**(4), 607–616.
- Grondeau, M. 2018 (Dec.). *Modélisation des effets de sillage d’une hydrolienne avec la méthode de Boltzmann sur réseau*. phdthesis, Normandie Université.
- Grondeau, M., Guillou, S., Mercier, P., & Poizot, E. 2019. Wake of a Ducted Vertical Axis Tidal Turbine in Turbulent Flows, LBM Actuator-Line Approach. *Energies*, **12**(22), 4273.
- Guo, Z., & Shu, C. 2013. *Lattice Boltzmann Method and its Application in Engineering*. World Scientific.
- Guo, Z., Zheng, C., & Shi., B. 2002. Discrete lattice effects on the forcing term in the lattice Boltzmann method. *Physical Review E.*, **65**(046308).
- Hardy, J., Pomeau, Y., & de Pazzis, O. 1973. Time evolution of a two-dimensional model system. i. invariant states and time correlation functions. *Journal of Mathematical Physics*, **14**(12), 1746–1759.
- He, X., Shan, X., & Doolen, G. D. 1998. Discrete Boltzmann equation model for non ideal gases. *Phys. Rev. E.*, **57**, R13–R16.
- Jalihai, P., De Roeck, Y-H., Soede, M., & e Melo, A. B. 2021. *White Paper on Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)*. Tech. rept. IEA Technology Programme for Ocean Energy Systems (OES).
- Jarrin, N. 2008. *Synthetic Inflow Boundary Conditions For The Numerical Simulation Of Turbulence*. Ph.D. thesis, University of Manchester.
- Jeong, J., & Hussain, F. 1995. On the identification of vortex. *Journal of Fluid Mechanics*, **285**, 69–94.
- Kawakami, G., Nishina, K., & Poizot, E. 2021. Dominant updriftward sediment transport on the updrift-side of a modern deflected delta, Ishikari coast, Hokkaido, Japan. *Marine Geology*, **436**(jun), 106480.
- Kervella, Y. 2010. *The impact of oyster farming structures on hydrodynamics and sediment dynamics*. Thesis, Université de Caen Basse-Normandie.
- Kolmogorov, A. N. 1941a. Dissipation of energy in locally isotropic turbulence. *Doklady Akademii Nauk*, **32**, 16–18.
- Kolmogorov, A. N. 1941b. Equations of turbulent motion in an incompressible fluid. *Doklady Akademii Nauk*, **4**, 299–303.
- Kolmogorov, A. N. 1941c. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds number. *Doklady Akademii Nauk*, **30**, 9–13.
- Krumbein, W.C. 1938. Size frequency distribution of sediments and the normal phi curve. *Journal of Sedimentary Petrology*, **8**, 84–90.
- Latt, J., Malaspinas, O., Kontaxakis, D., Parmigiani, A., Lagrava, D., Brogi, F., Ben Belgacem, M., Thorimbert, Y., Leclaire, S., Li, S., Marson, F., Lemus, J., Kotsalos, C., Conradin, R., Coreixas, C., Petkantchin, R., Raynaud, F., Beny, J., & Chopard, B. 2021. Palabos : Parallel Lattice Boltzmann Solver. *Computers & Mathematics with Applications*, **81**(jan), 334–350.

- Le Hir, P., Cayocca, F., & Waeles, B. 2011. Dynamics of sand and mud mixtures : A multiprocess-based modelling strategy. *Continental Shelf Research*, **31**(10), S135–S149.
- Le Roux, J. P. 1994a. A spreadsheet template for determining sediment transport vectors from grain-size parameters. *Computers & Geosciences*.
- Le Roux, J.P. 1994b. An alternative approach to the identification of net sediment transport paths based on grain-size trends. *Sedimentary Geology*, **94**, 97–107.
- Le Roux, J.P. 1994c. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors" - comment. *Sedimentary Geology*, **90**, 153–156.
- Le Roux, J.P., & Rojas, E.M. 2007. Sediment transport patterns determined from grain size parameters : Overview and state of the art. *Sedimentary Geology*, **202**(3), 473–488.
- Le Roux, J.P., O'Brien, R.D., Rios, F., & Cisternas, M. 2002. Analysis of sediment transport paths using grain-size parameters. *Computers & Geosciences*, **28**, 717–721.
- Legroux, N., Ponchon, A., Poirson, C., & Michel, S. 2017. *Synthèse bibliographique sur les oiseaux migrants, nicheurs hivernants dans le détroit du Pas-de-Calais*. Tech. rept. Groupe ornithologique et naturaliste du Nord Pas-de-Calais, Centre écologie fonctionnelle et évolutive et Agence des Aires Marines Protégées.
- Lindgren, F., Rue, H., & Lindström, J. 2011. An Explicit Link between Gaussian Fields and Gaussian Markov Random Fields : The Stochastic Partial Differential Equation Approach. *Journal of the Royal Statistical Society Series B : Statistical Methodology*, **73**(4), 423–498.
- Lindgren, F., Bolin, D., & Rue, H. 2022. The SPDE approach for Gaussian and non-Gaussian fields : 10 years and still running. *Spatial Statistics*, **50**(aug), 100599.
- Maillet, G., Poizot, E., Sabatier, F., Vella, C., & Méar, Y. 2011. Pattern of Sediment Transport in a Microtidal River Mouth Using Geostatistical Sediment-Trend Analysis. *Journal of Sedimentary Research*, **81**, 138–152.
- Malaspinas, O. 2015. Increasing stability and accuracy of the lattice Boltzmann scheme : recursivity and regularization. *Fluid Dynamics*.
- Marie, S., Ricot, D., & Sagaut, P. 2009. Comparison between Lattice Boltzmann Method and NavierStokes high order schemes for computational aeroacoustics. *Journal of Computational Physics*, **228**, 1056–1070.
- Masselink, G. 1992. Longshore variation of grain size distributions along the coast of the Rhone Delta, Southern France : a test of the Mc Laren Model. *Journal of Coastal Research*, **8**, 286–291.
- Matheron, G. 1965. *Les variables régionalisées et leur estimation. Une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature*. Masson, Paris, France.
- McLaren, P. 1981. An interpretation of trends in grain size measures. *Journal of Sedimentary Petrology*, **51**, 611–624.
- McLaren, P., & Bowles, D. 1985. The effects of sediments transport on grain-size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology*, **55**, 4577–470.

- McLaren, P., Hill, S. H., & Bowles, D. 2007. Deriving transport pathways in a sediment trend analysis (STA). *Sedimentary Geology*, **202**(3), 489 – 498. From Particle Size to Sediment Dynamics.
- McNamara, G. R., & Zanetti, G. 1988. Use of the boltzmann equation to simulate lattice-gas automata. *Physical Review L*, **61**(20).
- Mengual, B., Le Hir, P., Cayocca, F., & Garlan, T. 2017. Modelling Fine Sediment Dynamics : Towards a Common Erosion Law for Fine Sand, Mud and Mixtures. *Water*, **9**(8), 564.
- Mercier, P. 2019 (Mar.). *Modélisation de la turbulence engendrée par la morphologie du fond dans le Raz Blanchard : approche locale avec la LBM-LES*. phdthesis, Normandie Université.
- Mignot, M. 2023 (Oct.). *Modélisation hydro-sédimentaire des transports particulaires en domaine marin hétérogène, application au suivi des radionucléides en zone portuaire*. phdthesis, Université Caen Normandie.
- Mycek, P., Gaurier, B., Germain, G., Pinon, G., & Rivoalen, E. 2014. Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour. Part I : One single turbine. *Renewable Energy*, **66**(jun), 729–746.
- Nakayama, A. 1985. Characteristics of the flow around conventional and super-critical airfoils. *Journal of Fluid Mechanics*, **160**, 155–179.
- Nie, X. B., Shan, X., & Chen, H. 2008. Galilean invariance of lattice Boltzmann models. *Europhys. Lett.*, **81**(3), 34005.
- Pandarínath, K., & Narayana, A. C. 1993. Computer program for the determination of grain-size statistics and sediment transport direction. *Computer & Geosciences*, **19**(5), 735–743.
- Pedrerós, R. 1995. *Caractérisation de la dynamique sédimentaire à partir de l'analyse statistique des variations spatiales de la granulométrie de surface (procédure analytique de Gao et Collins)*.
- Pedrerós, R., Howa, H. L., & Michel, D. 1996. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas. *Marine Geology*, **135**, 35–49.
- Peskin, C. S. 1977. Numerical analysis of blood flow in the heart. *Journal of Computational Physics*, **48**.
- Petitjohn, F.G., & Ridge, J.D. 1938. A textural variation series of beach sands from Cedar point. Ohio. *Journal of Sedimentology and Petrology*, **2**(2), 76–88.
- Plomaritis, T.A., Puyana-Cruces, I., Benavente, J., & Rodríguez-Polo, S. 2013. Can grain size trend analysis be used to identify aeolian sediment transport pathways? The case of Bolonia dune (SW Spain). *Journal of Coastal Research*, **165**(jan), 1325–1330.
- Plumley, W.J. 1948. Black Hills terrace gravels : a study in sediment transport. *Journal of Geology*, **56**(6), 526–577.
- Poggio, L., Gimona, A., Spezia, L., & Brewer, M. J. 2016. Bayesian spatial modelling of soil properties and their uncertainty : The example of soil organic matter in Scotland using R-INLA. *Geoderma*, **277**(sep), 69–82.

- Poizot, E., & Méar, Y. 2008. eCSedtrend : A new software to improve sediment trend analysis. *Computers & Geosciences*, **34**(7), 827 – 837.
- Poizot, E., & Méar, Y. 2010. Using a GIS to enhance grain size trend analysis. *Environmental Modelling & Software*, **25**(4), 513 – 525.
- Poizot, E., Méar, Y., Thomas, M., & Garnaud, S. 2006. The application of geostatistics in defining the characteristic distance for grain size trend analysis. *Computers & Geosciences*, **32**(3), 360 – 370.
- Poizot, E., Méar, Y., & Biscara, L. 2008. Sediment Trend Analysis through the variation of granulometric parameters : A review of theories and applications. *Earth-Science Reviews*, **86**(1-4), 15–41.
- Poizot, E., Anfuso, G., Méar, Y., & Bellido, C. 2013. Confirmation of beach accretion by grain-size trend analysis : Camposoto beach, Cádiz, SW Spain. *Geo-Mar. Lett.*, **33**(03).
- Poizot, E., Verjus, R., N’Guyen, H.Y., Angilella, J.R., & Mear, Y. 2016. Self-contamination of aquaculture cages in shallow water. *Environmental Fluid Mechanics*, **16**, 793–805.
- Poletto, R., Craft, T., & Revell, A. 2013. A new divergence free synthetic eddy method for the reproduction of inlet flow conditions for LES. *Flow Turbulence Combust*, **91**, 519–539.
- Schäfer, M., Turek, S., Durst, F., Krause, E., & Rannacher, R. 1996. *Benchmark Computations of Laminar Flow Around a Cylinder*. Vieweg+Teubner Verlag. Pages 547–566.
- Shamsoddin, S., & Porté-Agel, F. 2014. Large Eddy Simulation of Vertical Axis Wind Turbine Wakes. *Energies*, **7**(2), 890–912.
- Shan, X., & Chen, H. 2007. A general multiple-relaxation-time Boltzmann collision model. *Int. J. Mod. Phys. C.*, **18**(04), 635–643.
- Shan, X., Yuan, X.-F., & H. Chen, H. 2006. Kinetic theory representation of hydrodynamics: a way beyond the Navier-Stokes equation. *J. Fluid Mech.*, **550**, 413–441.
- Shannon, C. E. 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, **27**, 379–423 and 623–656.
- Tikhomirov, V. M. 1991. On the Degeneration of Isotropic Turbulence in an Incompressible Viscous Fluid. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 319–323.
- Trentesaux, A. 2005. *Enregistrement de processus sédimentaires pléistocènes Exemples de plates-formes détritiques et de bassins profonds Mer du Nord et mers de Chine*. HDR thesis, University of Lille, France.
- Turing, A. M. 1937. On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, **s2-42**(1), 230–265.
- Viggen, E. M. 2014. Acoustic equations of state for simple lattice Boltzmann velocity sets. *Phys. Rev. E.*, **90**, 013310.
- Vincent, C., Brevart, C., Rault, C., Poirson, C., Leman, V., Dutilleul, S., Cohez, V., Noël, C., & Karpouzopoulos, J. 2017. *Synthèse des connaissances sur les mammifères marins et les chiroptères dans le détroit du Pas-de-Calais*. techreport. Convention AAMP/16/120 DunkRisk - CMNF, CEBC.
- Wood, S. L., & Deiterding, R. 2015. A Lattice Boltzmann Method for horizontal axis wind turbine simulation. *In : 14th International Conference on wind engineering*.

Annexe A

Curriculum Vitae



Emmanuel Poizot

Ingénieur de recherche en Géosciences Marines

Formation

- 2009 **Thèse de Doctorat**, *Université Via-Domitia*, Perpignan, Très honorable avec félicitations
Océanologie
- 1992–1993 **DESS**, *Université Paris VI*, Paris, Bien
Informatique Appliquée aux Sciences de la Terre

Expérience

- Depuis 2023 **Ingénieur de recherche**, *Cnam-Intechmer*, Cherbourg-en-Cotentin
Informatique et recherche en géosciences marines
- 1995–2022 **Ingénieur d'études**, *Cnam-Intechmer*, Cherbourg-en-Cotentin
Informatique et recherche en géosciences marines
- 1993–1995 **Ingénieur d'études**, *S.I.R.S.*, Wasquehal
Ingénieur R&D en Systèmes d'Informations Géographiques

Langues

- Anglais Lu, parlé, écrit
Français Langue maternelle

Compétences informatiques

Développement et maintenance de site Web (Wordpress, K-Sup)
Configuration de serveurs et équipements d'interconnexions réseaux
Développement logiciels scientifiques et codes de calculs numériques en environnement parallèle (Python, C++, Fortran, langage R)

Compétences en océanographie et océanologie

Gestion de projets et de programmes scientifiques
Organisation et participation à des campagnes de mesures en mer (géophysique, courant, sédiment, benthos, etc.)

21, George Sand – 50110 Cherbourg-en-Cotentin – France

☎ 06 21 42 54 88 • ☎ 02 33 88 73 42

✉ emmanuel.poizot@lecnam.net

Analyse numérique de données statistiques et géostatistiques en gros volume
Modélisation numérique hydro-sédimentaire (CROCO-MUSTANG, LBM)

Publications dans des revues scientifiques à comité de lecture

40 publications dont 9 en 1^{er} auteur.

Conférences

41 conférences dont 16 présentées par moi-même.

Encadrements scientifiques

Post-doctorant(es)

2021-2022 Participation à l'encadrement de Clément Calvino

2018-2019 Participation à l'encadrement de Noémie Baux

2017-2019 Participation à l'encadrement Lucille Furgerot

Thèses

2019-2023 Morgane Mignot (30%) : « Modélisation hydro-sédimentaire des transports particuliers en domaine marin hétérogène, application au suivi des radionucléides en zone portuaire »

2017-2019 Philippe Mercier (30%) : « Modélisation de la turbulence engendrée par la morphologie du fond marin : Approche locale LBM-LES »

2016-2018 Mikael Grondeau (30%) : « Modélisation des effets de sillage d'une hydrolienne avec la méthode de Boltzmann sur réseau »

Programmes scientifiques

Participation à 12 programmes et projets de recherche dont 2 portés par moi-même.

Contrats de recherche

Participation à 8 contrats de recherche dont 3 portés par moi-même.

Activités d'enseignements

Depuis 1996, je réalise des cours, travaux dirigés et travaux pratiques dans différentes formations pour une moyenne d'environ 100 HED par an.

— Systèmes d'Informations Géographiques (M1 Sciences de la mer - UPVD)

— Systèmes d'Informations Géographiques (Parcours EMR - ESIX)

— Géodésie (Parcours EMR M1-2A - ESIX)

— Océanographie (Parcours EMR M1-2A - ESIX)

— Géophysique (Parcours EMR M1-2A - ESIX)

— Réseaux (Bachelor - Intechmer)

— Programmation PHP (Bachelor - Intechmer)

21, George Sand – 50110 Cherbourg-en-Cotentin – France

☎ 06 21 42 54 88 • ☎ 02 33 88 73 42

✉ emmanuel.poizot@lecnam.net

- Programmation Python (Bachelor - Intechmer)
- Programmation HTML (Bachelor - Intechmer)
- Radio-positionnement (Bachelor - Intechmer)
- Statistique (Toutes formations Intechmer)
- Géostatistique (Bachelor - Intechmer)

Responsabilités pédagogiques

Responsable de l'organisation des travaux pratiques en mer pour les étudiants du Cnam/Intechmer

Participation à la mise en place du diplôme de Bachelor « Oceanographic-Prospector »

Co-responsable du diplôme de Bachelor « Oceanographic-Prospector »

Co-responsable du diplôme de Technicien Supérieur de la Mer, option « Prospection Marine »

Responsabilités administratives

Représentant du Cnam/Intechmer auprès du CRIANN

Représentant du Cnam/Intechmer auprès du de MancheNumérique

Annexe B

Liste des travaux

Revue scientifique à comité de lecture

- Méar, Y.; **Poizot, E.**; Murat, A.; Lesueur, P. & Thomas, M. Fine-grained sediment spatial distribution on the basis of a geostatistical analysis: Example of the eastern Bay of the Seine (France) Continental Shelf Research , 2006, 26, 2335 - 2351
- **Poizot, E.**; Méar, Y.; Thomas, M. & Garnaud, S. The application of geostatistics in defining the characteristic distance for grain size trend analysis Computers & Geosciences , 2006, 32, 360 - 370
- **Poizot, E.**; Méar, Y. & Biscara, L. Sediment Trend Analysis through the variation of granulometric parameters: A review of theories and applications Earth-Science Reviews , 2008, 86, 15 - 41
- **Poizot, E.** & Méar, Y. eCSedtrend: A new software to improve sediment trend analysis Computers & Geosciences , 2008, 34, 827 - 837
- Paris, R.; Fournier, J.; **Poizot, E.**; Etienne, S.; Morin, J.; Lavigne, F. & Wassmer, P. Boulder and fine sediment transport and deposition by the 2004 tsunami in Lhok Nga (western Banda Aceh, Sumatra, Indonesia): A coupled offshore-onshore model Marine Geology , 2010, 268, 43 - 54
- **Poizot, E.** & Méar, Y. Using a GIS to enhance grain size trend analysis Environmental Modelling & Software , 2010, 25, 513 - 525
- Maillet, M. G.; **Poizot, E.**; Sabatier, F.; Vella, C. & Méar, Y. Pattern of Sediment Transport in a Microtidal River Mouth Using Geostatistical Sediment-Trend Analysis Journal of Sedimentary Research, 2011, 81, 138-152
- Beryouni, K.; Méar, Y.; Murat, A.; **Poizot, E.** & Chaibi, M. Geographical variability of environmental parameters versus GPS\ precision: Toward a better sampling strategy Marine Pollution Bulletin , 2012, 64, 2507 - 2518
- Cordier, E.; **Poizot, E.** & Méar, Y. Swell impact on reef's sedimentary processes: a case study of the La Reunion fringing reef Sedimentology, 2012
- Dauvin, J.-C.; Méar, Y.; Murat, A.; **Poizot, E.**; Lozach, S. & Beryouni, K. Interactions between aggregations and environmental factors explain spatio-temporal patterns of the brittle-star *Ophiothrix fragilis* in the eastern Bay of Seine Estuarine, Coastal and Shelf Science , 2013, 131, 171 - 181

- **Poizot, E.**; Anfuso, G.; Mear, Y. & Bellido, C. Confirmation of beach accretion by grain-size trend analysis: Camposoto beach, Cádiz, SW Spain *Geo-Marine Letters*, 2013, 33
- **Poizot, E.**; Anfuso, G.; Méar, Y. & Bellido, B. Reply to J.J. Muñoz-Perez et al. Comments on “Confirmation of beach accretion by grain-size trend analysis: Camposoto beach, Cádiz, SW Spain” by E. Poizot et al. (2013) *Geo-Marine Letters* 33(4) *Geo-Marine Letters*, 2014, 34, 79-83
- Murat, A.; Méar, Y.; **Poizot, E.**; Dauvin, J. & Beryouni, K. Silting up and development of anoxic conditions enhanced by high abundance of the geoengineer species *Ophiothrix fragilis* *Continental Shelf Research* , 2016, 118, 11 - 22
- **Poizot, E.**; Verjus, R.; N'Guyen, H.; Angilella, J. & Mear, Y. Self-contamination of aquaculture cages in shallow water *Environmental Fluid Mechanics*, 2016, 16, 793-805
- Dauvin, J.-C.; Lucas, S.; Navon, M.; Lesourd, S.; Mear, Y.; **Poizot, E.** & Alizier, S. Does the hydrodynamic, morphometric and sedimentary environment explain the structure of soft-bottom benthic assemblages in the Eastern Bay of Seine (English Channel)? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* , 2017, 189, 156 - 172
- Baux, N.; Pezy, J.-P.; Bachelet, Q.; Baffreau, A.; Méar, Y.; **Poizot, E.**; Guyonnet, B. & Dauvin, J.-C. Soft bottom macrobenthic communities in a semi-enclosed Bay bordering the English Channel: The Rade de Cherbourg *Regional Studies in Marine Science* , 2017, 9, 106 - 116
- Méar Y., **Poizot E.**, Murat A., Beryouni K., Baux N. & Dauvin J.-C. Improving the monitoring of a dumping site in a dynamic environment. Example of the Octeville site (Bay of Seine, English Channel). *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 129, 425-437
- Baux, N.; Murat, A.; Faivre, Q.; Lesourd, S.; **Poizot, E.**; Méar, Y.; Brasselet, S. & Dauvin, J.-C. Sediment dynamic equilibrium, a key for assessing a coastal anthropogenic disturbance using geochemical tracers: Application to the eastern part of the Bay of Seine. *Continental Shelf Research*, 2019, 175, 87-98
- Grégoire G., Méar Y., **Poizot E.**, Marion C., Murat A. & Hebert B. The morpho-sedimentology of an artificial roadstead (Cherbourg, France). *Journal of Maps*, 2019, 677-685

- Furgerot L., Violet M., Poprawski Y., **Poizot E.**, Bailly du Bois P., Morillon M. & Méar Y. High-resolution bathymetry of the Alderney Race and its geological and sedimentological description (Raz Blanchard, northwest France). *Journal of Maps*, 2019, 15(2):708-718
- Guillou S., Filipot JF, Duart R., Thiébot J., Germain G., Chaplain N., Ikhennicheu M., Duart R., Gaurier B., Bourgoïn A., Mercier P., Ata R., Laverne J., Benhamadouche S., Pieterse A., Maisondieu C., **Poizot E.**, Poirier J.C., Auvray C., Droniou E., Arramounet A., & Pinon G. Towards a turbulence characterization in tidal energy sites. First results of THYMOTE project. *MATEC Web of Conferences*, 2019, 261(42):05002
- Bailly du Bois, P.; Dumas, F.; Morillon, M.; Furgerot, L.; Voiseux, C.; **Poizot, E.**; Méar, Y. & Bennis, A.-C. The Alderney Race: general hydrodynamic and particular features. *Phil. Trans. R. Soc., The Royal Society*, 2019, 378, 20190492
- Poirier I., Benhaïm D., **Poizot E.**, Gallon R.K., Cauvin E., Lemarchand A., Bertrand M., Lelièvre C., Murat, A., Benoit, F. & Méar, Y. (2020). Marine aggregates in North Atlantic coast: Microbial characteristics and potential interactions with farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Marine Environmental Research*. doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104864
- Grondeau M., Guillou S., Mercier P. & **Poizot E.** Wake of a Ducted Vertical Axis Tidal Turbine in Turbulent Flows, LBM Actuator-Line Approach. *Energies*, 2019, 12(22):4273
- Dauvin, J.-C.; Pezy, J.-P.; Baffreau, A.; Bachelet, Q.; Baux, N.; Méar, Y.; Murat, A. & **Poizot, E.** Effects of a salmon fish farm on benthic habitats in a high-energy hydrodynamic system: The case of the Rade de Cherbourg (English Channel). *Aquaculture, Elsevier BV*, 2020, 518, 734832
- Furgerot, L.; Sentchev, A.; du Bois, P. B.; Lopez, G.; Morillon, M.; **Poizot, E.**; Méar, Y. & Bennis, A.-C. One year of measurements in Alderney Race: preliminary results from database analysis. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, The Royal Society*, 2020, 378, 20190625
- Grondeau, M.; Poirier, J.-C.; Guillou, S.; Mtextasciacuteear, Y.; Mercier, P. & **Poizot, E.** Modelling the wake of a tidal turbine with upstream turbulence. *International Marine Energy Journal, European Wave and Tidal Energy Conference*, 2020, 3, 83-89
- Mercier P., Grondeau M., Guillou S.S., Thiébot J. & **Poizot E.** Numerical study of the turbulent eddies generated by the seabed roughness. Case study at a tidal power site, *Applied Ocean Research*, 97 (2020) 102082. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102082>

- Mercier, P.; Ikhennicheu, M.; Guillou, S.; Germain, G.; **Poizot, E.**; Grondeau, M.; Thiebot, J. & Druault, P. The merging of Kelvin-Helmholtz vortices into large coherent flow structures in a high Reynolds number flow past a wall-mounted square cylinder. *Ocean Engineering, Elsevier BV*, 2020, 204
- Mercier, P.; Thiébaud, M.; Guillou, S.; Maisondieu, C.; **Poizot, E.**; Pieterse, A.; Thiébot, J.; Filipot, J.-F. & Grondeau, M. Turbulence measurements: An assessment of Acoustic Doppler Current Profiler accuracy in rough environment. *Ocean Engineering, Elsevier BV*, 2021, 226, 108819
- Kawakami, G.; Nishina, K. & **Poizot, E.** Dominant updriftward sediment transport on the updrift-side of a modern deflected delta, Ishikari coast, Hokkaido, Japan. *Marine Geology, Elsevier BV*, 2021, 436, 106480
- **Poizot E.**, Mear Y., Guillou S., Bibeau E. High resolution characteristics of turbulence tied of a fish farm structure in a tidal environment. Under publication to Applied Ocean Research, January 2021.
- Grondeau, M.; Guillou, S.S.; Poirier, J.C.; Mercier, P.; **Poizot, E.** & Méar, Y. Studying the Wake of a Tidal Turbine with an IBM-LBM Approach Using Realistic Inflow Conditions. *Energies* 2022, 15, 2092. <https://doi.org/10.3390/en15062092>
- Baux, N.; Murat, A.; **Poizot, E.**; Méar, Y.; Gregoire, G.; Lesourd, S. & Dauvin, J.-C. An innovative geostatistical sediment trend analysis using geochemical data to highlight sediment sources and transport. *Computational Geosciences, Springer Science and Business Media LLC*, 2022, 26, 263-278
- Bennis, A.-C.; Furgerot, L.; Bois, P. B. D.; **Poizot, E.**; Méar, Y. & Dumas, F. A winter storm in Alderney Race: Impacts of 3D wave-current interactions on the hydrodynamic and tidal stream energy. *Applied Ocean Research, Elsevier BV*, 2022, 120, 103009
- Dauvin, J.-C.; Pezy, J.-P.; **Poizot, E.**; Lozach, S. & Trentesaux, A. A Multi-disciplinary Approach for A Better Knowledge of the Benthic Habitat and Community Distribution in the Central and Western English Channel. *Journal of Marine Science and Engineering, MDPI AG*, 2022, 10, 1112
- Calvino, C.; Furgerot, L.; **Poizot, E.**; du Bois, P. B. & Bennis, A.-C. Model and method to predict the turbulent kinetic energy induced by tidal currents, application to the wave-induced turbulence. *Renewable Energy, Elsevier BV*, 2023, 216, 119024
- Dong, M. D.; **Poizot, E.**; Cuong, D. H.; Anh, L. D.; Hung, D. Q.; Huong, T. T. T.; Diep, N. V. & Huong, N. B. Transport trend of recent sediment within the nearshore seabed of Hai Hau, Nam Dinh province, southwest Red River Delta. *Frontiers in Earth Science, Frontiers Media SA*, 2023, 11

- Gwendoline G. and Murat, A.; Méar, Y.; **Poizot., E.**; Marion, C.; Lesourd, S.; Haize, T. & Adenot, C. Sedimentary hydrodynamics of a sandy bay under macrotidal conditions (Saire Bay, France). *Journal of Maps, Informa UK Limited*, 2023, 19
- **Poizot, E.**; Murat, A.; Baux, N.; Frigola, C.; Grégoire, G. & Méar, Y. MSTA: A New Framework for Sediment Transport Analysis. *Elsevier BV*, 2023

— Liste des communications orales

- **Poizot, E.**; Mear, Y.; Murat, A. & Thomas, M.; 1998 - Prospection des fonds marins : Apports des Systèmes d'Informations Géographiques. *Colloque "Environnement littoral"*, 5-6 juin 1998, Tanger (Maroc).
- Mear, Y.; **Poizot, E.**; Murat, A. & Thomas, M.; 1998 - Prospection des fonds marins : Apports de quelques outils informatiques. *Colloque "Environnement littoral"*, 5-6 juin 1998, Tanger (Maroc).
- Mear, Y.; Murat, A. & **Poizot, E.**; 2000 - Les dépôts sableux de la marge externe du Golfe du Lion. Marqueurs de la construction sédimentaire. *GDR marge*. Atelier « Golfe du lion ».
- Mear, Y.; Murat, A. & **Poizot, E.**; 2000 - L'enregistrement du dernier cycle glacio-eustatique dans les sédiments. Zone externe de la marge du golfe du Lion. *GDR marge*. Atelier « Golfe du lion ».
- Maatouk, M.; El Arrim, A.; El Hatimi, I.; El Moumni, B.; Damnati, B.; Afailal-Tribak, A.; Mear, Y & **Poizot, E.**; 2000 - Contribution à l'étude de l'environnement marin de la marge méditerranéenne marocaine (cas de la baie de Tanger et oued Martil). *Réunion plénière REMER*. El Jadida-Maroc, Nov.2000.
- Even, L.; Mear, Y.; **Poizot, E.** & Thomas, M.; 2001 - PROFMAN : A G.I.S. Based System For Analysis of Seismic Profile Data. 9th annual conférence on G.I.S. *Research in the U.K. (GISRUK)*, University of Glamorgan, 18-20 avril.
- Garnaud, S.; **Poizot, E.**; Mear, Y.; Lesueur, P.; Lesourd, S. & Brun-Cottan, J.-C.; 2001 - Transport sédimentaire résiduel en domaine subtidal: application et amélioration de l'approche de GAO et COLLINS à la baie de seine orientale. *ASF*, Orléans, 12-14 Novembre
- Mear, Y.; Murat, A.; **Poizot, E.**; Garnaud, S.; Lesourd, S. & Lesueur, P.; 2001 - Assurance qualité en environnement marin : application à la détermination du taux de fraction fine d'un sédiment (envasement). *UOF*, Lille, 5-7 septembre.

- Garnaud, S.; Lesueur, P.; Mear, Y.; Lafite, R.; **Poizot, E.** & Brun-Cottan, J.-C.; 2002. Distribution et variabilité des sédiments fins en Baie de Seine orientale. *RST*, Nantes, 9-11 avril 2002
- Lesueur, P.; Garnaud, S.; Mear, Y.; Lafite, R.; **Poizot, E.**; Brun-Cottan, J.-C & Dupont, J.-P.; 2002. Distribution et variabilité des sédiments fins en Baie de Seine orientale. *Colloque final PNEC "baie de Seine"*, Dinard, 8 janvier 2002.
- **Poizot, E.**; Mear Y. & Murat A.; 2003. Cartographie des sédiments de la baie de Seine orientale (Manche). Apports des géostatistiques. *IX ième congrès de l'Association des Sédimentologues Français*. Bordeaux (France), 14-15-16, octobre 2003
- **Poizot, E.**; Mear, Y.; Sciboz, B. & Violet, M.; 2003. Un exemple d'application des Systèmes d'Informations Géographiques pour la gestion de la sécurité en mer : le répertoire "Croches et épaves". *Université Européenne d'Eté "La sécurité des flux maritimes en Europe : de la prévention à la gestion des risques"*. Cherbourg (France), septembre 2003
- **Poizot, E.** & Mear, Y.; 2004. Radiolocalisation systems: a set of tools to optimize maritime security. *Université Européenne d'Eté "La sécurité des flux maritimes en Europe : de la prévention à la gestion des risques"*. Cherbourg (France), septembre 2004
- **Poizot, E.** & Mear, Y.; 2004. Geographical System Informations for maritime security. *Université Européenne d'Eté "La sécurité des flux maritimes en Europe : de la prévention à la gestion des risques"*. Cherbourg (France), septembre 2004
- **Poizot, E.** & Méar, Y.; 2005. GNSS applied to maritime security. *Université Européenne d'Eté "La sécurité des flux maritimes en Europe : de la prévention à la gestion des risques"*. Cherbourg (France), septembre 2005
- **Poizot, E.** & Méar, Y.; 2005. Use of GIS to optimize the maritime security: examples. *Université Européenne d'Eté "La sécurité des flux maritimes en Europe : de la prévention à la gestion des risques"*. Cherbourg (France), septembre 2005
- Voisin, P.; Baltzer, A.; Fournier, J.; Lelong, F.; Moore, C.G.; **Poizot, E.**; Rousset, J.M. & Stepanian, A.; 2005. The use of side-scan-sonar for mapping the distribution of the reef-building tubeworm *Serpula vermicularis* in a Scottish loch. *Colloque MESH-Malo : « La cartographie des habitats marins dans la gestion intégrée du littoral en France"*. St Malo (France), 8-9 novembre 2005

- Fournier, J.; Paris, R.; **Poizot, E.**; Cachão, M.; Etienne, S.; Morin, J.; Lavigne, F. & Wassmer, P. 2006. Modelling sediment transport and deposition by the 2004 tsunami in Sumatra (Indonesia) 2nd International Tsunami Field Symposium
- Paris, R.; **Poizot, E.**; Fournier, J.; Cashao, M.; Etienne, S.; Morin, J.; Lavigne, F. & Wassmer, P.; 2008. Modelling sediment transport and déposition by the 2004 Tsunami in Sumatra (Indonésia). *19ème Réunion des Sciences de la Terre*. Dijon 4 au 8 Décembre 2006
- **Poizot, E.**; Méar, Y. & Murat, A.; 2007. L'imagerie Acoustique marine. Premier Forum "Métiers de l'Imagerie". *Centre de Congrès de Caen*, 14 juin 2007, Caen
- **Poizot, E.** & Méar, Y.; 2007. Improvement of Maritime Security through GNSS applications. *Université Européenne d'Eté "La sécurité des flux maritimes en Europe : de la prévention à la gestion des risques"*. Cherbourg (France), septembre 2007
- **Poizot, E.** & Méar, Y.; 2008. La géomatique appliquée à la dynamique sédimentaire. *Séminaire SHELFLUX*, 18-20 novembre, Paris
- **Poizot, E.**; Méar, Y. & Murat, A.; 2010. Modélisation analogique de la dynamique sédimentaire : apports des géostatistiques et des SIG. *23ème Réunion des Sciences de la Terre*. Bordeaux 25 au 29 Octobre 2010
- Minoubi, A.; Chaibi, M.; Zourarah, B.; Maanan, M.; El Khalidi, K. Méar, Y. & **Poizot, E.** 2010. Variabilité dans l'évolution saisonnière de la plage de Safi et conséquence d'une tempête sur son trait de côte. *1er Colloque International Littoraux des Pays Méditerranéens : états passés, actuels et futurs*. Larache, Maroc, 10 au 12 novembre 2010
- **Poizot, E.**; Méar, Y.; Murat, A. & Beryouni, K.; 2010. La méthode GSTA : un outil pour l'étude des géosystèmes marins. *1er Colloque International Littoraux des Pays Méditerranéens : états passés, actuels et futurs*. Larache, Maroc, 10 au 12 novembre 2010
- Beryouni, K.; Méar, Y.; Chaibi, M.; Zourarah, B.; **Poizot, E.** & Murat, A.; 2011. Variabilité spatiale des données environnementales. Exemple de la lagune de Oualidia (Maroc). *Conférence Internationale : "Informations Géo-Spatiales : Effets et Impacts des Changements Climatiques en Afrique"* à l'Institut Scientifique de Rabat. Maroc
- Murat ,A.; Méar, Y.; **Poizot, E.**; Lozach, S. & Dauvin, J-C.; 2011. L'envasement sous l'influence des organismes benthiques: exemple des ophiures en baie de Seine orientale. *13e congrès français de sédimentologie*. Dijon, France. (14 au 16 novembre 2011)

- **Poizot E.**; N'Guyen H,Y ; Angilella J-R & Méar Y. Self-contamination of aquaculture cages in shallow water. *2ème Sino-French Forum for Water Science*. Caen, France (2 au 4 novembre 2015)
- **Poizot E.** ; Guillou S.; Méar Y.; Shahsavarifard M.; Birjandi A. H & Bibeau E. L. 2016. Applicability of Vertical Microstructure Profiler measurements in high current streams. *CORE 2016, 2nd International Conference of Offshore Renewable Energy*. Glasgow, Ecosse (12 au 15 septembre 2016)
- **Poizot E.** ; Guillou S. & Méar Y. 2018. Vertical Microstructure Profiler for turbulence characterisation in MRE sites. *ICOE 2018*. Cherbourg, France (12 au 14 juin 2018)
- Furgerot L., Bailly Du Bois P., Méar Y., **Poizot E.** & Morillon M. (2018). Complex current variability in a tide-dominated environment and interplay with extreme wind and wave events (Raz Blanchard, NW France). *Ocean's18MTS/IEEE Kobe/Techno-ocean*. Kobé (Japon), 28-31 mai 2018
- Furgerot L., Bailly Du Bois P., Méar Y., **Poizot E.** & Morillon M. (2018). Velocity profile variabilities at a tidal-stream energy site (Raz Blanchard, France): from short (second) to yearly time scales. *ICEC Caen*, France, 20-23 août 2018
- Guillou S., Filipot JF, Duart R., Thiébot J., Germain G., Chaplain N., Ikheunnicheu M. , Duart R., Gaurier B., Bourgoïn A., Mercier P., Ata R., Laverne J., Benhamadouche S., Pieterse A., Maisondieu C., **Poizot E.**, Poirier J.C., Auvray C., Droniou E., Arramounet A., & Pinon G. Turbulence characterization at the Raz Blanchard tidal energy site. Towards a turbulence characterization in tidal energy sites. First results of THYMOTE project. *5ième Congrès International Francophone de Mécanique Avancée*. Beyrouth, CIFMA, 31/10 au 2/11 2018
- Furgerot L., Bailly-du-Bois P., Morillon M., **Poizot E.** & Méar Y. Ambient turbulence related to the bathymetry in a high energetic tidal site (Alderney Race). *Seanergy*, Dunkerque (France), 5-6 juin 2019
- Grondeau M., Poirier J.-C., Guillou S., Méar Y., Mercier P. & **Poizot E.** Modelling the wake of a tidal turbine with upstream turbulence: LBM-LES versus Navier-Stokes LES. *13th European Wave and Tidal Energy Conference*, Napoli, Italy, 1/9/19 to 6 /9/19

- Grondeau M., Mercier P., Guillou S.S., Poirier J., **Poizot E.** & Méar Y. Numerical Simulation of a Tidal Turbine Model in a Turbulent Flow with the Lattice Boltzmann Method, *12th European Wave and Tidal Energy Conference Proceeding*, Cork, 28-31 August 2017, #913, 8p
- Bennis A.C, Feddy A., Bailly du Bois P., Barbin Y., Dumas F., Furgerot L., Lopez G., Marié L., Méar Y., Morillon M., **Poizot E.**, Sentchev A. & Wyatt L. (2020). Strong waves-current-turbulence interactions in a complex environment: application to Alderney Race. *Ocean Sciences Meeting 2020 - AGU*. 16-21 février, San Diego, Californie, USA
- Gregoire G., Marion C., Murat A., Méar Y., **Poizot E.**, & Lesourd S. (2020). Caractérisation des sources et de la dynamique sédimentaire d'une zone intertidale (Baie de Tatihou - France). *RST*, 26-30 octobre, Lyon, France
- Murat A., Grégoire G., Rieux A., Peuziat B., Baux N., Méar Y., **Poizot E.**, Costa S., Duperrret A., Tessier B. & Lesourd S. (2020). L'analyse élémentaire des fractions sableuses : une clé pour tracer les sources des sables littoraux. *RST*, 26-30 octobre, Lyon, France
- **Poizot E.**, Murat A., Baux N., Grégoire G. & Méar Y. (2020). MSTA: a GIS tool for proxy analysis. *RST*, 26-30 octobre, Lyon, France
- Mignot, M.; **Poizot, E.**; Guillou, S.; Pascal Bailly du, Bois; Yann, Mear; Tenailleau, L. & Mary, P. (2022) Modélisation hydrodynamique de l'évolution morphodynamique dans la rade de Cherbourg. *XVIIèmes Journées*, Chatou, Editions Paralia
- Calvino, C.; Bennis, A.-C.; Furgerot, L.; Bailly du Bois P. & **Poizot E.** (2023). Estimation and characterisation of the wave-induced turbulent kinetic energy and turbulent dissipation from ADCP data. *Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference, European Wave and Tidal Energy Conference*, 15
- Mignot, M.; **Poizot, E.**; Guillou, S.; Pascal Bailly Du, Bois; Méar, Y.; Tenailleau, L. & Mary, P. (2023) Hydro-sedimentary modelling of radionuclides transport into the Cherbourg roadstead (Normandy, France). *Coastal Sediments, WORLD SCIENTIFIC*, 2023