

Livrable T1.7.2

Rapport consolidé sur la modélisation du site et des turbines

Rev	Date	Description	Préparé par	Approuvé par
1.0	04/11/2022	Version initiale pour commentaires	E. Mackay ¹ J. Hardwick ¹ D. Coles ² P. Mercier ³ J. Thiébot ³ S. Guillou ³ G. Pinon ⁴	
1.1	07/12/2022	Version révisée pour approbation par le PSG	E. Mackay ¹ M. Sedrati ⁵ P. Thies ¹	P. Thies ¹
1.2	12/01/2023	Version finale	E. Mackay ¹ H. Mullings ⁶ T. Stallard ⁶ P. Ouro ⁶ M. CampsSantamasas ⁶	P. Thies ¹

Affiliations : 1. Université d'Exeter. 2. Université de Plymouth. 3. Université de Caen Normandie. 4. Université du Havre Normandie. 5. Université de Bretagne Sud. 6. Université de Manchester

Abstract

Les projets d'énergie hydrolienne nécessitent une modélisation numérique pour évaluer les conditions du site et les performances des turbines/réseaux. Le projet TIGER a offert une occasion unique de mettre en œuvre simultanément différents modèles disponibles. Ce rapport fournit un aperçu et une comparaison des différents modèles numériques développés par les partenaires universitaires du projet TIGER. Les modèles couvrent une variété d'échelles spatiales et temporelles. Les modèles à plus grande échelle fournissent des études climatiques à long terme couvrant toute la région de la Manche à une résolution relativement faible, tandis que les modèles à plus haute définition fournissent des informations détaillées sur l'écoulement turbulent à court terme et à petite échelle et son interaction avec les hydroliennes. Les modèles sont utilisés à des fins différentes. À une extrémité de l'échelle, les modèles ont été utilisés pour informer l'évaluation technico-économique à grande échelle de l'énergie hydrolienne et son impact sur le mix énergétique au Royaume-Uni et en France. À l'autre bout de l'échelle, les modèles numériques fournissent des informations qui alimentent la conception technique détaillée des turbines hydroliennes sur les sites et l'évaluation du rendement énergétique. Les modèles illustrent la gamme d'outils de calcul disponibles pour aider au développement de l'industrie de l'énergie hydrolienne. Ce rapport sera utile aux investisseurs, aux développeurs de technologies et aux parties prenantes des projets pour identifier les modèles appropriés pour soutenir et développer les projets hydroliens en cours et futurs.

Table of contents

Abstract.....	Error! Bookmark not defined.
1 Introduction.....	6
2 Delft3D FM-SWAN: Université d'Exeter.....	10
2.1 Aperçu du modèle et de l'utilisation prévue	Error! Bookmark not defined.
2.1.1 Équations gouvernantes	11
2.2 Description des modèles.....	11
2.2.1 Grille spatiale	11
2.2.2 Paramètres temporels.....	13
2.2.3 Other numerical settings.....	14
2.2.4 Données d'entrée et conditions limites	14
2.2.5 Les sorties.....	16
3 Thetis: Université de Plymouth.....	17
3.1 Aperçu du modèle et de l'utilisation prévue	17
3.1.1 Équations directrices	18
3.2 Description du modèle	19
3.2.1 Paramètres spatiaux.....	Error! Bookmark not defined.
3.2.2 Paramètres temporels.....	19
3.2.3 Représentation de turbines hydroliennes	20
3.2.4 Autres paramètres numériques.....	21
3.2.5 Entrées et conditions limites	22
3.2.6 Sorties	22
4 Palabos LBM-LES : Université de Caen Normandie	28
4.1 Aperçu du modèle et de l'usage prévu	28
4.2 Description du modèle	28
4.2.1 Paramètres spatiaux.....	28
4.2.2 Paramètres temporels.....	29
4.2.3 Représentation de turbines hydroliennes	29
4.2.4 Entrées et conditions limites	30
4.2.5 Sorties	30
5 Télémac : Université de Caen Normandie.....	33
5.1 Aperçu du modèle et de l'utilisation prévue	33
5.2 Description du modèle	34
5.2.1 Paramètres spatiaux.....	34
5.2.2 Paramètres temporels.....	35

5.2.3	Représentation de turbines hydroliennes	35
5.2.4	Entrées et conditions limites	36
5.2.5	Sorties	37
6	DOROTHY: University Le Havre Normandy	38
6.1	Aperçu du modèle et de l'utilisation prévue	38
6.2	Description du modèle	41
6.2.1	Paramètres spatiaux.....	41
6.2.2	Paramètres temporels.....	42
6.2.3	Représentation de turbines hydroliennes	42
6.2.4	Autres paramètres numériques.....	43
6.2.5	Entrées et conditions limites	43
6.2.6	Sorties	43
7	MIKE 21: Université de Bretagne Sud	46
7.1	Aperçu du modèle et de l'utilisation prévue	46
7.2	Description du modèle	46
7.2.1	Paramètres spatiaux.....	46
7.2.2	Paramètres temporels.....	47
7.2.3	Représentation de turbines hydroliennes	48
7.2.4	Entrées et conditions limites	48
7.2.5	Sorties	48
8	DOFAS: Université de Manchester	51
8.1	Description du modèle	52
8.1.1	Paramètres spatiaux.....	53
8.1.2	Paramètres temporels.....	53
8.1.3	Représentation d'une turbine hydrolienne	54
8.1.4	Entrées et conditions limites	54
8.1.5	Sorties	54
9	BEM instable : Université de Manchester	58
9.1	Aperçu du modèle et de l'utilisation prévue	58
9.2	Description du modèle	59
9.2.1	Paramètres spatiaux.....	59
9.2.2	Paramètres temporels.....	59
9.2.3	Représentation de la turbine.....	60
9.2.4	Autres paramètres numériques.....	61
9.2.5	Conditions d'entrée et conditions aux limites.....	61

9.2.6 Sorties	61
10 Conclusions	63
Annex A - Comparaison croisée des modèles de ressources et des données mesurées au Raz Blanchard	64
A1 Introduction	64
A1.1 Compréhension de la ressource instable.....	64
A2 Étude initiale : Site d'essai EMEC	65
A3 Focus sur l'étude : Le Raz Blanchard.....	Error! Bookmark not defined.
A4 Implication des conditions variant dans l'espace sur un site hydrolien	Error! Bookmark not defined.
Références.....	67
Section 2 – Delft3D FM-SWAN.....	67
Section 3 - Thetis.....	67
Section 4 - Palabos	69
Section 5 - Telemac	70
Section 6 - DOROTHY	70
Section 7 – MIKE 21	71
Section 8 – DOFAS	71
Section 9 – BEM instable.....	72
Annexe A - Comparaison croisée des ressources.....	72

1 Introduction

Ce rapport décrit la modélisation numérique réalisée par les partenaires académiques du projet TIGER, pour l'estimation des conditions des sites hydroliens et des performances et charges des turbines et réseaux hydroliens. Les modèles considérés couvrent une large gamme d'échelles spatiales et temporelles, et sont utilisés pour une gamme correspondante d'objectifs.

Un aperçu des modèles utilisés dans TIGER est présenté dans le tableau 1.1, et un schéma de haut niveau des échelles et du coût de calcul indicatif de chaque modèle est présenté dans la figure 1.1. Les modèles sont classés en trois catégories : échelle de la turbine, échelle du site et échelle régionale. Les modèles à l'échelle de la turbine calculent l'interaction entre les conditions d'écoulement locales et une turbine. Selon le modèle, cette interaction peut être unidirectionnelle (c'est-à-dire que le débit influence la turbine, mais pas l'inverse) ou bidirectionnelle (le débit et la turbine s'influencent mutuellement). Les modèles à l'échelle de la turbine couvrent des échelles de temps courtes, de l'ordre de 10-30 minutes, sur lesquelles les conditions d'écoulement moyennes peuvent être considérées comme approximativement stationnaires. Les modèles à l'échelle du site calculent l'interaction entre l'écoulement et la bathymétrie détaillée sur un site, correspondant à une zone de quelques kilomètres ou moins. Selon le modèle, l'interaction entre l'écoulement et les turbines peut être incluse, où la turbine peut être représentée à différents niveaux de détail, selon l'application. Certains modèles à l'échelle du site sont exécutés pendant de courtes périodes de 30 minutes ou moins et calculent les caractéristiques à petite échelle de l'écoulement, comme la turbulence induite par les caractéristiques bathymétriques. D'autres modèles à l'échelle du site visent à caractériser la variabilité spatiale des caractéristiques du débit moyen, sur des échelles de temps plus longues, couvrant plusieurs cycles hydroliens. Les modèles à l'échelle régionale peuvent être utilisés pour identifier des zones pour des déploiements potentiels, ou pour fournir des données limites pour des modèles à plus haute définition à l'échelle du site ou de la turbine. Certains des modèles utilisés couvrent plusieurs échelles.

La figure 1.1 montre également les exigences de calcul indicatives pour chaque type de modèle. Les besoins en calcul peuvent varier de manière significative entre les applications particulières de chaque modèle, la taille du domaine, la résolution, le nombre de cas considérés, etc. Toutefois, les fourchettes indicatives montrent que les exigences de calcul varient de plusieurs ordres de grandeur. Les modèles d'haute-fidélité fournissent certaines informations qui ne sont pas disponibles dans les modèles de basse fidélité, mais à un coût de calcul plus élevé.

Des informations complémentaires sur chaque modèle sont présentées dans les sections ci-dessous. L'intention n'est pas de fournir des descriptions détaillées de chaque modèle et de ses résultats. Ce rapport vise plutôt à fournir une vue d'ensemble des différents types de modèles et de leurs utilisations respectives, présentés dans un format cohérent, avec des références aux publications où l'on peut trouver plus de détails. Pour chaque modèle, nous décrivons :

- Les équations de base que le modèle résout

- Représentation des turbines hydroliennes dans le modèle (le cas échéant)
- Utilisations prévues du modèle
- Configuration du modèle

- o Résolution et étendue spatiales et temporelles
- o Entrées du modèle et conditions limites
- o Exemples de sorties du modèle

Les modèles numériques ont été appliqués pour évaluer les performances des turbines et les conditions du site sur cinq sites :

1. Raz Blanchard,
2. Perpetuus Tidal Energy Centre (PTEC),
3. Ramsey Sound,
4. Paimpol-Bréhat,
5. Gulf of Morbihan.

Pour le site de Raz Blanchard, plusieurs types et échelles de modèles ont été utilisés. Les comparaisons de ces modèles sont présentées dans l'annexe A.

Indicative
CPU hours

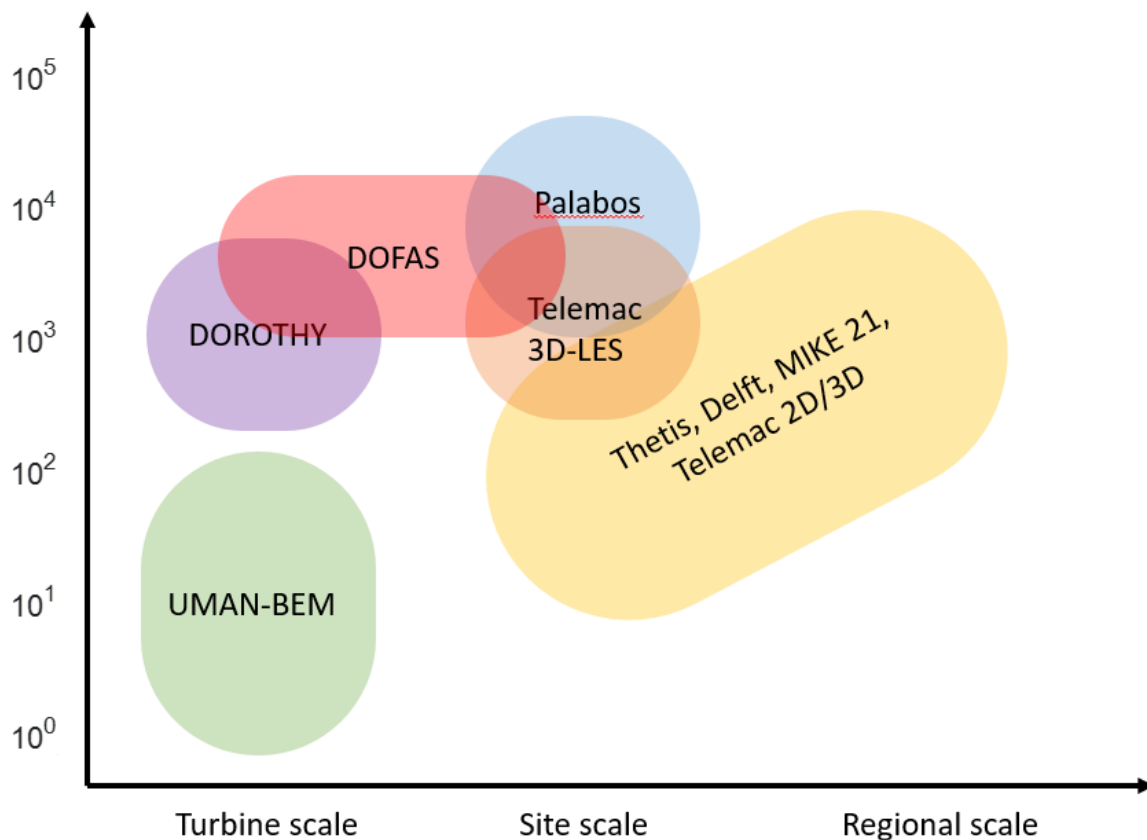


Figure 1.1. Échelles indicatives et exigences de calcul pour les modèles numériques utilisés dans TIGER

Tableau 1.1. Aperçu des modèles numériques utilisés dans TIGER

Nom du modèle	Équations directrices de l'écoulement	Étendue et résolution spatiale représentatives	Extension et résolution temporelles représentatives	Représentation d'hydraulique(s)	Représentation de la turbulence	Représentation des ondes	Utilisations prévues
Delft suite	Équations 2D en eaux peu profondes et équations 3D de RANS	Modèle régional couvrant O (1-100) km à des résolutions comprises entre ~1 km et 20 m	Périodes pluriannuelles avec sorties toutes les 20 minutes	Aucun	Modèle tourbillon-viscosité	Modèle spectral d'ondes avec couplage à une ou deux voies avec le modèle d'écoulement	- Évaluation des ressources à l'échelle de la région et du site - Étude des interactions entre les vagues et les courants - Évaluation des conditions extrêmes
Thétis	Équations des eaux peu profondes en 2D	Modèle régional couvrant O (1-100) km à des résolutions comprises entre ~1 km et 20 m	Des semaines à des mois avec des sorties à des pas de 10 minutes	Terme de traînée (2D) Disque de l'actionneur (3D)	Modèle tourbillon-viscosité	Aucun	- Évaluation des ressources régionales et locales - Optimisation de la disposition des réseaux - Impacts des réseaux sur l'écoulement hydrolien
Palabos	méthode de Lattice-Boltzmann (LBM) simulation de grands tourbillons (LES)	Modèle à l'échelle du site (~0.5 km ²) à haute définition (~0.3 m)	~30 min avec sortie haute fréquence (<1 s)	Aucun	LES	Aucun	Caractérisation des écoulements hydroliens turbulents générés par la rugosité du fond marin
Telemac 2D/3D	Équations 2D en eaux peu profondes et équations 3D de RANS	Modèle régional couvrant O (1-100) km à des résolutions comprises entre ~10 km et 10 m	Environ 1 an pour le modèle 2D, 1 mois pour le modèle 3D.	Terme de traînée (2D) Disque de l'actionneur (3D)	Modèle tourbillon-viscosité	Aucun	- Évaluation des ressources - Impact de l'extraction d'énergie sur la ressource - Évaluation de la disposition des réseaux
MIKE 21	Équations des eaux peu profondes en 2D	Modèle local couvrant O (10) km à des résolutions	1 mois	Aucun	Modèle tourbillon-viscosité	Aucun	Évaluation des ressources

		comprises entre ~1 km et 10 m					
Telemac LES	Simulation de grands tourbillons (LES)	Modèle à l'échelle du site avec une résolution de 10 km - 1 m	Environ 1 semaine avec des sorties à 1 Hz	Aucun	LES	Aucun	Évaluation des ressources en fonction des turbulences
DOROTHY	Méthode des particules tourbillonnaires	Modèle réduit de turbine avec des particules O (105)	Durées de simulation de l'ordre de 100 s	Modèle de ligne de levage	LES	Aucun	- Évaluation des performances - Caractérisation du sillage - Charges fluctuantes le long des pales
DOFAS	LES	Modèle à l'échelle du réseau avec une résolution de 5 m - 0.2 m	De quelques minutes à la durée de la phase hydrolienne (3-5 heures)	Résolu par la géométrie Ligne d'actionneur Disque de l'actionneur	LES	Méthode de nivellement	-Conception du réseau de turbines -Caractérisation de la turbulence induite par la bathymétrie. -Chargement induit par les ondes -Caractérisation de la récupération de sillage -Informers les modèles de basse fidélité à partir de données d'haute-fidélité.
UMAN- BEM	Théorie de la quantité de mouvement des éléments de pale	Modèle à l'échelle du dispositif, domaine global d'approximative ment 2Dx2D.	Plusieurs pas de temps sur un flux hydrolien, pour chaque cas de 10 minutes.	Théorie de la quantité de mouvement des éléments de pale	LES/VK	Théorie linéaire	- Évaluation des performances - Charges fluctuantes le long des pales - Évaluation de la charge/fatigue - Prévission efficace des charges, variation spatiale des charges.

2 Delft3D FM-SWAN : Université d'Exeter

2.1 Aperçu du modèle et de l'utilisation prévue

Un modèle d'écoulement-onde entièrement couplé a été développé en utilisant Delft3D Flexible Mesh (DFlow FM) et SWAN. DFlow FM est le solveur d'écoulement hydrodynamique qui constitue le cœur de la suite de modèles Delft3D Flexible Mesh. La suite Delft3D FM intègre également la prise en charge du modèle d'onde spectrale SWAN de 3e génération, appelé D-Wave dans le cadre de Delft3D. Cette intégration permet aux modèles d'être complètement couplés dans le logiciel sans qu'il soit nécessaire de développer un outil de couplage indépendant. Les modèles ont été développés pour calculer les conditions d'écoulement et de vagues dans toute la région pour être utilisés dans de multiples applications au sein de TIGER par l'Université d'Exeter et d'autres partenaires du projet. Dans le cadre du projet TIGER, les modèles ont été utilisés pour générer un ensemble de données rétrospectives sur 32 ans des conditions d'écoulement et de vagues dans toute la Manche, en se concentrant sur deux sites : le site PTEC au large de l'île de Wight et l'Alderney Race. Les modèles ont été utilisés pour : la quantification des ressources, la modélisation des valeurs extrêmes, l'apport à la modélisation technico-économique, l'apport à la modélisation de l'analyse dynamique des structures et la comparaison des modèles. En plus d'être utilisées dans des études de recherche à l'université d'Exeter, les données ont été fournies à :

- ORE Catapult, pour alimenter l'évaluation technico-économique du site PTEC.
- B&V consultants, au nom d'Orbital Marine Power, pour PTEC et Alderney Race.
- L'Université de Manchester, pour contribuer à leur travail de modélisation.

Les données du modèle ont été utilisées dans les tâches et les produits livrables TIGER suivants.

- T3.1.2 Rapport sur les meilleures pratiques de collecte de données et d'enquêtes
- T1.6.2 Définition des projets de déploiement pour les fermes hydroliennes

Plusieurs publications académiques ont été produites en utilisant les données du modèle :

- - Hardwick J, Ashton IGC, Mackay E, Smith HCM, Thies PR. (2020) Coupled flow-wave modelling for regional tidal site characterisation in the English Channel, *Developments in Renewable Offshore Energies*, 601-606, DOI :10.1201/9781003134572-68. Hardwick J, Mackay E, Ashton I, Smith H, Thies PR. (2021) [Quantifier les effets des vagues-courants interactions énergétique ressource sur des sites de la Manche en utilisant des couplées. numériques simulations](#), *Energies*, volume Special Issue Tidal Turbines, DOI :10.3390/en14123625.
- Mackay E, Hardwick J. (2022) Joint extremes of waves and currents at tidal energy sites in the English Channel, *ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering OMAE2022*, Hamburg, Germany, 6th - 9th Jun 2022.

Le modèle a également contribué à des présentations ou à des affiches lors des événements locaux et internationaux suivants :

- RENEW 2020 : 4e conférence internationale sur les énergies renouvelables en mer 12 - 15 octobre 2020, Lisbonne, Portugal
- OMAE 2021 : 40e conférence internationale sur le génie océanique, offshore et arctique, Hamberg, Allemagne
- PRIMARE 2022 : 9th Conférence annuelle PRIMaRE, Cornouailles, Royaume-Uni
- ICOE 2022 : Conférence internationale sur l'énergie océanique, Donostia/San Sebastian, Espagne

2.1.1 Équations gouvernantes

DFlow FM est un solveur d'écoulement hydrodynamique qui résout les équations 2D moyennées en profondeur ou les équations 3D non linéaires des eaux peu profondes dérivées des équations de Navier-Stokes pour un écoulement de fluide libre incompressible. Le système d'équations comprend les équations de quantité de mouvement horizontal, l'équation de continuité, l'équation de transport et un modèle de fermeture de la turbulence. La description complète des équations est décrite par Lesser et al. (2004). Les forces harmoniques générées par les marées peuvent être appliquées à travers la grille ainsi que les conditions limites pour fournir des entrées de modèle autour des frontières ouvertes. (Deltares, 2019). Le modèle antérieur Delft3D-FLOW a été continuellement développé depuis la première version en 1995 et est largement utilisé pour modéliser une variété de processus hydrodynamiques côtiers (Xia et al., 2010), estuariens (Trihartono et al., 2015), fluviaux (Lesser et al., 2004) et autres. Le modèle D-Flow FM offre l'avantage de simuler ces processus sur un espace de calcul non structuré permettant une sortie à plus haute définition sur les zones d'intérêt sans souffrir de la perte de vitesse de calcul requise par l'augmentation de la résolution de la grille entière.

SWAN (Simulating WAVes Nearshore) est un modèle spectral de vagues de troisième génération développé à TU Delft aux Pays-Bas. Le modèle a été développé pour prédire le spectre des vagues dans les zones côtières et les eaux peu profondes. SWAN, comme les autres modèles de vagues spectrales, détermine l'évolution de la densité d'action dans l'espace et le temps. Le modèle incorpore les effets de l'interaction vague-courant, du déferlement des vagues, du white-capping, de l'interaction triade et de l'interaction quadruple. Une description complète du modèle est disponible dans la documentation technique de SWAN (TUDelft, 2010).

2,2 Description des modèles

2.2.1 Grille spatiale

Le modèle d'écoulement est construit sur une grille cartésienne (Eastings et Northings) couvrant la totalité de la Manche. La frontière occidentale s'étend de la côte irlandaise à un point situé au sud-ouest de la côte bretonne. À l'extrémité orientale de la Manche, la frontière s'étend d'est en ouest, depuis le Suffolk, au Royaume-Uni, jusqu'à proximité d'Amsterdam, aux Pays-Bas. Il existe également une frontière ouverte plus petite à travers la mer d'Irlande. Le modèle d'écoulement est exécuté sur une grille mixte non structurée à résolution mixte triangulaire-rectangulaire. Le maillage a été créé en utilisant RGDGRID, un outil développé par Deltares pour travailler avec la suite de modèles Delft3D. Le maillage est composé de 279464 cellules. Pour les sections de la grille les plus éloignées des côtes, qui présentent généralement un intérêt moindre et une plus faible variabilité spatiale, des cellules carrées de 2 km de côté sont utilisées. Dans les régions côtières, la grille est formée de cellules triangulaires avec une résolution variable allant de 2 km à 20 m dans les zones les plus intéressantes (cf. Figure 2.2).

Le modèle SWAN est constitué d'une grille régulière de 2 km de côté couvrant la même région que le domaine d'écoulement, l'étendue de la grille est représentée par la boîte jaune sur la figure 2.1. Des grilles imbriquées de plus haute définition sont incluses autour des sites d'intérêt. Deux principales zones d'intérêt sont utilisées dans cette étude. Le site PTEC,

au large de l'île de Wight, et l'Alderney Race. Les zones imbriquées sont illustrées à la Figure 2.3 et décrites dans le Table 2.1.

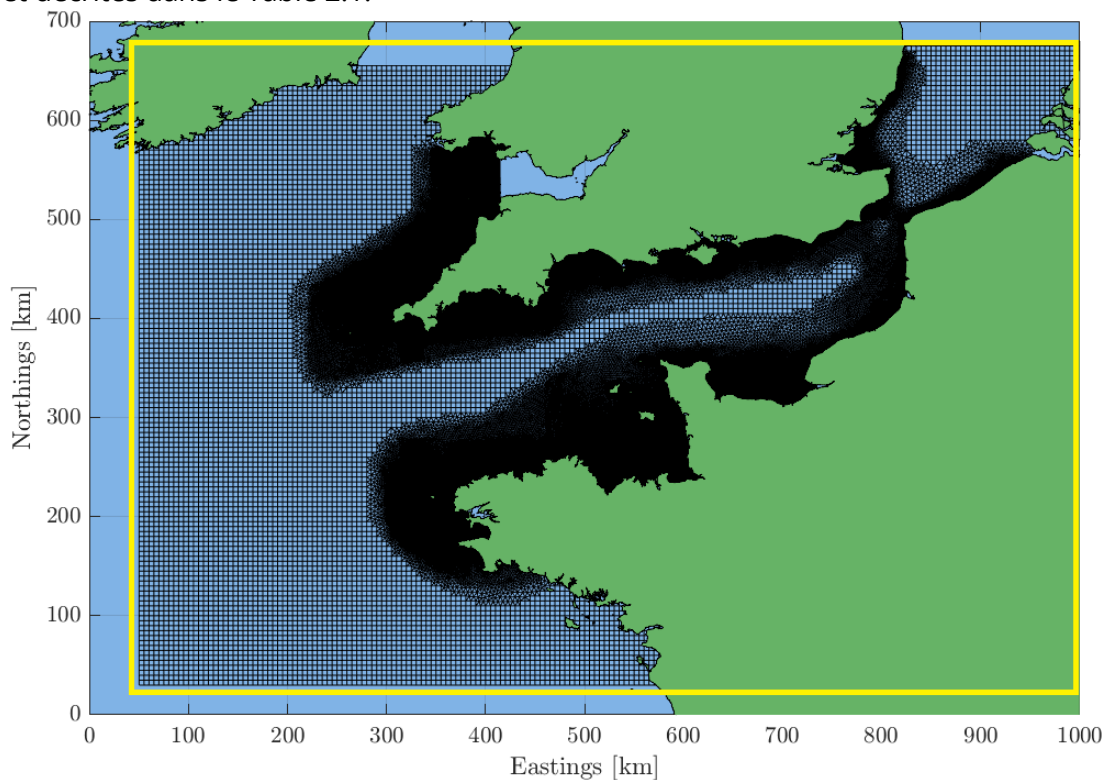


Figure 2.1. Domaine de calcul du modèle d'écoulement (grille noire). Étendue de la grille régulière des ondes SWAN (boîte jaune).

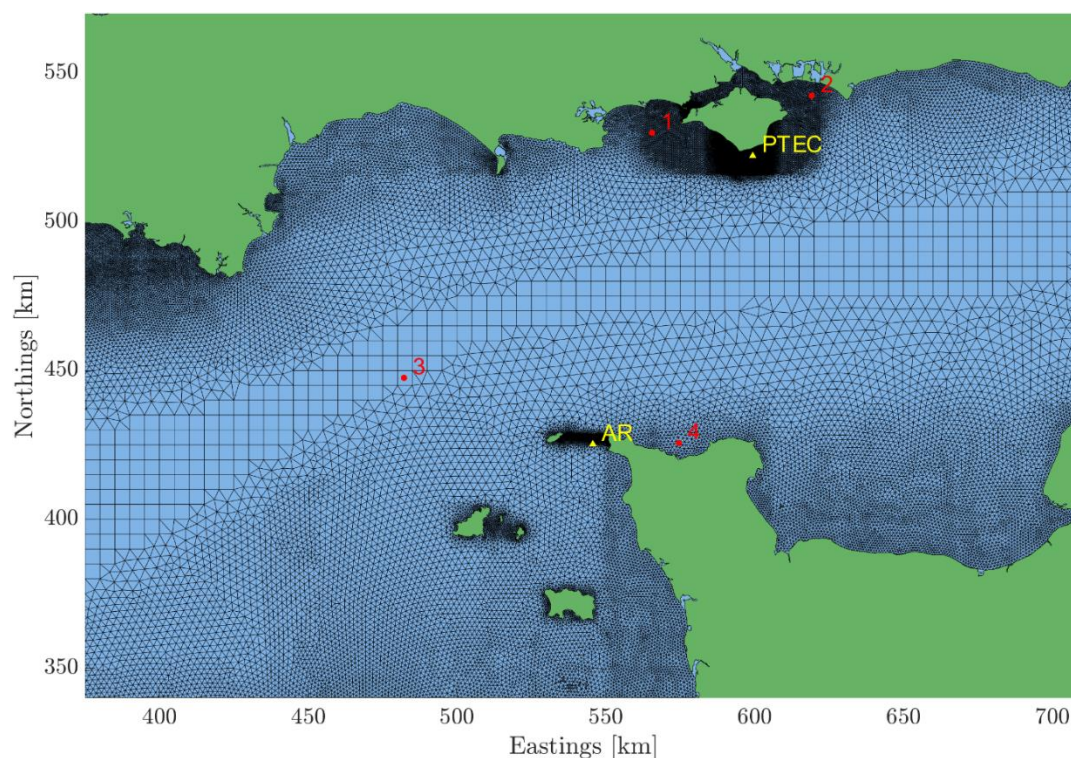


Figure 2.2. Zoom du domaine de calcul du modèle d'écoulement montrant l'emplacement du PTEC et de l'Alderney Race (jaune).

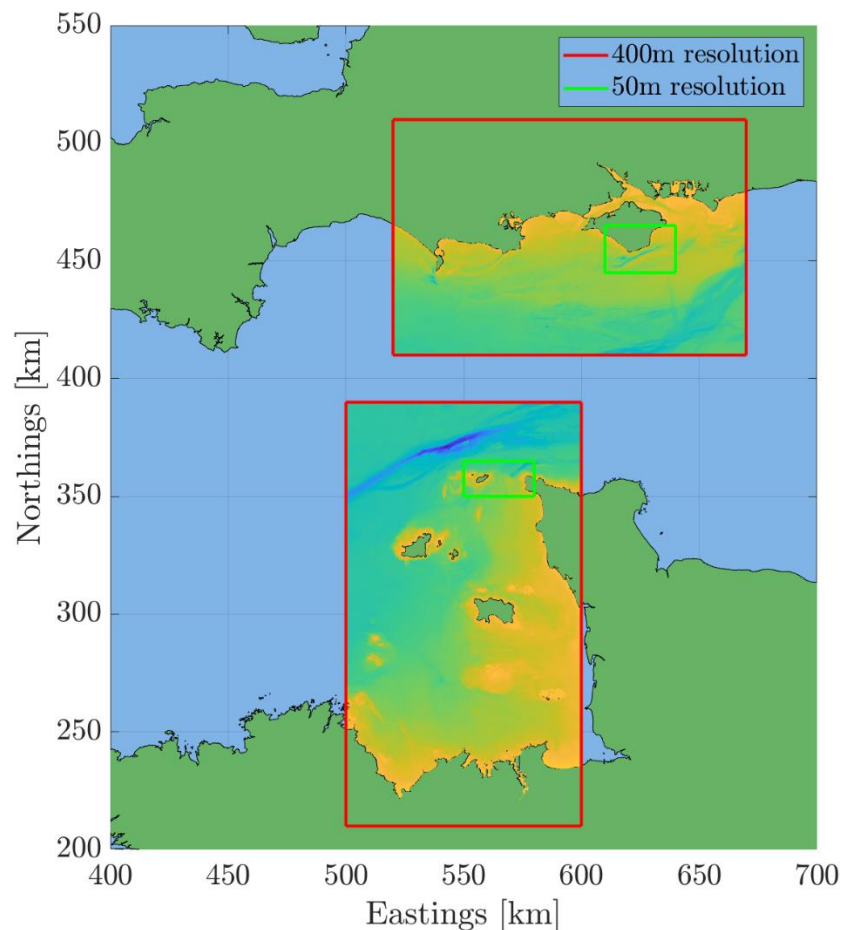


Figure 2.3. Emplacements des grilles imbriquées pour le modèle SWAN.

Table 2.1. Résolutions de la grille SWAN

Site	Résolution de la grille
Manche	2 km
Îles Anglo-Normandes	400m
Course d'Alderney	50m
Île de Wight	400m
PTEC	50m

2.2.2 Paramètres temporels

Les résultats du modèle s'étendent sur 32 ans pour les modèles d'écoulement et de vagues, couvrant la période du 1er janvier 1990 au 31 décembre 2021. Ce long ensemble de données contient une large gamme de conditions, y compris plus d'un cycle complet de marée lunaire de 18,6 ans. Cela signifie que la plus grande amplitude de marée astronomique et la plus grande vitesse d'écoulement sont capturées dans les données d'écoulement. Les conditions des vagues sont un processus stochastique aléatoire, il est donc nécessaire de disposer d'un long ensemble de données afin d'évaluer pleinement toutes les conditions. Dans le but d'entreprendre une analyse extrême, de nombreux événements de tempête sont nécessaires. Plus l'ensemble de données disponibles est long, plus l'incertitude des modèles de valeurs extrêmes est faible.

Le pas de temps de calcul du modèle d'écoulement est calculé par le solveur sur la base d'une condition de Courant. Cependant, il est limité à une valeur maximale de 30 secondes, ce qui est suffisant pour capturer tous les processus physiques dans le modèle. Le modèle de vagues a un pas de temps de calcul de 20 minutes, ce qui a été décidé comme un équilibre acceptable entre la précision du modèle et le temps d'exécution du calcul.

Les différentes entrées variant dans le temps sont indiquées dans le Table 2.2. Résumé des entrées du modèle DELFT 3D - FM. Lorsque le pas de temps de la quantité d'entrée est supérieur au pas de temps de calcul, les valeurs sont interpolées par le solveur.

Table 2.2. Résumé des entrées du modèle DELFT 3D - FM

Entrées	Source :	Résolution spatiale	Pas de temps
Bathymétrie	Mixte*	1 - 15 arcsec	-
Forçage du vent	ERA-5	Réseau régulier de 20 km	1 heure
Pression de l'air	ERA-5	Réseau régulier de 20 km	1 heure
Limite harmonique	TPXO-09	Sur les frontières ouvertes	Continu
Conditions limites des vagues	Modèle ERA-5 WAM	Grille régulière de 0,36 degré	1 heure

2.2.3 Autres paramètres numériques

Le modèle de vagues SWAN permet à l'utilisateur de définir les critères d'acceptation de la convergence du modèle. Des critères de convergence plus stricts devraient permettre d'obtenir une sortie de modèle plus précise, mais ils peuvent considérablement augmenter le temps de calcul. Le code SWAN est réglé pour accepter un critère de convergence de 98% ou pour continuer après 25 itérations.

2.2.4 Entrées et conditions limites

Ce qui suit est une description des entrées et des conditions aux limites fournies aux modèles.

2.2.4.1 Bathymétrie (modèles d'écoulement et de vagues)

La bathymétrie pour les modèles provient d'une combinaison de sources. Les zones autour du Royaume-Uni proviennent de Digimap à une résolution de 1 seconde d'arc (EDINA, 2013). Dans les eaux autour de la France, les données bathymétriques proviennent du bureau hydrographique français (SHOM, 2016) également à 1 seconde d'arc et sont compilées dans le cadre du projet HOMINIM. Une petite partie du coin sud-ouest de la grille était en dehors des limites des deux jeux de données, cela a été rempli à partir de la carte de bathymétrie mondiale GEBCO 2020 (GEBCO, 2020). La bathymétrie est présentée dans la Figure 2.4.

2.2.4.2 Vent et pression atmosphérique (modèles d'écoulement et de vagues)

Le modèle de vagues est forcé par les données de vitesse du vent provenant du jeu de données de réanalyse globale ERA-5 du Centre européen pour les prévisions

météorologiques à moyen terme (CEPMMT), il s'agit de données librement disponibles avec une excellente validation et documentation (Hersbach et. al. 2020). Ces mêmes données de vent et de pression atmosphérique sont également fournies au modèle d'écoulement. L'ensemble de données contient de nombreux paramètres atmosphériques de 1959 à aujourd'hui. Les données sont fournies sur une grille régulière avec une résolution spatiale de 20 km et une résolution temporelle de 1 heure.

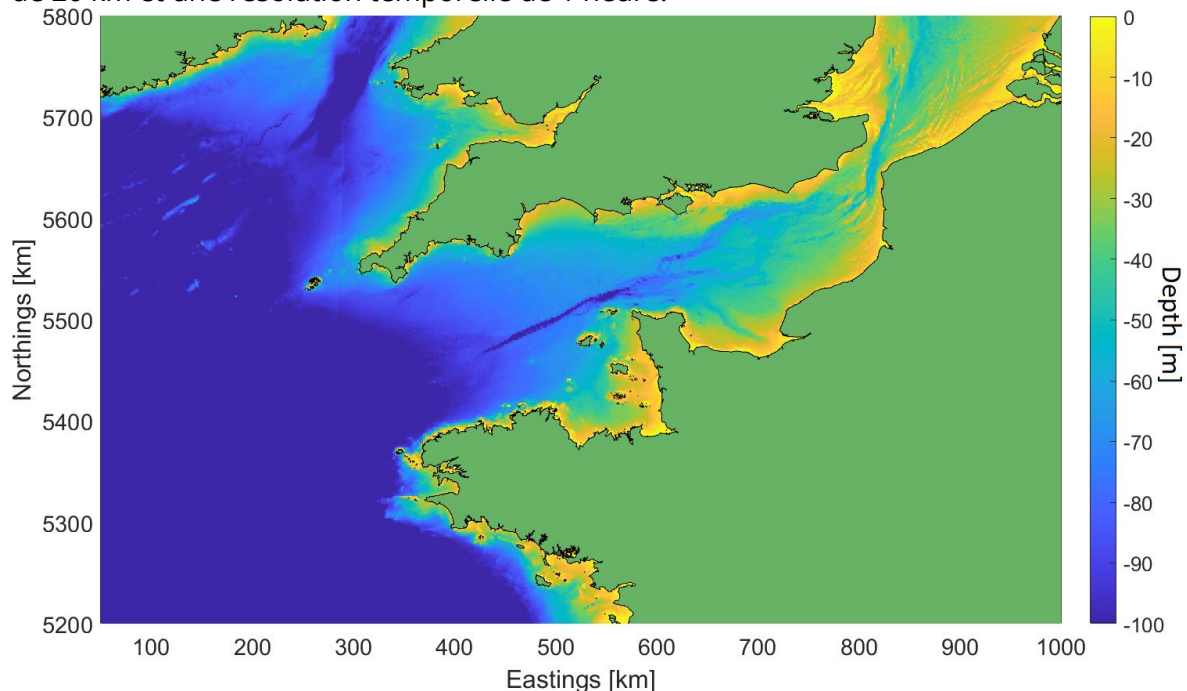


Figure 2.4. Bathymétrie à travers le domaine DELFT 3D - FM.

2.2.4.3 Limite harmonique du niveau d'eau (modèle d'écoulement)

Le modèle d'écoulement est forcé par un niveau d'eau variant dans le temps aux quatre frontières ouvertes. Le niveau d'eau est calculé à partir des composantes harmoniques astronomiques. L'amplitude et la phase des 11 plus grands constituants (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, M4, MS4, MN4) sont entrés dans le modèle, puis le niveau d'eau est calculé en interne. Les données proviennent du système de modèle TPXO-9 (Egbert, et. al. 1994). Comme toutes les limites du modèle sont éloignées des zones d'intérêt, il n'est pas nécessaire d'inclure des données de vitesse dans les conditions limites et les limites de niveau d'eau sont suffisantes.

2.2.4.4 Limites des vagues (modèle de vagues)

Aux frontières ouvertes, le modèle est forcé par des valeurs de paramètres de vagues (H_s , T_p , Dir , $Dspr$) provenant du jeu de données ERA-5, interpolées le long des points de frontière à une résolution d'une heure. Les données ERA-5 sont dérivées d'un modèle global de vagues WAM. Une description complète de ces données de vagues d'entrée provenant d'ERA-5 est donnée en ligne sur le site web du CEPMMT (Hersbach et. al. 2020).

2.2.4.5 Paramètres physiques

La friction du fond a été introduite comme une constante avec un coefficient de friction égal à 0,023. Bien qu'il soit possible d'entrer dans le modèle des valeurs de friction variant dans

l'espace, cela n'a pas été mis en œuvre dans ce travail. La température de l'eau a été fixée à 12° C et la salinité à 35 ppm.

2.2.5 Sorties

Les deux modèles ont fourni une sortie détaillée à 120 emplacements prédéfinis dans le domaine. Il s'agit des emplacements d'intérêt pour le projet ainsi que des emplacements des instruments de validation. À ces endroits, le modèle d'écoulement fournit la vitesse moyenne d'écoulement en profondeur, le niveau d'eau et les données de contrainte de cisaillement du fond à une résolution de 5 minutes. Le modèle de vagues fournit 45 champs incluant la hauteur, la période et la direction des vagues à une résolution de 20 minutes.

En plus de la sortie détaillée, les modèles fournissent également un plus petit nombre de quantités clés pour l'ensemble du domaine. Le modèle d'écoulement donne la vitesse et la direction de l'écoulement dans les 279 464 cellules de la grille sur une échelle de temps de 10 minutes. Le modèle de vagues fournit 6 quantités sur l'ensemble du domaine toutes les heures. Quelques exemples de résultats spatiaux sont présentés dans la Figure 2.5 et Figure 2.6.

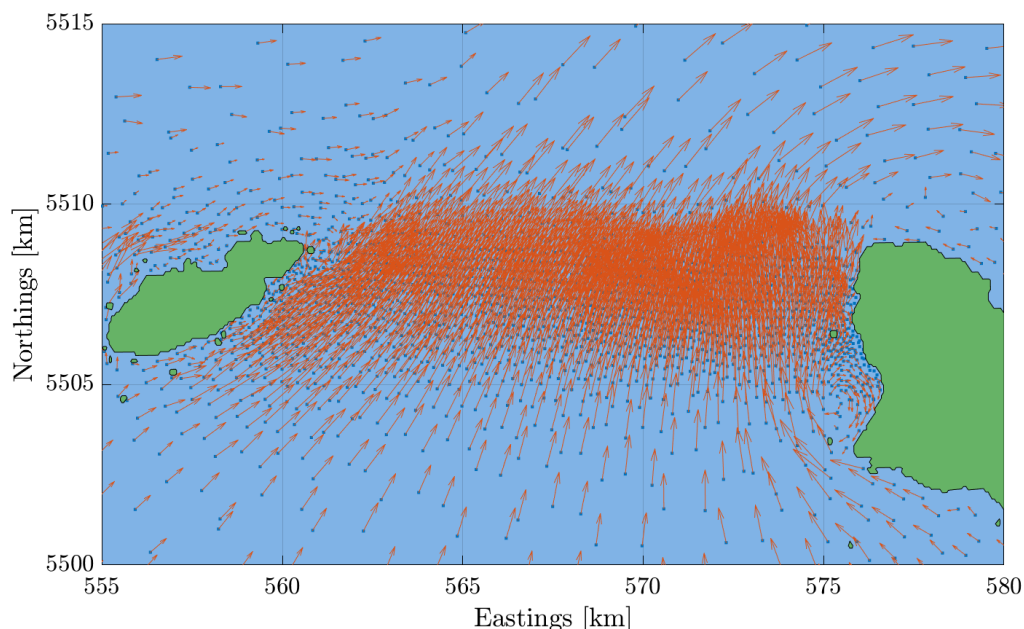


Figure 2.5. Exemple de l'écoulement modélisé à travers la course d'Aurigny à partir du modèle DELFT 3D - FM.

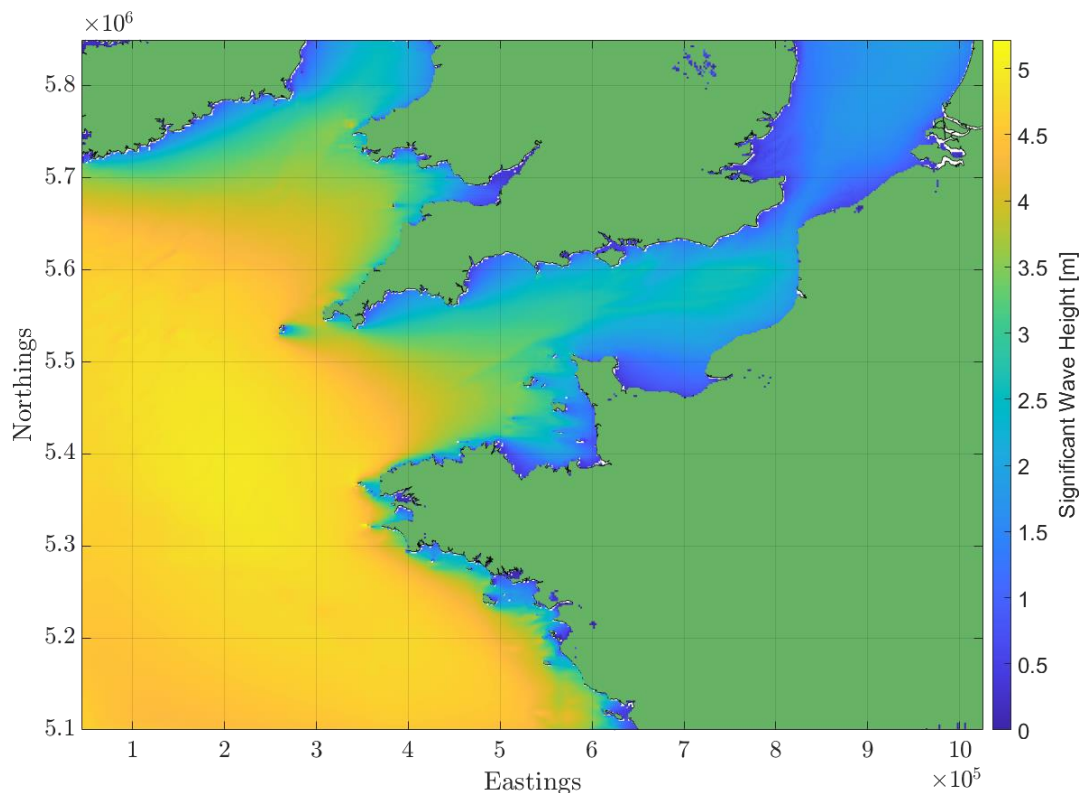


Figure 2.6. Hauteur significative moyenne des vagues à travers le domaine pour 2020 à partir du modèle SWAN.

3 Thétis : Université de Plymouth

3.1 Aperçu du modèle et de l'utilisation prévue

Thétis est un modèle océanique côtier à source ouverte, à grille non structurée, construit à l'aide du cadre d'éléments finis Firedrake. Le modèle *Thétis* de Ramsey Sound a été utilisé dans le cadre du projet TIGER par l'Université de Plymouth à trois fins principales : (a) établir la variabilité spatiale de la ressource hydrolienne dans le Sound (b) quantifier la performance énergétique des réseaux de turbines à courant de marée positionnés dans le Sound, et (c) aider Cambrian Offshore South West dans la planification des opérations pour la récupération de la turbine Delta Stream in situ et le redéploiement d'une turbine à courant de marée sur le site. En plus de ces trois objectifs principaux, l'Université de Plymouth a réalisé la modélisation de *Thétis* pour (d) générer des séries chronologiques de données sur l'énergie des courants de marée à partir de sites à travers le Royaume-Uni comme données d'entrée pour la modélisation du système énergétique (e) optimiser la forme des réseaux de turbines de courants de marée (en collaboration avec Orbital Marine Power et Black & Veatch), et (f) aider à établir la viabilité pratique du développement de l'énergie des courants de marée sur les sites entourant Ramsey Sound (en collaboration avec l'ORE Catapult). Le tableau 1 présente un résumé de ces activités. Les résultats de chaque tâche sont résumés ci-dessous.

Table 3.1. Résumé des tâches de modélisation de *Thétis* entreprises par l'Université de Plymouth.

Tâche	Livrable	Description	Publications/extraits
-------	----------	-------------	-----------------------

1. Modélisation du site et de la turbine	T1.7.2	-Évaluer l'impact de l'emplacement des éoliennes sur le rendement énergétique. -Modélisation des ressources hydroliennes de longue durée. -Relevé par drone des vitesses d'écoulement des marées	Coles DS et al. (2021a), Thiébot et al., (2022) Fairley et al., (2022) (Voir section 1.2.6.1)
2. Modélisation du réseau	T1.7.2 / T3.2.1 / T3.2.2	-Optimisation des réseaux/évaluation des impacts des réseaux sur le flux des marées.	Estimations du rendement énergétique des panneaux solaires communiquées à ORE Catapult. (voir section 3.2.6.2)
3. Planification des opérations	T1.7.2	-Fournir des prévisions détaillées des marées pour l'accès aux opérations.	Résultats communiqués à Cambrian Offshore (voir section 3.2.6.3)
4. Modélisation des systèmes énergétiques	T3.4.3	-Fourniture de séries chronologiques sur la puissance des courants de marée utilisées comme données d'entrée pour la modélisation des systèmes énergétiques.	Coles et al. (2021b), Pennock et al. (2022), Todeschini G et al. (2022), Frost C., (2022) (Voir section 3.2.6.4)
5. Optimisation de la forme du réseau	T3.2.2	-Optimisation de la forme du réseau Orbital O2 sur des sites imitant Alderney Race et St Catherine's Point (île de Wight).	Résultats communiqués à Orbital Marine Power et Black & Veatch (Voir section 3.2.6.5)
6. Évaluation des ressources - sites environnants	T3.2.1	-Prospection de sites pour établir la pertinence d'un site proche de Ramsey Sound pour le développement de l'énergie hydrolienne.	Résultats communiqués à ORE Catapult (Voir section 3.2.6.6)

3.1.1 Équations directrices

Thétis résout la forme non-conservative des équations non-linéaires des eaux peu profondes :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (H_d \tilde{\mathbf{u}}) = 0, \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla \tilde{\mathbf{u}} - \nu \nabla^2 \tilde{\mathbf{u}} + f \tilde{\mathbf{u}}^\perp + g \nabla \eta = -\frac{\tau_b}{\rho H_d} \quad (1.2)$$

$$\frac{\tau_b}{\rho} = g n^2 \frac{|\tilde{\mathbf{u}}| \tilde{\mathbf{u}}}{H_d^{1/3}}, \quad (1.3)$$

où t est le temps, η est la hauteur d'eau, H_d est la profondeur totale de l'eau, $\tilde{\mathbf{u}}$ est le vecteur vitesse moyennée en profondeur avec $\tilde{u}$ et $\tilde{v}$ désignant respectivement les composantes est et nord de l'écoulement, ν est la viscosité cinématique, g est l'accélération due à la gravité et ρ est la densité de l'eau de mer. L'expression $f \tilde{\mathbf{u}}^\perp$ décrit la force de Coriolis, où $\tilde{\mathbf{u}}^\perp$ est le vecteur vitesse tournée dans le sens inverse des aiguilles d'une montre sur 90° , $f = 2\Omega \sin(\zeta)$, Ω est la fréquence angulaire de la rotation de la Terre et ζ est la latitude. La contrainte de

cisaillement du lit est décrite par τ_b et n est le coefficient de Manning. Une formulation de mouillage et de séchage décrite dans Karna et al. (2011) est utilisée pour modéliser les processus intertidaux.

Les effets du vent et des vagues ne sont pas inclus dans le modèle. Le modèle est exécuté en mode de moyenne de profondeur afin d'obtenir une efficacité de calcul acceptable pour effectuer des simulations pour la gamme d'objectifs énoncés dans le tableau 1. Cela empêche les modèles d'être en mesure de résoudre l'écoulement de la couche limite dans le plan vertical, ce qui a été jugé acceptable étant donné la précision du modèle en deux dimensions (voir Mackie et al. (2021)), et l'efficacité de calcul supplémentaire que cela procure.

Le modèle *Thétis* utilise une discrétisation spatiale par éléments finis de type Galerkin discontinu (DG-FEM) par le choix d'une paire d'éléments finis vitesse-pression $P_{1DG} - P_{1DG}$. Une approche semi-implicite à pas de temps de Crank-Nicolson est appliquée. Les équations non linéaires discrétisées des eaux peu profondes sont résolues de manière itérative avec l'algorithme de Newton en utilisant la bibliothèque PETSc (Balay et al., 2016).

3.2 Description du modèle

3.2.1 Paramètres spatiaux

Le modèle *Thétis* du Ramsey Sound utilise un maillage non structuré généré à l'aide de *qmesh*. Figure 3.1 montre l'étendue du domaine, qui couvre une grande partie de la mer d'Irlande, ainsi que des parties de la mer Celtique et de la Manche Nord. La résolution spatiale du maillage est de 8 km à ses extrémités extérieures, et raffinée à environ 250 m autour des côtes pour capturer les processus intertidaux, et à 25 m dans le Ramsey Sound pour résoudre les caractéristiques d'écoulement complexes autour des caractéristiques bathymétriques telles que Horse Rock et les Bitches.

3.2.2 Paramètres temporels

Le modèle *Thétis* adopte un pas de temps de 100 s. En général, la période couverte par le modèle est de 1 mois. Cela permet d'effectuer une analyse harmonique pour extrapoler les données modélisées sur 1 an afin d'estimer le rendement énergétique annuel. Lorsque le modèle est exécuté pour aider à la planification des opérations (tâche 3), le modèle est généralement exécuté pendant une semaine pour couvrir toute la période de marée de mortes-eaux pendant laquelle les opérations peuvent avoir lieu sur le site. Les variables de sortie du modèle sont écrites à une résolution de 10 minutes pour capturer la variabilité temporelle des vitesses et des directions d'écoulement modélisées.

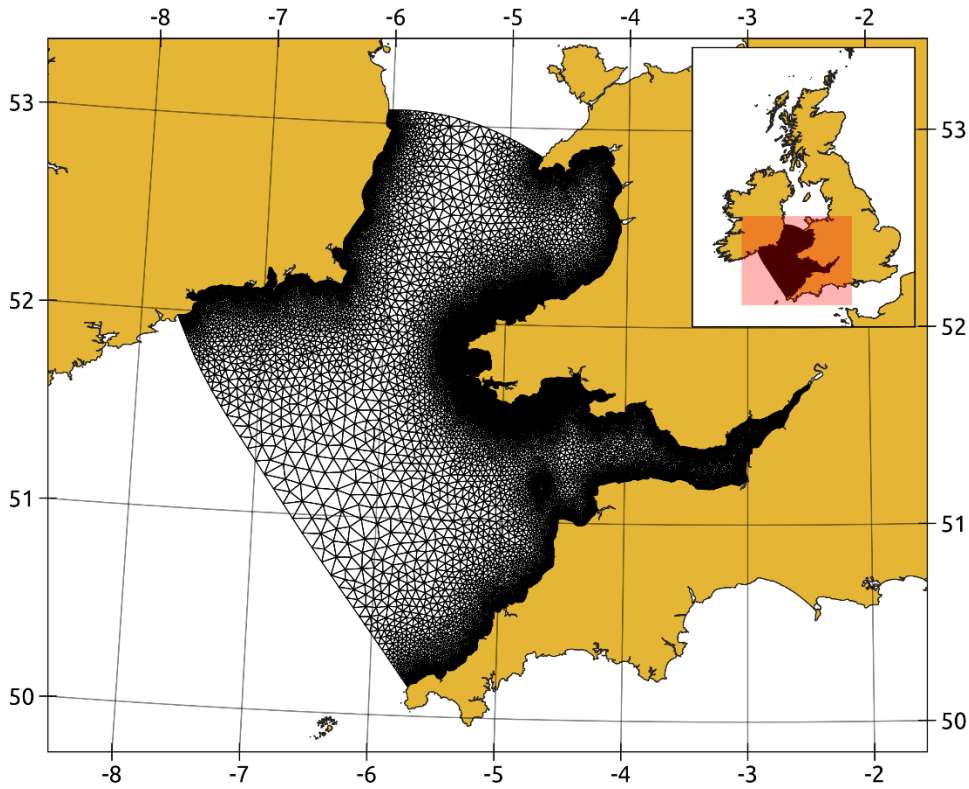


Figure 3.1. Domaine et maillage de calcul pour le modèle Thétis de Ramsey Sound et des mers environnantes.

3.2.3 Représentation des turbines hydroliennes

La tâche 2 simule les réseaux de turbines de courant de marée dans le Ramsey Sound. Le coefficient de traînée ajouté du réseau de turbines est paramétré en utilisant un coefficient de traînée du réseau de turbines, C_a qui est ajouté à la paramétrisation existante de la traînée du fond marin dans les équations de momentum (Eq. 1.2). Le coefficient de traînée du réseau de turbines est paramétré à l'aide des équations 1.4-1.5 :

$$\lambda = \frac{A_t n}{A_a}, \quad (1.4)$$

$$C_a = \frac{1}{2} \lambda C_d, \quad (1.5)$$

où λ est la densité du réseau, qui est définie comme le rapport entre la surface balayée totale du réseau et la surface en plan du réseau. A_t est la surface balayée d'un rotor de turbine, n est le nombre de turbines dans le réseau, et A_a est la surface en plan du réseau. C_a est le coefficient de traînée du réseau de turbines et C_d est le coefficient de traînée d'une seule turbine. Le coefficient de traînée de l'ensemble de turbines est appliqué uniformément sur la surface du plan de l'ensemble. Cette approche est souvent appelée l'approche de la traînée continue du réseau, qui est différente de l'approche de la traînée de la turbine discrète où chaque turbine individuelle est assignée à son propre terme de traînée. L'approche de traînée continue ne peut pas simuler les effets de blocage locaux causés par les sillages/écoulements de contournement des turbines en amont qui empiètent sur les turbines en aval, par exemple. Ces impacts ont été minimisés dans la modélisation de Thétis en maintenant une densité de réseau relativement faible, afin de conserver un espacement élevé entre les turbines, comme le recommandent Coles et al, (2016).

La zone du plan de réseau a été dérivée en fonction d'une série de contraintes pratiques qui déterminent la viabilité du positionnement des turbines, sur la base des travaux menés par l'ORE Catapult. Ces contraintes comprennent la profondeur (LAT), le gradient bathymétrique, les vitesses d'écoulement, les voies de navigation et les zones de conservation. Figure 3.2 montre la zone de plan de réseau résultante. Des simulations ont été effectuées pour quantifier les performances du réseau lorsque 20 à 80 turbines sont réparties uniformément sur la zone du plan du réseau.

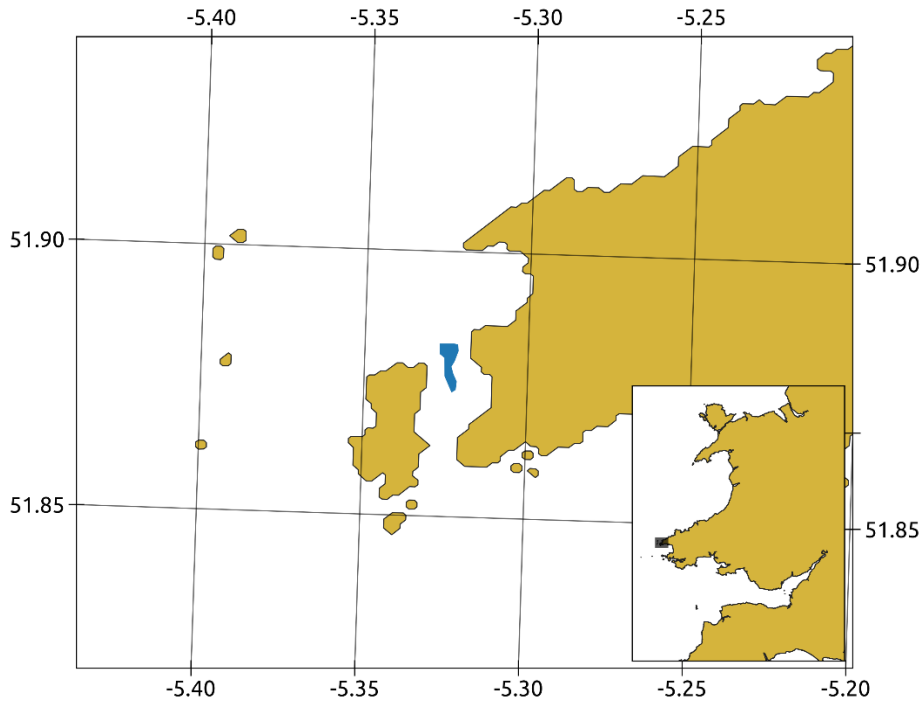


Figure 3.2. Zone du plan du réseau (bleu) dans le Ramsey Sound.

3.2.4 Autres paramètres numériques

Le coefficient de Manning, n , qui est utilisé pour quantifier la contrainte de cisaillement du lit (Eq. 1.3), varie sur le domaine en fonction de la distribution spatiale des différents matériaux du lit, en utilisant les équations 1.7-1.9 (Soulsby, 2005) ;

$$k_s = 2.5d_{50}, \quad (1.7)$$

$$z_0 = \frac{k_s}{30}, \quad (1.8)$$

$$n = 0.04 \sqrt[6]{k_s}, \quad (1.9)$$

où k_s est le paramètre de Nikuradse pour la rugosité des grains de sable, d_{50} est la taille du grain associé, et z_0 est la longueur de la rugosité. D'après les données publiées par le British Geological Survey, la granulométrie associée varie considérablement, de 768 à 2048 mm pour le substratum rocheux, à 0,0625 à 0,125 pour le limon, l'argile et la boue, ce qui se traduit par une large gamme de coefficients de Manning mis en œuvre dans le domaine. Les régions du domaine où les observations de l'enquête ne sont pas disponibles sont estimées avoir les propriétés du "gravier fin", avec une taille de grain d_{50} de 6 mm.

3.2.5 Entrées et conditions limites

Le modèle *Thétis* de Ramsey Sound est piloté par des données d'élévation de marée extraites du modèle European Shelf 2008 (Egbert et al., 2010) au niveau de deux frontières ouvertes situées en mer d'Irlande et en mer Celtique. Le modèle utilise une variété de données bathymétriques ; la majorité du domaine utilise des données Edina Digimap Service avec une résolution spatiale qui varie de 18 à 120 m (Seazone Solutions Ltd, 2014). Les données de bathymétrie obtenues auprès du bureau hydrographique du Royaume-Uni, avec une résolution de 2 m (Bangor Université, 2017), sont utilisées sur une région de 11 × 12 km qui inclut le Ramsey Sound.

3.2.6 Sorties

3.2.6.1 Modélisation du site et de la turbine (tâche 1)

Les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur ont été extraites du modèle *Thétis* Ramsey Sound aux emplacements DS, a, b et c (illustrés dans la figure 3.3). 3.3 a). DS est l'emplacement du dispositif Delta Stream. Les emplacements d'extraction des données ont été choisis en fonction de leur aptitude à l'extraction de l'énergie des courants de marée (c'est-à-dire une profondeur supérieure à 15 m et des vitesses d'écoulement moyennes dans le temps supérieur à 1,5 m). Les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur sur deux cycles de crue et de reflux sont présentées dans la 3.3 b).

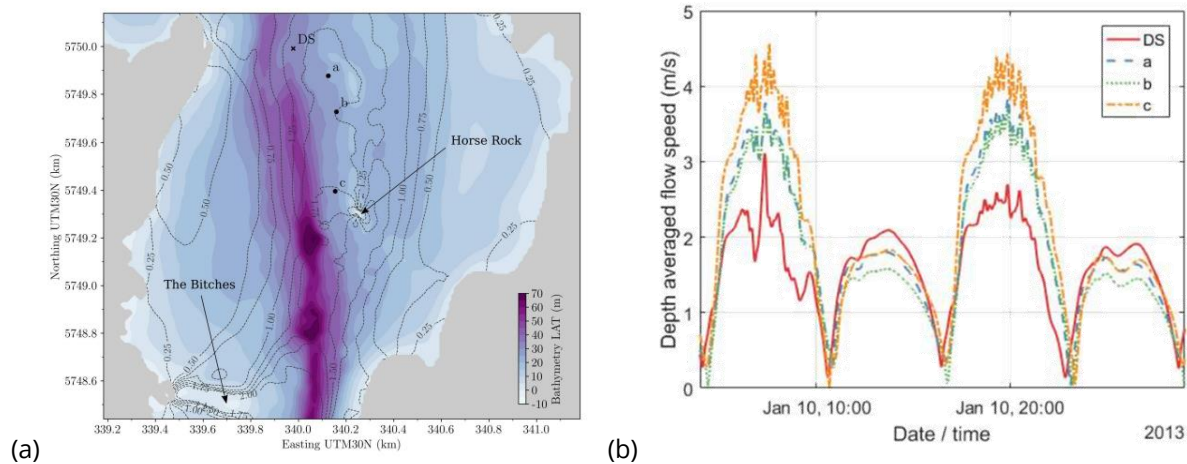


Figure 3.3. (a) Emplacements d'extraction des données *Thétis* dans le Ramsey Sound, et (b) vitesses d'écoulement moyennes en profondeur aux emplacements DS, a, b, et c sur deux cycles de crue et de reflux.

Les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur ont été utilisées pour estimer le rendement énergétique annuel des turbines situées à chaque emplacement. Les estimations du rendement énergétique ont été utilisées pour estimer le coût de l'énergie extraite à chacun des quatre emplacements, sur la base d'un modèle de coût simple développé à l'Université de Plymouth. Les modèles *Thétis* et de coût ont été utilisés ensemble pour estimer le diamètre du rotor et la puissance nominale des turbines nécessaires pour minimiser le coût de l'énergie sur chacun des quatre sites. Les résultats de ce travail sont publiés dans Coles et al. (2021), et résumés dans le tableau 3.2. Table 3.2 ci-dessous. Les principales conclusions tirées de ce travail sont :

- Il existe un degré élevé d'asymétrie de la marée de crue et de reflux aux emplacements des farines (bien que moins prononcé à l'emplacement DS), avec des magnitudes de vitesse d'écoulement significativement réduites pendant les marées de crue, causées par le sillage formé par Horse Rock.

- Compte tenu de la forte variation spatiale des ressources en courants de marée dans le Ramsey Sound, il existe un potentiel important pour minimiser les dépenses d'investissement par unité de production d'énergie en optimisant la puissance nominale et le diamètre du rotor de là ou des turbines, ainsi que leur micro-situation.

Table 3.2. Estimation du rendement énergétique annuel et du coût d'investissement des turbines aux emplacements DS, a, b et c dans le Ramsey Sound.

Localisation	Puissance nominale	Diamètre du rotor	CapEx des turbines	Rendement énergétique annuel	CapEx/MWh
DC	0,4 MW	15 m	2.4 m	1,2 GWh	82 £/MWh
A	0,6 MW	13 m	2.3 m	1,6 GWh	58 £/MWh
b	0,6 MW	13m	2.3 m	1,5 GWh	64 £/MWh
c	0,7 MW	12 m	2.2 m	1,9 GWh	49 £/MWh

Le modèle *Thétis* de Ramsey Sound a également été utilisé pour quantifier les impacts du cycle nodal lunaire de 18,6 ans sur la ressource énergétique de Ramsey Sound. Les résultats de ce travail sont publiés dans Thiebot et al. (2022). Le modèle a également été utilisé pour aider à planifier des enquêtes par drone dans le Ramsey Sound, dans le but de quantifier la performance des techniques d'évaluation des ressources en courants de marée (Fairley et al., 2022).

3.2.6.2 Modélisation du réseau (tâche 2)

La modélisation *Thétis* a été utilisée pour quantifier les performances de réseaux situés dans le Ramsey Sound et utilisant des turbines de 0,5 MW avec un rotor de 15 m de diamètre. La zone du plan du réseau est illustrée à la Figure 3.2. Table 3.3 résume le rendement énergétique annuel estimé et le facteur de capacité des réseaux. Les résultats montrent que si le rendement énergétique annuel du réseau augmente de 200 % lorsque le nombre de turbines passe de 20 à 80, le facteur de capacité du réseau est réduit de 25 %. Comme les projets opérationnels nécessitent des facteurs de capacité de 0,4 pour obtenir un financement (Black & Veatch, 2020), ces résultats indiquent qu'il est très peu probable que Ramsey Sound puisse faciliter le développement de réseaux à grande échelle. Les résultats de ce travail sont utilisés par l'ORE Catapult pour être inclus dans leur rapport de développement de site pour le Ramsey Sound (livrable T3.2.1).

Table 3.3. Résumé des estimations du rendement énergétique annuel pour les réseaux de 20 à 80 turbines dans le Ramsey Sound.

Nombre de turbines	Capacité du réseau	Rendement énergétique annuel	Facteur de capacité
20	10 MW	34,8 GWh	0.40
40	20 MW	63,3 GWh	0.36
60	30 MW	87,4 GWh	0.33
80	40 MW	103,6 GWh	0.30

3.2.6.3 Planification des opérations (tâche 3)

Le modèle *Thétis* a été utilisé pour établir la dynamique de l'écoulement autour de l'étalement de courant dans le Ramsey Sound. Le but de ce travail est d'aider Cambrian Offshore, qui est

chargé de récupérer la turbine Deltastream in-situ, installée par Tidal Energy Ltd en 2015. Figure 3.4 fournit un exemple de l'élévation, de la vitesse d'écoulement et de la direction des sorties de *Thétis* fournies à Cambrian Offshore par l'Université de Plymouth.

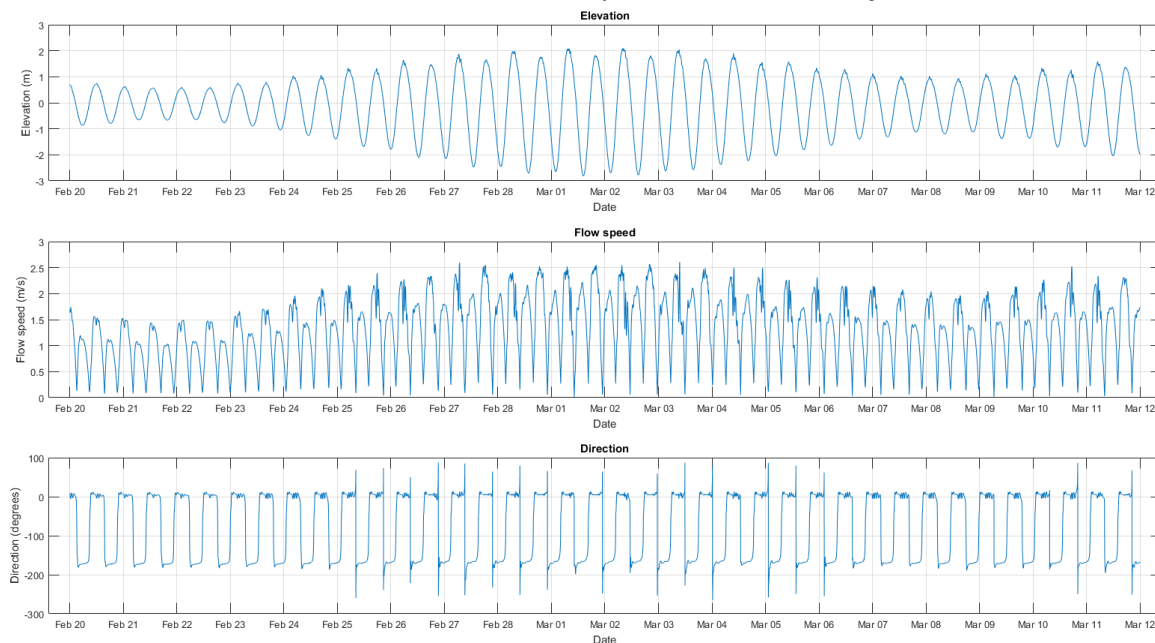


Figure 3.4. Exemple de sorties *Thétis* fournies à Cambrian Offshore pour faciliter la planification opérationnelle.

3.2.6.4 Modélisation du système énergétique (tâche 4)

Une variété de modèles *Thétis* à l'échelle régionale couvrant les ressources en courant de marée haute ont été utilisés pour dériver des données de séries chronologiques de puissance pour des projets à travers le Royaume-Uni. L'étendue spatiale des modèles est présentée dans la Figure 3.5. Ces séries chronologiques de puissance dérivées des résultats de *Thétis* ont été utilisées comme entrées dans la modélisation des systèmes énergétiques (Frost, 2022, Pudjianto et al., 2022, Pennock et al., 2022, Coles et al., 2021c).

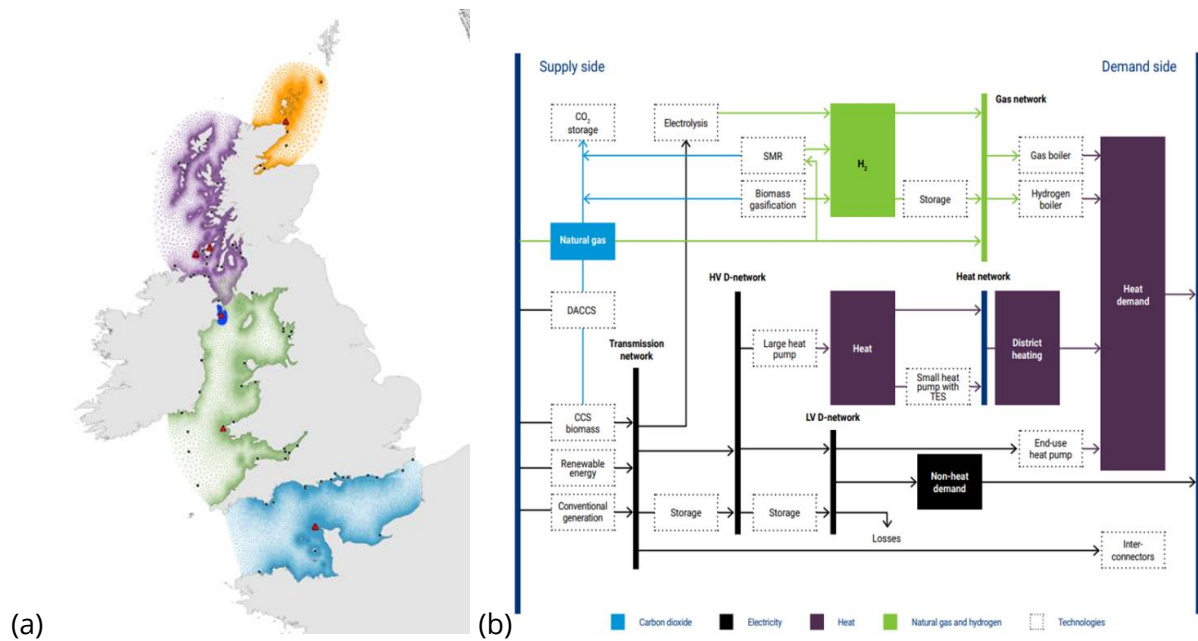


Figure 3.5. (a) Aperçu des domaines Thétis à l'échelle régionale autour du Royaume-Uni, couvrant le Pentland Firth et les eaux des Orcades (orange), l'ouest de l'Écosse (violet), la mer d'Irlande (vert) et la Manche (bleu), (b) Modèle de système énergétique global intégré (IWES) (Pudjianto et al., 2022).

3.2.6.5 Optimisation de la forme du réseau (tâche 5)

La modélisation *Thétis* a été entreprise pour établir la sensibilité du rendement énergétique annuel du réseau à la forme du réseau, en utilisant l'approche de la traînée continue pour la modélisation du réseau. Ce travail est entrepris pour Orbital Marine Power, la traînée du réseau est donc paramétrée en utilisant les caractéristiques de traînée du dispositif O2. Figure 3.6 fournit une illustration des différentes formes de réseau simulées dans *Thétis*, avec des caractéristiques résumées dans le Table 3.4. Ce travail a d'abord utilisé l'Alderney Race comme site d'étude de cas.

Table 3.4. Résumé des estimations de rendement énergétique de *Thétis* pour des réseaux de forme variable dans la course d'Alderney.

Non. Rameaux	Turbines par rangée	Largeur du réseau [m]	Longueur du réseau [m]
2	48	9640	195.5
4	24	4792	586.5
6	16	3176	977.5
8	12	2368	1368.5

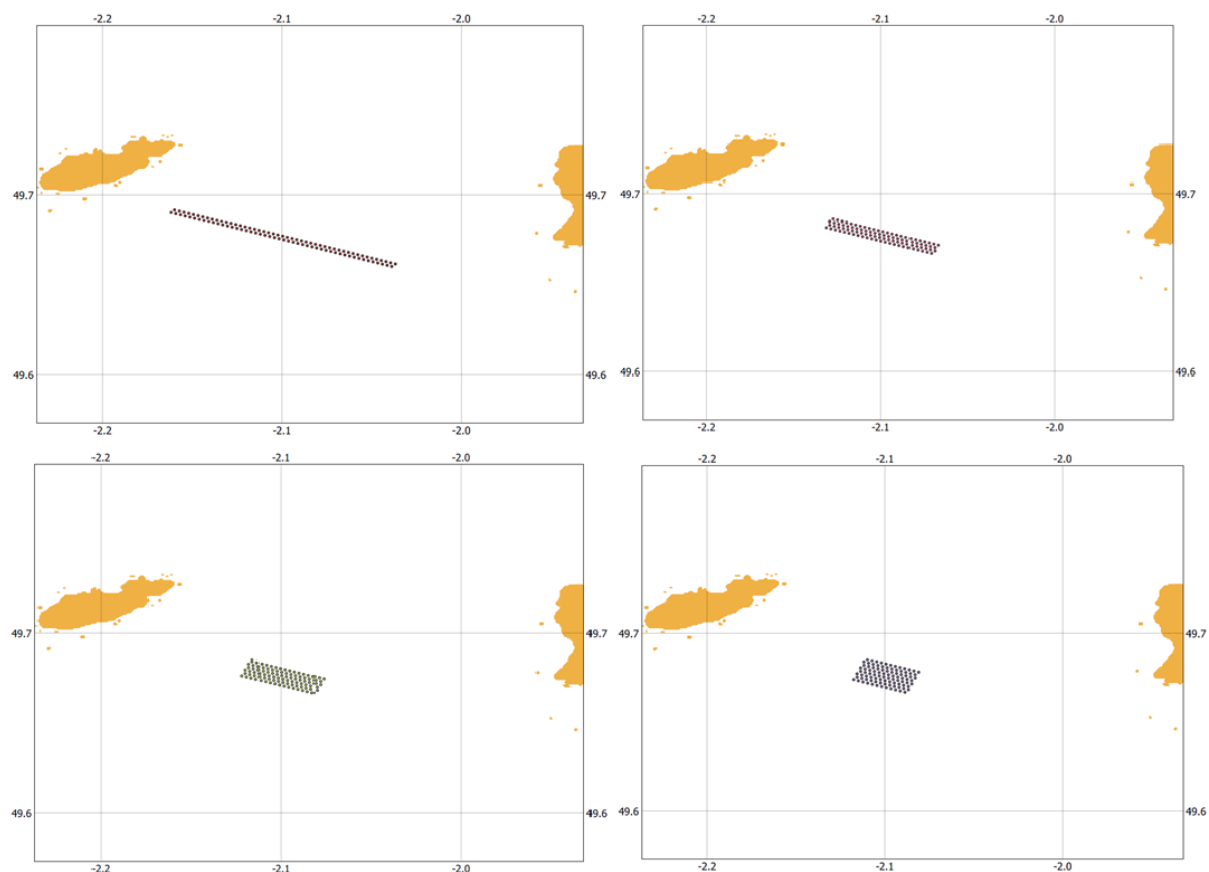


Figure 3.6. Résumé des formes de réseaux simulées dans Thetis.

3.2.6.6 Évaluation des ressources - sites environnants (tâche 6)

Le modèle *Thétis* a été utilisé pour simuler les flux de marée sur les sites entourant le Ramsey Sound. Ce travail a été entrepris pour aider à établir la viabilité du développement de l'énergie hydrolienne dans la région du Pembrokeshire, et a été entrepris en collaboration avec les Catapults ORE, qui ont étendu leur travail de modélisation des contraintes pratiques entrepris à Ramsey Sound aux régions environnantes. Figure 3.7 montre la cartographie des contraintes pratiques, qui a mis en évidence St David's Head, North Bishop et Ynes Bery West comme sites potentiels pour le développement de l'énergie hydrolienne, sur la base de considérations telles que la profondeur, la pente du fond marin, les vitesses d'écoulement, les voies de navigation et les zones de conservation.

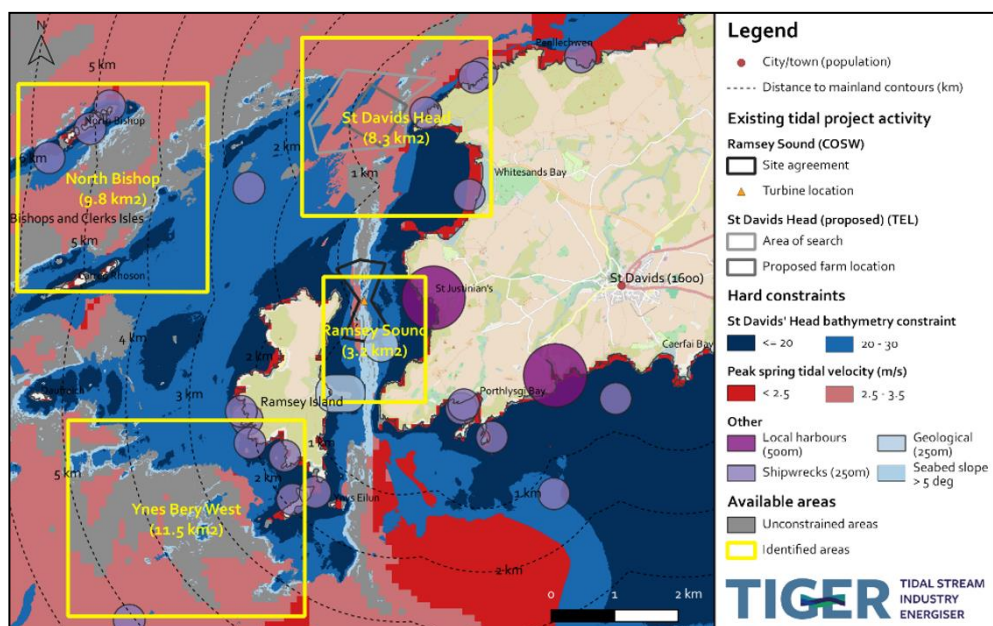


Figure 3.7. Cartographie des contraintes pratiques de Ramsey Sound, St Davids Head, North Bishop et Ynes Bery West, basée sur les sorties de vitesse d'écoulement de la modélisation Thetis.

4 Palabos LBM-LES : Université de Caen Normandie

4.1 Aperçu du modèle et de l'utilisation prévue

Palabos est un logiciel libre qui met en œuvre la méthode de Boltzmann en treillis (LBM) (Latt et al., 2021). Il résout l'équation de Boltzmann sur des grilles cartésiennes et inclut un modèle de sous-maille (modèle statique de Smagorinsky (Malaspinas et al., 2012)) pour réaliser des simulations de grands tourbillons (LES).

Le modèle est utilisé pour la simulation d'écoulements turbulents de marée à haute définition temporelle et spatiale (respectivement ~ 0.005 s et ~ 0.3 m) et sur de courtes étendues spatiales et temporelles (respectivement ~ 0.5 km² et ~ 30 min). Le but est de caractériser la turbulence générée au fond de la mer. Les caractéristiques de cette simulation conduisent à des maillages lourds (~ 200 millions de nœuds de mailles) et nécessitent des moyens de calcul adéquats (500 Go à 1 TB de mémoire vive disponible, 15000 à 50000 heures CPU).

Le modèle ne peut pas gérer les variations temporelles du niveau de la mer, les vagues et les variations de la direction générale du flux. Il devrait être utilisé sur des zones et des échelles de temps où la direction de l'écoulement moyenne dans le temps est à peu près uniforme. Il peut être utilisé pour fournir des informations pour les études évaluant l'interaction flux-turbine.

4.2 Description du modèle

4.2.1 Paramètres spatiaux

La grille est tridimensionnelle et cartésienne. Le domaine de simulation est découpé en zones de différentes résolutions de maillage. Ces résolutions sont nécessairement proportionnelles à la résolution la plus fine par un facteur de puissance de deux. Les simulations typiques peuvent couvrir environ 0,5 km² pour les profondeurs typiques des sites d'écoulement de marée. Le domaine doit suffisamment être long pour que le processus turbulent puisse pleinement se développer et atteindre la surface (~ 1 km) (Mercier et al., 2020a). Le domaine doit suffisamment être large pour éviter les problèmes de proximité et pour ne pas contraindre l'écoulement (~ 0.5 km) (Mercier et al., 2021b).

La résolution de la grille doit suffisamment être fine pour capturer le phénomène instationnaire généré près du fond de la mer. Typiquement, le volume près du fond marin doit avoir une résolution d'approximativement 0.3 m et le volume près de la surface de la mer peut être plus grossier (0.6 m). Les sites d'intérêt peuvent être raffinés pour une meilleure résolution du maillage. Cependant, un obstacle donné (avec la totalité du fond marin) doit entièrement être contenu dans un domaine de résolution de maille constante.

Une illustration du maillage pour le site de Paimpol-Bréhat est présentée dans la. La résolution du maillage est indiquée par des carrés de différentes tailles. Chaque bord de carré est constitué de 28 nœuds de maillage. L'illustration met en évidence la différence de résolution entre une zone raffinée près du fond marin et une zone plus grossière près de la surface. La résolution du maillage par rapport aux obstacles du fond marin est visible sur la 4.2 où chaque carré représente un nœud de maillage. La zone raffinée suit les variations d'élévation du fond marin.

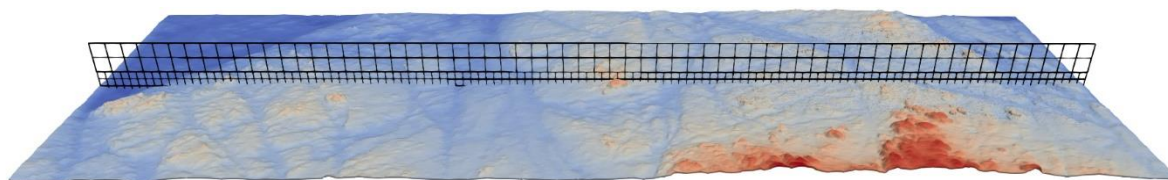


Figure 4.1. Bathymétrie du domaine et aperçu des zones maillées. Les bords carrés noirs sont constitués de 28 nœuds de maillage.

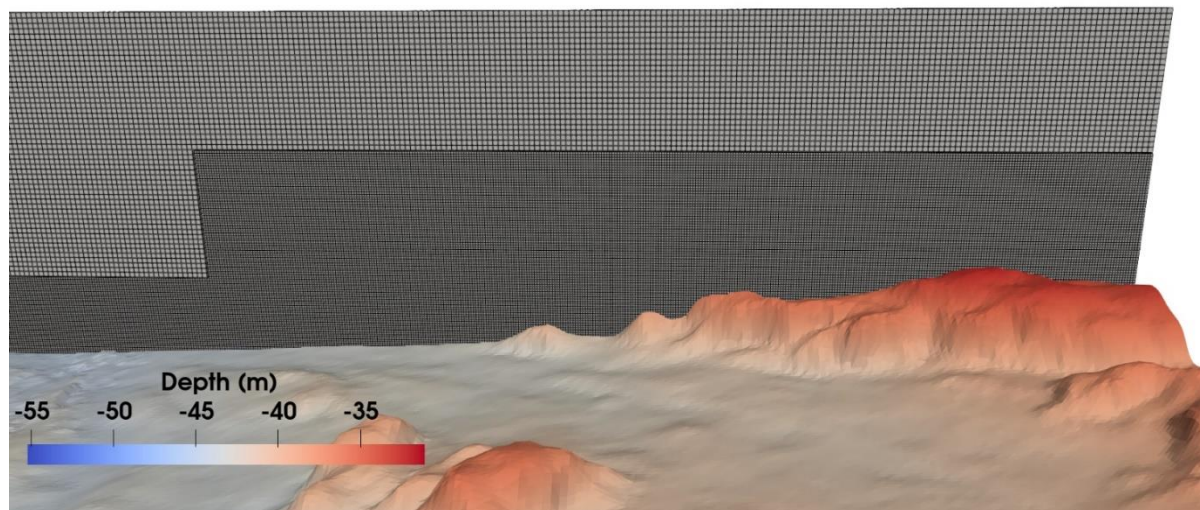


Figure 4.2. Détail du maillage LBM-LES de Palabos pour le site de Paimpol-Bréhat.

4.2.2 Paramètres temporels

Le modèle peut couvrir des périodes de l'ordre de quelques dizaines de minutes. Cette période est choisie, car elle est suffisamment longue pour extraire des statistiques turbulentes convergentes (typiquement 10 minutes dans les régimes d'écoulement établis). Elle ne doit pas être beaucoup plus longue, car le modèle ne gère pas les variations de l'élévation de la mer ou de la direction générale de l'écoulement.

Le pas de temps est fixe et est proportionnel à la résolution du maillage. Il diffère donc d'une zone de raffinement à l'autre. Près du fond de la mer, il est précisément de l'ordre de 0,005 seconde. Il doit suffisamment être petit pour garantir la stabilité numérique : le nombre de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) doit être inférieur à 0,1. Précisément, nous avons choisi un nombre CFL de 0,075.

Le pas de temps de sortie est personnalisable et dépend de l'application. Par exemple, une sortie unique de l'ensemble du domaine de simulation à la fin de la simulation pour l'analyse des quantités moyennes, ou des sorties à haute fréquence, éventuellement sur des zones de contraintes, pour alimenter d'autres modèles de simulation ou pour étudier les phénomènes de turbulence.

4.2.3 Représentation des turbines hydroliennes

Les turbines ne sont pas représentées dans Palabos dans le cadre du projet TIGER. C'est toutefois possible. Le modèle le plus adéquat est la méthode de la ligne d'actionneur (Grondeau et al., 2019), car il générerait des sillages instationnaires réalistes qui peuvent être

capturés par le modèle LBM-LES. La CFD résolue par les pales serait trop coûteuse en termes de calcul en raison du maillage cartésien (Grondeau et al., 2020 ; Grondeau et al. 2022). La théorie du disque de l'actionneur pourrait être utilisée (Nguyen et al., 2016) ou la théorie du momentum des éléments de la pale (Khaled et al., 20221) serait également réalisable.

4.2.4 Entrées et conditions limites

Le niveau d'eau est constant dans les simulations de Palabos. Sa valeur doit être fournie, à partir de mesures ou de simulations régionales. La condition aux limites supérieures est un glissement libre, complété par une zone de viscosité accrue pour éviter les instabilités numériques. Ainsi, les effets du vent ou des vagues ne peuvent pas être inclus dans ce modèle.

La vitesse d'écoulement est idéalement fournie par les mesures ADCP. Cette vitesse est atteinte dans la simulation soit par la convergence de la vitesse d'écoulement autour d'une valeur cible dans le cas de limites longitudinales périodiques, soit par le choix de la condition limite d'entrée. Dans tous les cas, la vitesse fluctue au début de la simulation, en raison de la génération de turbulences, jusqu'à ce qu'elle atteigne un régime d'écoulement établi. Dans le cas de frontières périodiques, une force volumique est appliquée sur l'ensemble du domaine de simulation et est contrôlée par la vitesse de l'écoulement : la force augmente au début de la simulation parce que le niveau croissant de turbulence ralentit l'écoulement. Lorsque la vitesse d'écoulement et la force volumique atteignent un état stable, on considère que le régime d'écoulement est établi. Cela se produit généralement après 10 à 20 minutes de simulation. Dans le cas d'une vitesse d'entrée imposée, la turbulence doit être injectée en utilisant la méthode des tourbillons synthétiques (Poletto et al., 2013). Dans ce cas, les caractéristiques de l'écoulement ne doivent être étudiées que suffisamment loin de l'entrée, pour que la turbulence générée par le fond marin atteigne la partie supérieure de la colonne d'eau.

La bathymétrie doit suffisamment être fine pour que le modèle puisse capturer le phénomène turbulent se produisant au voisinage de la macro-rugosité du fond marin (typiquement ~1m). Elle doit être fournie au modèle sous la forme d'un fichier .stl d'une longueur et d'une largeur légèrement inférieures au domaine de simulation, et d'une épaisseur supérieure à 2 à 3 nœuds de maille. Le fond marin est modélisé comme une condition limite sans glissement (Bouzidi et al., 2001).

4.2.5 Sorties

Diverses sorties peuvent être extraites des simulations, notamment des quantités instantanées (vitesse, vorticité, critère λ_2 , pression relative) et des quantités moyennées dans le temps (vitesse, tenseur de Reynolds). Des opérations réductrices peuvent également être effectuées sur un domaine défini par l'utilisateur, comme le calcul du maximum, du minimum ou de la moyenne spatiale d'une quantité donnée.

Les sorties peuvent être sauvegardées en des points uniques (ce qui est recommandé si une fréquence de sortie élevée est requise), ou sur des sous-domaines 2D ou 3D définis par l'utilisateur de n'importe quelles dimensions, potentiellement le domaine de simulation entier. Dans le cas d'un volume important de sorties, il est recommandé de modérer la fréquence d'extraction pour éviter d'inonder la mémoire de l'ordinateur.

Une étude des effets des variations spatiales et temporelles des caractéristiques de l'écoulement a été rapportée par Mercier et Guillou (2022). Elle révèle l'impact important de la morphologie du fond sur les caractéristiques hydrodynamiques à l'emplacement des turbines dans une ferme du site de Paimpol-Bréhat (Figure 4.6). De plus, une visualisation de l'évolution temporelle des tourbillons turbulents dans un tel écoulement est présentée dans la Figure 4.7 pour un site de la course d'Aurigny, illustrant la formation de larges bouillonnements sur la zone (Mercier et Guillou, 2021).

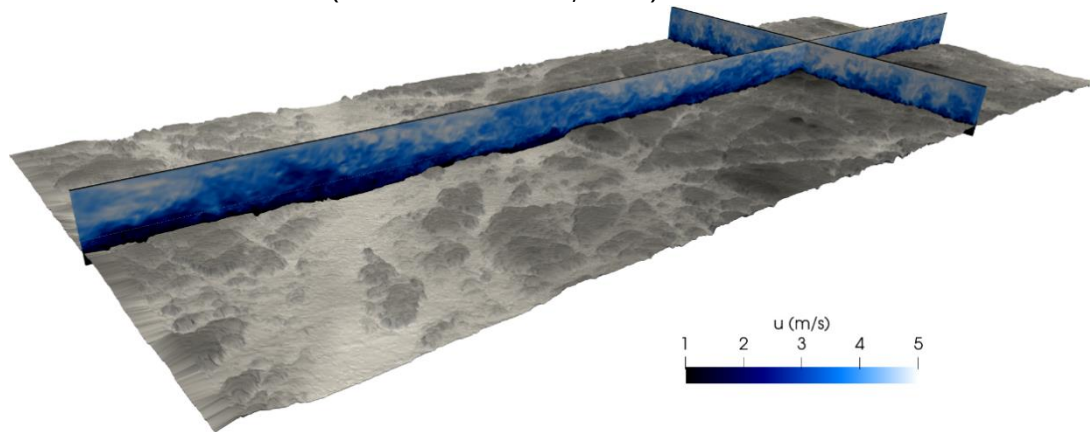


Figure 4.3. Visualisation de la vitesse longitudinale instantanée dans le Raz Blanchard en utilisant Palabos LBM-LES (Mercier et al., 2021b).

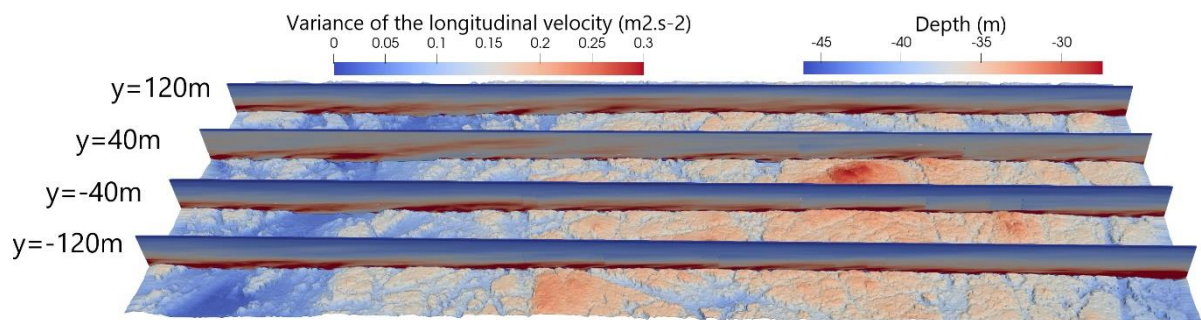


Figure 4.4. Visualisation de la variance de la vitesse longitudinale dans le Raz Blanchard en utilisant Palabos LBM-LES (Mercier et al., 2021b).

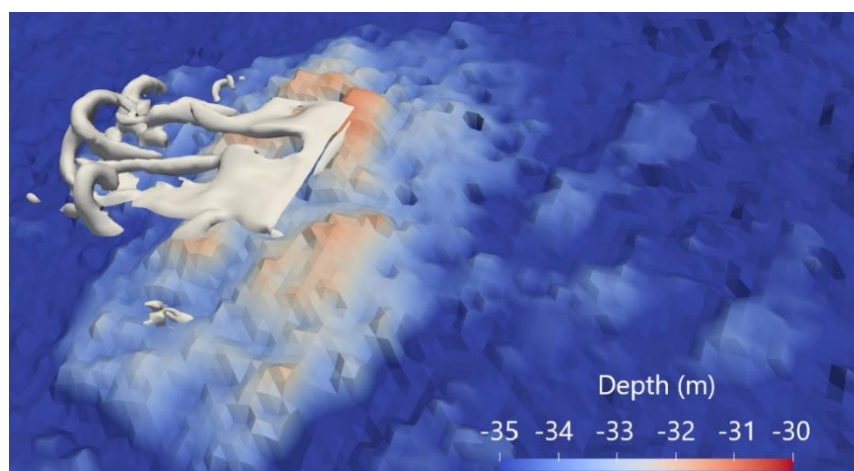


Figure 4.5. Visualisation Λ_2 des tourbillons dans le sillage d'une rugosité du fond marin dans le Raz Blanchard en utilisant Palabos LBM-LES (Mercier et al., 2020a)

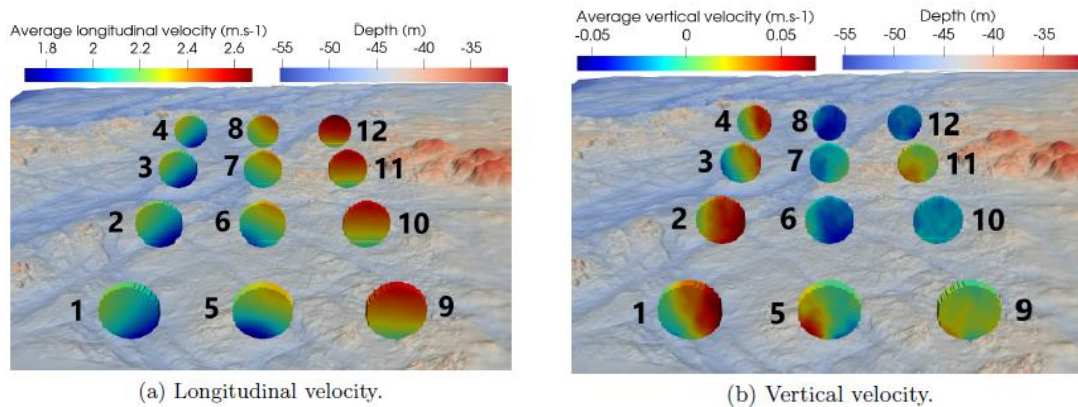


Figure 4.6. Vitesse moyenne dans le temps sur les disques représentant les turbines du site de Paimpol-Bréhat en utilisant Palabos LBM-LES (Mercier et Guillou, 2022).

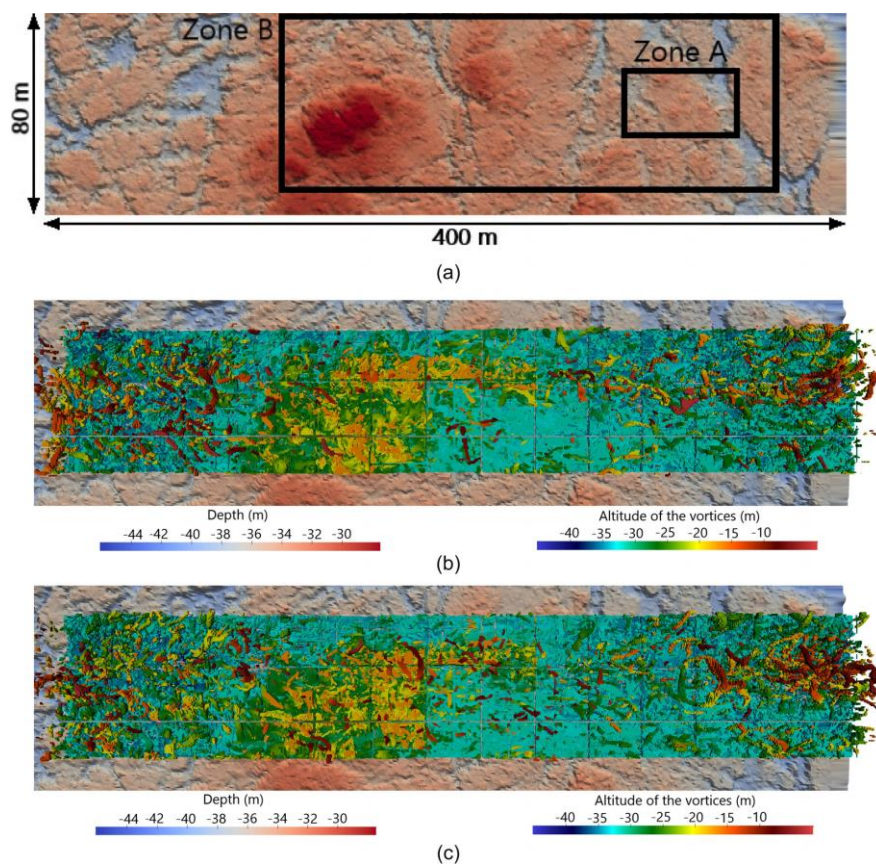


Figure 4.7. Visualisation de la structure turbulente sur une zone réduite. (a) Détail de la bathymétrie. (b) Visualisation d'une traînée tourbillonnaire. (c) Visualisation d'une grande structure d'écoulement cohérente en utilisant Palabos LBM-LES (Mercier et Guillou, 2021)

5 Telemac : Université de Caen Normandie

5.1 Aperçu du modèle et de l'utilisation prévue

Telemac est un modèle open source d'écoulements à surface libre. Il résout les équations des eaux peu profondes (Telemac) ou les équations de Navier-Stokes moyennées par Reynolds (RANS) (Telemac) en utilisant la méthode des éléments finis. En plus des versions standard de Telemac/3D, l'UCAEN développe une version "maison" du code permettant de réaliser des simulations de grands courants de Foucault (LES) (Bourgoin et al., 2019, 2020). La version LES du code permet de caractériser en même temps la moyenne temporelle et la partie fluctuante des vitesses de courant.

Dans le cadre du projet TIGER, Telemac est utilisé pour simuler la propagation de la marée, les courants résultants, et donc la ressource hydrolienne. La version LES est utilisée pour caractériser la turbulence ambiante. Nous étudions trois sites d'énergie hydrolienne : Raz Blanchard, Paimpol, Bréhat et Golfe du Morbihan.

En plus de la caractérisation des conditions d'écoulement ambiantes, nous utilisons différentes techniques pour simuler les turbines. Pour les études à grande échelle (régionale), nous simulons les turbines avec un terme de friction amélioré réparti sur le réseau marémoteur (Thiébot et al., 2015). Pour les études de champ de sillage (régionales échelles régionales et des turbines), nous représentons chaque turbine indépendamment avec une formulation de disque d'actionneur (Thiébot et al., 2016, 2020, 2021, Djama Dirieh et al., 2022).

Dans le cadre du projet TIGER, les modèles suivants ont été utilisés :

- Telemac pour caractériser la ressource du Raz Blanchard et pour analyser l'effet de l'extraction d'énergie sur la ressource en utilisant un terme de friction amélioré. Les résultats alimenteront l'analyse technico-économique du site menée par ORE Catapult.
- Telemac pour évaluer la ressource du Golfe du Morbihan.
- Télémac2D et 3D pour évaluer la ressource du site de Paimpol-Bréhat.
- Telemac3D pour caractériser l'hydrodynamique et les ressources de la course d'Alderney. Les résultats sont utilisés par l'UoM pour une comparaison croisée de différents modèles et par SIMEC Atlantis pour faciliter le déploiement et la récupération d'un ADCP.
- Telemac3D pour évaluer le rendement énergétique du Raz Blanchard en considérant différents scénarios de déploiement des turbines (Thiébot et al., 2021, Djama Dirieh et al., 2022)
- Telemac3D-LES pour caractériser l'hydrodynamique de la course d'Alderney, en se concentrant en particulier sur la turbulence (Guillou et al., 2021).

Telemac2D se concentre sur des échelles comparables à celles de Delft (UoEx) ou de Thétis (UoP). Dans les configurations utilisées dans TIGER, les vagues et le forçage météorologique sont négligés (contrairement aux travaux menés à l'UoEx). Pour la modélisation des turbines, l'approche de friction améliorée est utilisée de manière similaire dans Thétis (UoP). Le modèle Telemac3D présenté ici comprend une représentation des turbines hydroliennes sous forme de disques actionneurs, afin de simuler les turbines dans un modèle régional.

5.2 Description du modèle

5.2.1 Paramètres spatiaux

Telemac utilise des maillages non structurés. Pour Telemac2D et 3D, une taille de cellule allant de 10 km à 10 m est utilisée. Avec Telemac3D-LES, une taille de cellule allant jusqu'à 1 m est utilisée dans la zone étudiée. Une taille de cellule comparable (1m) est également utilisée lors de l'implémentation des disques actionneurs dans Telemac3D.

Un modèle Telemac2D couvrant la Manche (Figure 5.1) a été créé. Il inclut les sites du Raz Blanchard et de Paimpol-Bréhat. Un autre domaine est utilisé pour le Golfe du Morbihan (Figure 5.2). Les informations sur les configurations de modèles existantes sont résumées dans le tableau.

Table 5.1. Sites d'énergie hydrolienne et modèle (X indique qu'une configuration du modèle existe). Les tailles des cellules sont indiquées entre parenthèses. Pour le Raz Blanchard, la taille de la cellule est affinée jusqu'à 1m lors de l'utilisation de disques actionneurs.

	Raz Blanchard	Paimpol Bréhat	Golfe du Morbihan
Télémac2D	X (10 km - 100 m)	X (10 km - 100 m)	X (10 km - 10 m)
Télémac3D	X (10 km - 100 m)	X (10 km - 100 m)	
Télémac3D-LES	X (10 km - 1m)		

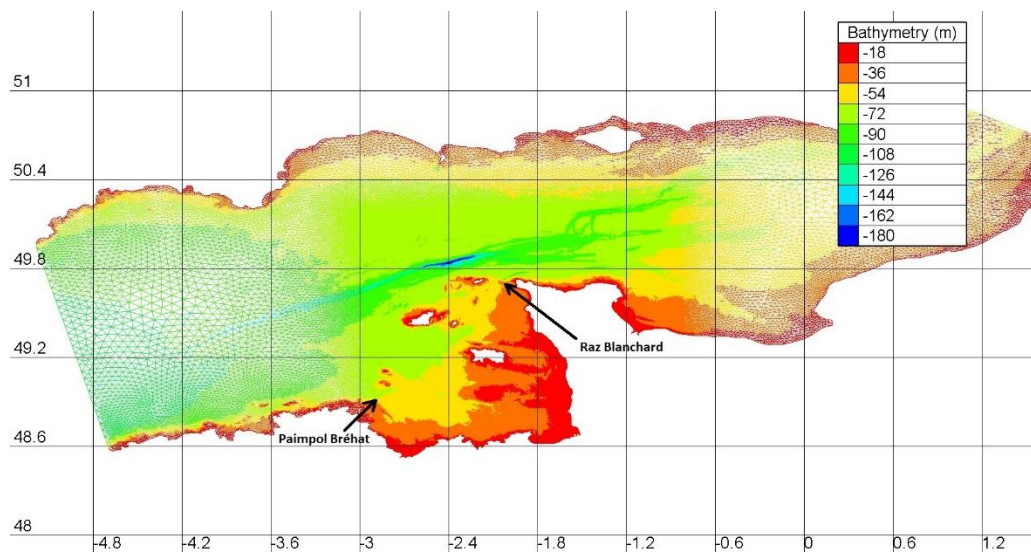


Figure 5.1. Domaine de calcul Télémac utilisé pour les sites du Raz Blanchard et de Paimpol Bréhat.

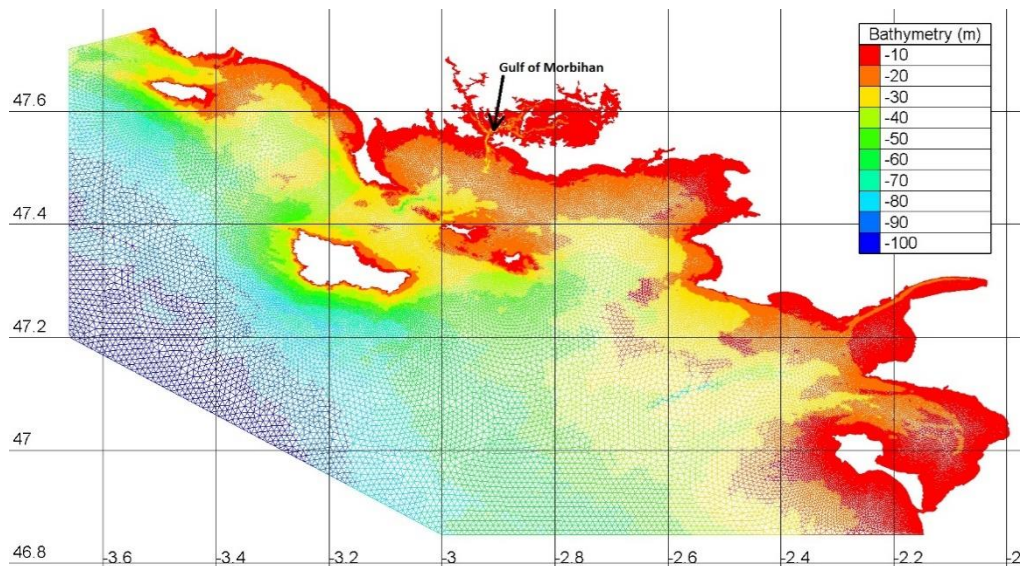


Figure 5.2. Domaine de calcul Télémac utilisé pour le Golfe du Morbihan.

5.2.2 Paramètres temporels

Les configurations du modèle Telemac utilisées dans TIGER sont massivement parallélisées. Elles sont exécutées en utilisant des centaines de cœurs. Les simulations sont exécutées sur le supercalculateur du CRIANN (région Normandie). En fonction des ressources de calcul disponibles, les simulations sont exécutées sur des périodes allant jusqu'à un an pour Telemac2D et 1 mois pour Telemac3D. Pour la version LES de Telemac, seuls deux cycles de marée sont simulés en raison des besoins de calcul.

Le pas de temps est fixé de telle sorte que le nombre CFL soit inférieur à 1. Les résultats sont extraits toutes les 10 ou 15 minutes pour les simulations RANS (Telemac2D et Telemac3D). Pour LES, les résultats sont extraits toutes les 1 seconde à des endroits spécifiques (où les ADCP sont déployés par exemple) pour calculer les proxies de la turbulence (par exemple, la variance de la vitesse).

5.2.3 Représentation des turbines hydroliennes

Dans Telemac2D, les turbines sont représentées par un terme de frottement renforcé réparti sur la zone occupée par l'ensemble marémoteur (Thiébot et al., 2015). Dans Telemac3D, les turbines sont représentées par des disques actionneurs (Thiébot et al., 2016, 2020, 2021, Djama Dirieh et al., 2022). Pour les investigations à grande échelle avec Telemac2D, les scénarios d'extraction d'énergie dans le Raz Blanchard n'ont pas encore été définis. Pour les simulations avec Telemac3D et les disques actionneurs, une seule clôture de turbines a été étudiée (6.3 ; Thiébot et al., 2021) ou deux réseaux contenant jusqu'à 30 turbines déployées en quinconce ou en alignement (6.4 ; Djama Dirieh et al., 2022). Telemac3D-LES est exécuté sans turbines.

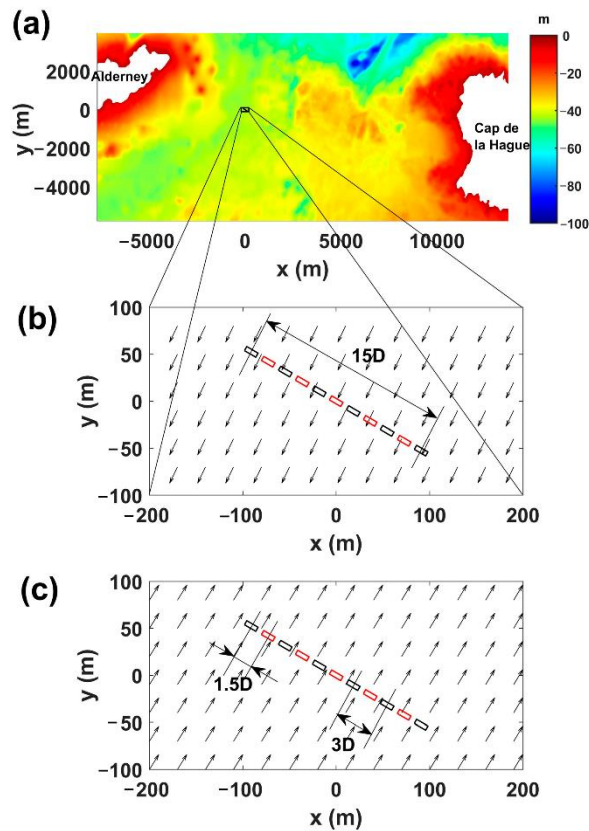


Figure 5.3. Scénario de déploiement d'une turbine simulé avec un disque actionneur dans Telemac3D (Thiébot et al., 2021).

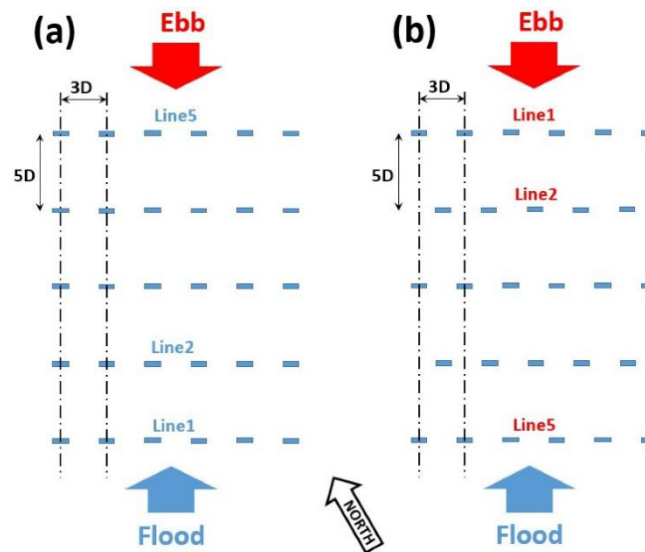


Figure 5.4. Scénario de déploiement d'une éolienne étudié avec des disques actionneurs (Djama Direih et al., 2022) : (a) disposition alignée et (b) disposition décalée.

5.2.4 Entrées et conditions limites

Les données d'entrée sont la bathymétrie, la rugosité du lit (estimée à partir des cartes de sédiments) et les constituants de la marée. La base de données TPXO est utilisée pour

prédire le niveau de la mer et la vitesse du courant à la limite du domaine. Les effets météorologiques et des vagues ne sont pas inclus dans les modèles.

5.2.5 Sorties

Pour Telemac2D, les sorties sont les vitesses de courant et la profondeur d'eau (moyenne dans le temps) moyennées en profondeur. Pour Telemac3D, les sorties sont la profondeur d'eau (moyenne dans le temps) et les vitesses de courant à différentes élévations verticales. Pour Telemac3D-LES, les résultats sont les mêmes que pour Telemac3D, mais la partie fluctuante de la vitesse du courant (variance de la vitesse) peut également être extraite. À titre d'exemple, la corrélation entre la morphologie du fond et la turbulence à 10m au-dessus du fond est montrée dans (Figure 5.5). De plus, les composantes du tenseur de Reynolds sont aussi disponibles (Bourgoin et al., 2020).

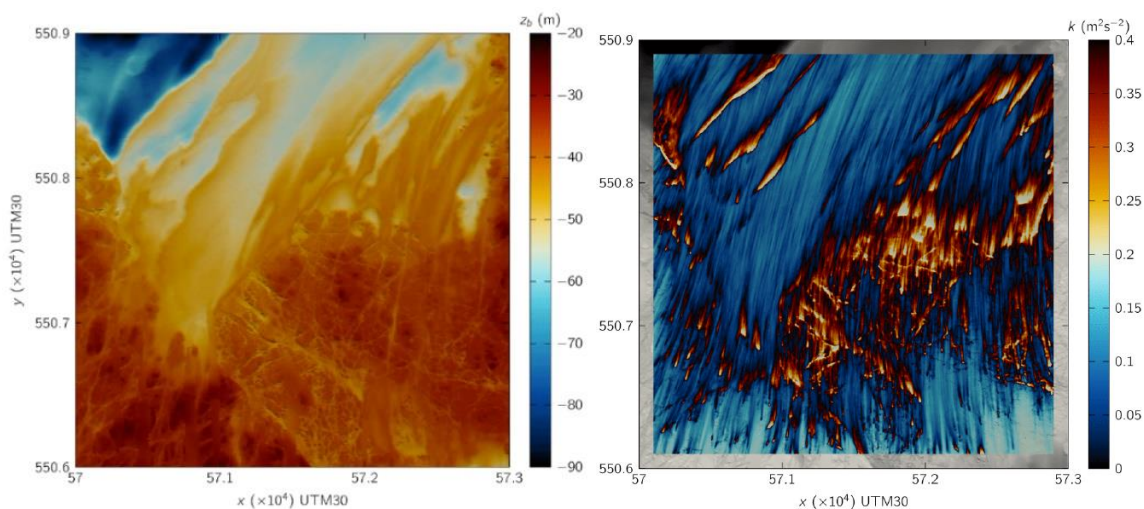


Figure 5.5. Gauche : Bathymétrie sur une zone de la course d'Alderney. A droite : Distribution spatiale de l'énergie cinétique turbulente instantanée à 10 m au-dessus du fond marin lors du pic de crue (Bourgoin et al., 2020).

Le modèle peut fournir des données sur la vitesse du courant et l'intensité de la turbulence, comme cela a été le cas pour la course d'Alderney dans Guillou et al. (2021). Ce travail a montré l'impact de la variation du fond marin sur les caractéristiques hydrodynamiques et de turbulence (Figure 5.6 et Figure 5.7) et révèle les effets sur les turbines.

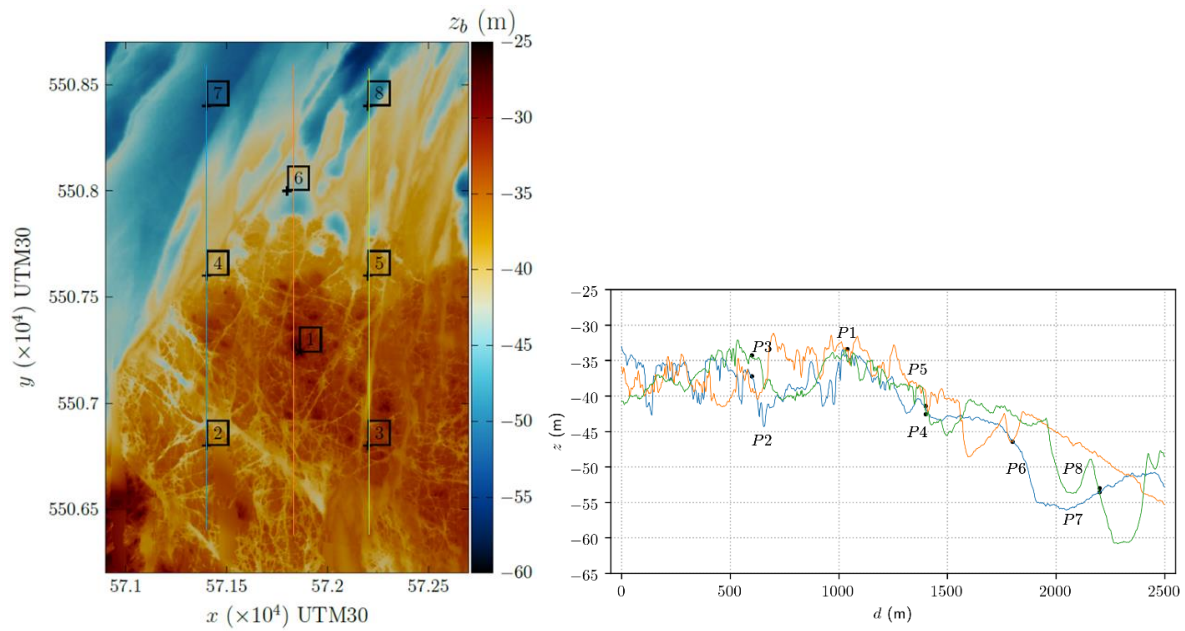


Figure 5.6. Gauche : élévation du fond marin par rapport au niveau moyen de la mer. Droite : Profils de bathymétrie le long des lignes colorées nord-sud indiquées à gauche.

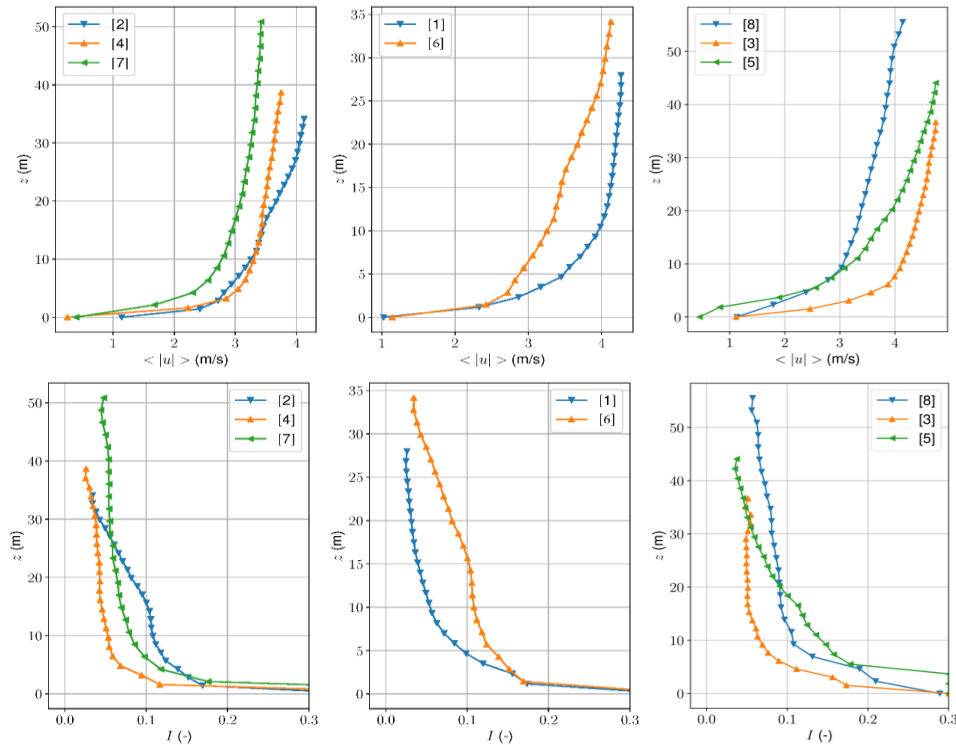


Figure 5.7. Profils verticaux de la magnitude de la vitesse (en haut) et de l'intensité de la turbulence (en bas) au pic de la crue, pour les endroits indiqués dans la figure 5.6. Figure 5.6.

6 DOROTHY : Université Le Havre Normandy

6.1 Aperçu du modèle et de l'utilisation prévue

Le code de simulation interne DOROTHY est basé sur une méthode lagrangienne de particules de vortex (Pinon et al. 2012 ; Choma Bex et al. 2022). La méthode des particules

tourbillonnaires utilise une résolution lagrangienne du domaine fluide, discrétisé en particules fluides représentant la perturbation tourbillonnaire de l'écoulement. Les particules sont advectées en utilisant des schémas Runge-Kutta à pas de temps. Des redistributions des particules de fluide sur une grille cartésienne régulière sont effectuées toutes les quelques itérations pour maintenir une distribution homogène des particules sur le domaine de l'écoulement. Les principales équations gouvernantes de cette méthode sont les équations de Navier-Stokes, avec l'hypothèse que l'écoulement est incompressible :

$$\begin{aligned} \text{div } \vec{u} &= 0 \\ \frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{\omega} &= (\vec{\omega} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} + \nu \Delta \vec{u} \end{aligned}$$

où u est la vitesse, t est le temps, ω est la vorticité et ν est la viscosité cinématique.

L'implémentation actuelle comprend également un modèle de diffusion de type Large Eddy Simulation, implémenté via un modèle d'échange de force de particules (PSE). Jusqu'à récemment, DOROTHY utilisait exclusivement une méthode de panneaux pour une représentation simplifiée à épaisseur zéro des pales de la turbine (Pinon et al. 2012). Cependant, le calcul des charges avec cette méthode s'est avéré difficile et a nécessité des améliorations de la représentation des pales de la turbine.

Entre-temps et au cours du projet TIGER, une nouvelle représentation des pales de la turbine a été mise en œuvre en utilisant la méthode de la ligne de levage. Les détails de la ligne de levage sont disponibles dans Katz et Plotkin (2001), tandis que la mise en œuvre dans la méthode des particules de vortex est proche de la mise en œuvre de la ligne de levage dans les méthodes de panneaux de vortex telles que celles décrites dans Shaler et al. (2020) ou van Garrel (2003). Le modèle est désigné sous le nom de méthode des particules tourbillonnaires de la ligne de levage (LL-VPM).

La méthode de la ligne de levage repose sur le fait que les corps levants génèrent une circulation. En incluant la circulation, il est alors possible de construire la perturbation tourbillonnaire de l'écoulement générée par la pale. Une fois la vitesse de l'écoulement $\vec{v}_{rel}$ est connue, y compris l'induction des étapes temporelles précédentes, les efforts sur le profil de la pale sont estimés en utilisant les coefficients de portance et de traînée. Ce flux de travail est illustré à la figure 6.2. Les principales équations pilotant la ligne de sustentation sont :

- La circulation des lames : $\Gamma_{B,k} = \frac{1}{2} c |\vec{v}_{rel}| C_L$
- Traînée de circulation : $\Gamma_{T,k} = \Gamma_{B,k+1} - \Gamma_{B,k}$
- Circulation dans le sens de la largeur : $\Gamma_{S,k} = \Gamma_{B,k}(t) - \Gamma_{B,k}(t - dt)$
- Poids de la vorticité des particules : $\vec{\Omega}_{T,k} = \Gamma_{T,k} dt \vec{v}_{rel}$ et $\vec{\Omega}_{S,k} \simeq \Gamma_{S,k} \vec{dr}$

où $\Gamma_{B,k}$, $\Gamma_{T,k}$, $\Gamma_{S,k}$ sont respectivement les circulations dans le sens de la pale, de la fuite et de l'envergure pour une section de pale k , c est sa corde, C_L est son coefficient de portance, dt est la durée du pas de temps, dr est la longueur radiale de la sect, n , $\Omega_{T,k}$ et $\Omega_{S,k}$ sont respectivement les poids de vorticité des particules dans le sens de l'envergure et dans le sens de la fuite pour la section de pale donnée k .

La figure 6.1 montre comment la ligne de portance commune associée aux panneaux tourbillonnaires est traduite en particules tourbillonnaires dans DOROTHY. La circulation dans le sens de l'envergure et la circulation arrière de la pale sont représentées avec des

particules placées au centre du filament représenté. La circulation dans le sens de l'envergure et de la pale est dans une direction le long de la pale, la circulation de fuite correspond à la circulation le long du flux de vitesse.

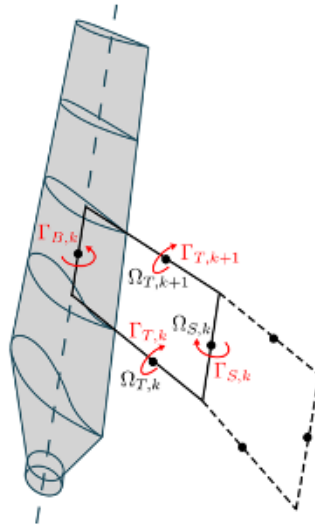


Figure 6.1. Représentation d'une pale dans le code de la méthode des particules tourbillonnaires de la ligne de levage avec les circulations et les particules tourbillonnaires.

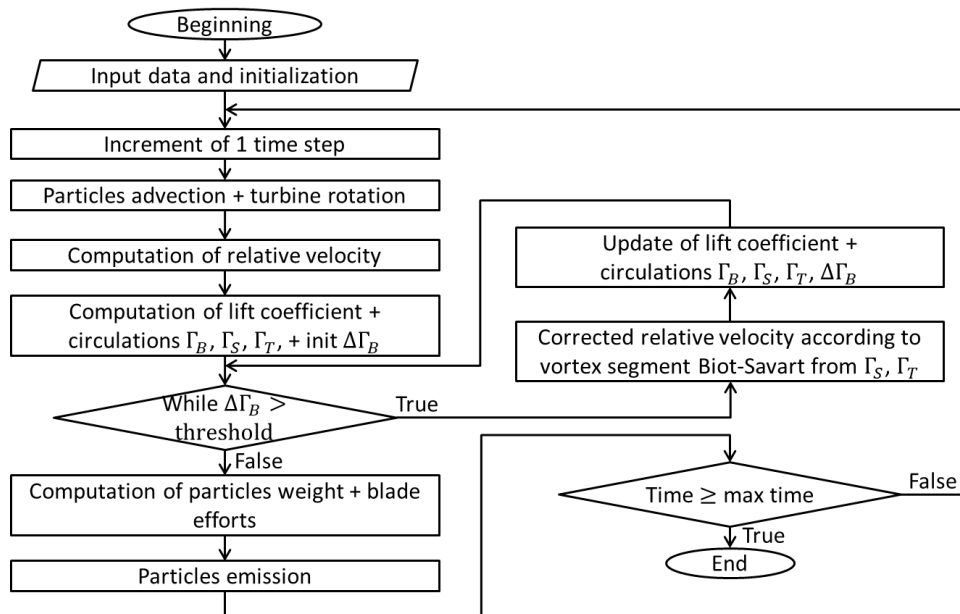


Figure 6.2. Organigramme de la méthode des particules tourbillonnaires de la ligne de levage.

Ce code de simulation inclut également une possibilité de représentation de la turbulence ambiante (Pinon et al. 2017, Choma Bex 2020 (a)), avec un choix de deux formulations alternatives pour le calcul des perturbations de vitesse ajoutée (Choma Bex 2020 (b)) : La méthode des tourbillons synthétiques (SEM) de Jarrin ou l'adaptation de la méthode des tourbillons synthétiques sans divergence (DFSEM) de Poletto. Ces méthodes ont été intégrées dans le code lagrangien comme un terme supplémentaire appliqué à la vitesse amont sur l'ensemble de l'espace d'étude choisi. Elles permettent la reproduction artificielle de n'importe quelle intensité de turbulence, tenseur de contrainte de Reynolds, et échelle de longueur intégrale du comportement turbulent dans l'écoulement.

Le code de simulation DOROTHY est un code interne développé par les membres du laboratoire Ondes et Milieux Complexes de l'Université le Havre Normandie et de l'IFREMER¹. Ce n'est pas un code commercial et il n'est pas entièrement open source, bien que ses sources puissent être partagées dans le cadre de diverses collaborations sous les conditions d'accords de type non-divulgateur.

Le modèle peut être utilisé en même temps pour l'évaluation des performances et la caractérisation du sillage. Des exemples de cette utilisation sur la configuration à grande échelle du projet NEPTHYD (appartenant maintenant à Normandie Hydroliennes) ont été présentés dans Slama et al. 2021 (a) et Slama et al. 2021 (b), avec un ensemble de quatre turbines dans diverses conditions d'entrée avec des niveaux élevés de turbulence ambiante.

Des études plus détaillées de la fluctuation des charges le long des pales de turbine dans différentes conditions d'écoulement sont actuellement envisagées. Cela permettrait de mieux comprendre l'impact des fluctuations de vitesse induites par différents facteurs tels que la turbulence ambiante, l'interaction du sillage ou les profils de cisaillement dans l'écoulement entrant sur la fluctuation des charges en différents points le long des pales, ce qui peut étroitement être corrélé avec la fatigue des matériaux.

Par rapport à la théorie de la quantité de mouvement des éléments de pale, l'avantage du LL-VPM interne est d'avoir des effets 3D inhérents dans le sillage et un coût de calcul inférieur. En comparaison à la LL couplée à d'autres méthodes de panneaux de vortex, l'avantage de la LL-VPM interne est la capacité du code à avoir des interactions de sillage entre les turbines, car DOROTHY a une représentation de Vortex Blob des particules.

En comparaison à la CFD résolue des pales, l'avantage du LL-VPM interne est de disposer des charges et des interactions entre les turbines à un coût de calcul inférieur. Néanmoins, la distribution de la pression n'est, par exemple, pas disponible dans le modèle LL-VPM.

6.2 Description du modèle

6.2.1 Paramètres spatiaux

Comme méthode lagrangienne, le VPM n'utilise pas de grille spatiale. Néanmoins, afin de préserver une distribution homogène des particules de fluide, des redistributions sont effectuées à intervalles réguliers.

Selon la description de la ligne de levage présentée à la figure 6.1, il y a $N_{blade}(2N_{section} + 1)$ particules émises par pa, de temps, où $N_{section}$ est le nombre de sections dans lesquelles chaque pale est divisée et N_{blade} le nombre de pales de la turbine. Dans les simulations TIGER avec turbulence ambiante, il y a plus de 150 000 particules. Leur taille dépend du pas de temps, de la vitesse angulaire de la turbine et de la vitesse de l'écoulement en amont. Le domaine spatial d'une simulation avec turbulence ambiante est une boîte de 8 fois le rayon (R) de la pale autour de la turbine et de 24R derrière. En dehors de cette taille de boîte, les particules sont lentement dissipées. Mais, comme il s'agit d'un phénomène lagrangien, au début des simulations, les particules déversées et advectées ne remplissent pas tout le domaine de simulation.

¹ Voir https://wwz.ifremer.fr/code_dorothy/

Des études de convergence spatiale et temporelle de la méthode des particules de vortex de base de DOROTHY combinée à la méthode des panneaux historiques ont été réalisées et présentées dans Pinon et al. 2012. Des études de convergence plus approfondies de l'alternative de la ligne de levage nouvellement mise en œuvre sont toujours en cours.

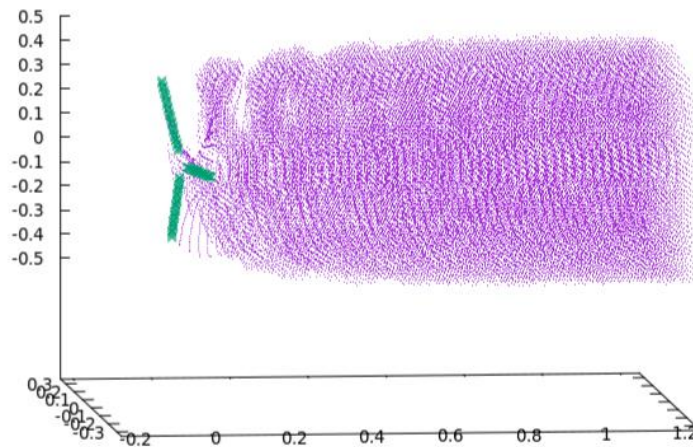


Figure 6.3. Représentation spatiale des circulations liées aux pales et des particules émises, à l'aide du modèle de la méthode des particules tourbillonnaires de la ligne de levage.

6.2.2 Paramètres temporels

La période est choisie par l'utilisateur en fonction des objectifs de la simulation. On considère généralement que, pour une seule turbine, l'induction générée par le sillage est stable après avoir atteint 4 fois le rayon (R) de la pale. Ainsi, si l'objectif de la simulation est de se concentrer sur la charge d'une seule turbine, la période doit être au moins égale à $4R/U_\infty$, U_∞ est la vitesse d'écoulement en amont. Si des interactions de sillage sont considérées, le temps d'advection du sillage entre les turbines doit être pris comme échelle de temps de référence.

Dans le cas d'une forte turbulence ambiante, des périodes plus longues peuvent également être envisagées pour les études statistiques des fluctuations induites par la turbulence. Le pas de temps pour le calcul est fixe. Pour une turbine horizontale, le pas de temps est choisi de manière que la discrétisation angulaire soit inférieure à 10° par pas de temps : alors $dt \leq \Omega / (10 \cdot \pi / 180)$ où dt est le pas de temps et Ω est la vitesse angulaire de la turbine.

Le pas de temps pour toutes les quantités de sortie peut être choisi. Habituellement, les charges de sortie sont stockées à chaque pas de temps de la simulation et la position, et le poids des particules sont stockés tous les 20 pas de temps. La fréquence de stockage peut être définie par l'utilisateur, si nécessaire.

6.2.3 Représentation des turbines hydroliennes

Dans le cadre des considérations du projet TIGER, le nouveau modèle de ligne de levage est utilisé exclusivement sur la représentation en panneaux, qui est également toujours disponible dans le code de simulation. Comme présenté dans les sections précédentes, dans cette représentation de la ligne de levage, les pales de la turbine sont unidimensionnelles et représentées uniquement par leur position et leur profil de génération de circulation. À cet effet, ce modèle nécessite une distribution de la position radiale le long des pales avec leur corde associée, leur angle de torsion et leur profil qui peut différer d'une section à l'autre.

Chaque type de profil nécessite aussi des courbes polaires qui peuvent dépendre du nombre de Reynolds. Les courbes polaires sont des valeurs tabulées des coefficients de portance et de traînée pour une gamme donnée d'angles d'attaque. Elles sont stockées dans un tableau qui donne le coefficient de portance et de traînée pour chaque angle d'attaque et un profil de pale donné à un nombre de Reynolds donné.

Un réseau de quatre turbines a été considéré comme un cas de démonstration, avec la disposition proposée par NEPTHYD de trois turbines en amont et une turbine en aval (Slama et al. 2021 (a) et Slama et al. 2021 (b)). Le modèle de turbine utilisé pour ces simulations était celui de l'IFREMER, proche du modèle TGL qui a aussi servi de base aux turbines Alstom Oceade considérées à l'époque pour ce projet.

Pour des raisons de comparaison avec d'autres partenaires universitaires au sein du projet TIGER, le modèle TGL ouvert fourni par Scarlett (2009) est actuellement à l'étude. Des modèles de turbines éoliennes telles que la turbine de référence NREL-5 MW sont aussi considérés à des fins de validation et d'études de convergence.

6.2.4 Autres paramètres numériques

La simulation est considérée comme numériquement convergente lorsque la variation temporelle des charges est inférieure à 0,5% de la valeur réelle de la charge.

6.2.5 Entrées et conditions limites

Une vitesse d'écoulement constante en amont et la vitesse de rotation de chaque turbine sont fixées. La densité et la viscosité cinématique du fluide sont aussi données. Les paramètres de turbulence ambiante (tenseur de Reynolds et échelle de longueur de Taylor) sont donnés pour le SEM de Jarrin ou le DFSEM de Poletto.

Les effets de la bathymétrie sont pour l'instant négligés. Une première perspective serait de considérer les profils de vitesse dans la colonne d'eau. Le vent et les vagues ne sont pas non plus considérés dans le modèle actuel. L'utilisation de la théorie des ondes linéaires (Airy) pour tenir compte de la vitesse orbitale est actuellement à l'étude.

6.2.6 Sorties

Diverses sorties sont disponibles, qui peuvent être stockées à chaque n pas de temps. Il s'agit notamment de :

- Position et poids de vorticité de toutes les particules de fluide émises
- Pour chaque section de lame :
 - Circulations dans le sens de la largeur, de la longueur et de l'envergure ;
 - Vitesse locale, nombre de Reynolds et angle d'attaque ;
 - Local C_L et C_D coefficients donnant la portance et la traînée ;
 - Comme différentes projections de la portance et de la traînée : $x - axis$ et $\theta - axis$ plus les forces normales et tangentielles à la pale.
- Valeurs intégrées :
 - Angle de rotation global de la turbine ;
 - Charges globales : poussée, couple et coefficients associés C_T et C_P .

Le post-traitement des données de sortie des particules permet de générer une carte de la vorticité et de la vélocité dans le sillage. Avec toutes ces sorties, l'interaction entre plusieurs

turbines peut être évaluée. L'évolution des charges le long de la pale au cours du temps peut également être étudiée. Les résultats présentés ci-dessous sont tirés de Choma Bex et al. (2022). La distribution radiale de la densité de la force normale f_n présentée dans la Figure 6.4, montre un bon accord pour les 3 méthodes, ce qui donne confiance dans le modèle LL-VPM. Cependant, la distribution radiale de la densité de force tangentielle, f_t présentée dans la Figure 6.5, montre quelques divergences. Néanmoins, des différences du même ordre de grandeur pour des méthodes équivalentes sont présentées dans des repères similaires. BEM et LL-VPM semblent sous-estimer f_t principalement près de l'emplanture de la pale. Dans cette région, les angles d'attaque peuvent être élevés et les sections de la pale peuvent être proches du domaine de décrochage. Certains phénomènes qui peuvent se produire dans ce domaine sont mal décrits par le modèle BEM. C_L , C_D alors que la méthode CFD les représente avec une plus grande précision.

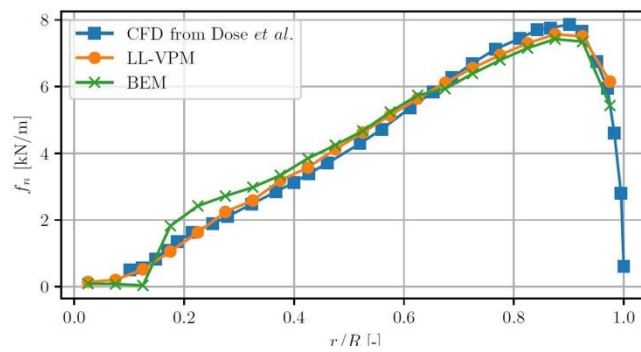


Figure 6.4. Distribution radiale de la force normale à travers une pale de l'éolienne offshore de référence NREL 5 MW. La méthode des particules tourbillonnaires de la ligne de levage est comparée à un BEM stable et à une CFD résolue de la pale provenant de la littérature. Figure reproduite de Choma Bex et al. 2022.

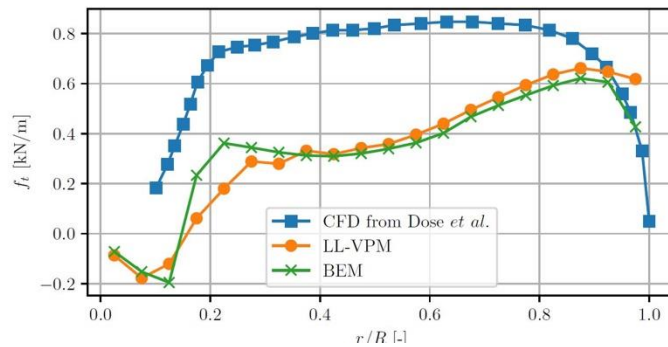


Figure 6.5. Distribution radiale de la force tangentielle à travers une pale de l'éolienne offshore de référence NREL 5 MW. La méthode des particules tourbillonnaires de la ligne de levage est comparée à un BEM stable et à une CFD résolue de la pale provenant de la littérature. Figure reproduite de Choma Bex et al. 2022.

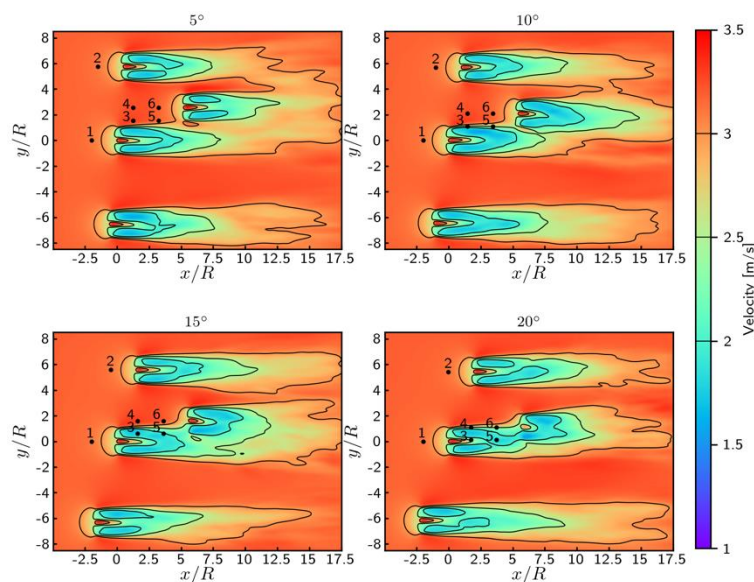


Figure 6.6. Caractéristiques du sillage de 4 turbines hydroliennes dont l'installation est prévue dans le Raz Blanchard, modélisées avec la méthode des particules tourbillonnaires de la ligne de levage. Elles ont été calculées pour une intensité de turbulence de 10 % à différents débits en lacet, montrant l'influence de la turbine centrale en amont sur celle en aval. Figure reproduite de Slama et al. 2021.

7 MIKE 21 : Université de Bretagne Sud

7.1 Aperçu du modèle et de l'utilisation prévue

Pour étudier le potentiel de l'énergie des courants de marée sur le site TIGER du Golfe du Morbihan, un modèle numérique bidimensionnel moyenné en profondeur a été développé en utilisant le modèle d'écoulement MIKE 21 (MIKE 21HD) et utilisé pour simuler l'hydrodynamique des marées dans la zone d'intérêt.

Le modèle d'écoulement MIKE 21 (Mike 21HD) utilise un maillage triangulaire non structuré pour discrétiser l'environnement aquatique et est établi sur les équations de Navier-Stokes moyennées par Reynolds (RANS), en utilisant l'hypothèse de Boussinesq et la pression hydrostatique. Il s'agit d'un modèle bidimensionnel pour les calculs hydrodynamiques à surface libre qui simule les variations du niveau et du débit de l'eau en moyenne sur la colonne d'eau dans le domaine du modèle. Le modèle hydrodynamique MIKE 21 simule de nombreux phénomènes hydrauliques, y compris les marées, les courants induits par le vent et les vagues, et les surcharges. MIKE 21 HD prend également en compte les phénomènes d'immersion et d'émersion de l'estran (DHI, 2012).

Dans le cadre du projet TIGER, MIKE 21 HD est utilisé pour simuler la propagation de la marée et les courants résultants (donc la ressource hydrolienne) dans le Golfe du Morbihan.

7.2 Description du modèle

7.2.1 Paramètres spatiaux

Dans cette étude, le domaine de calcul débute à l'extérieur du Golfe du Morbihan sur une grille semblable à celle utilisée pour la modélisation TELEMAC avec une taille de cellule allant de 10 km à 10 m (c.f. Figure 5.2).

Dans le Golfe du Morbihan, nous avons utilisé deux bathymétries complémentaires : la bathymétrie Litto-3D du SHOM (2003-2004) qui a une couverture globale du Golfe avec une résolution de 10 X 10 m et la bathymétrie 2014 réalisée par UBS dans le secteur de l'entrée du Golfe du Morbihan avec une densité de points de 1 X 1 m (Figure 7.1). La combinaison des deux bathymétries a été utilisée pour produire la bathymétrie finale du domaine de calcul du modèle MIKE 21, qui est présentée dans la Figure 7.2.

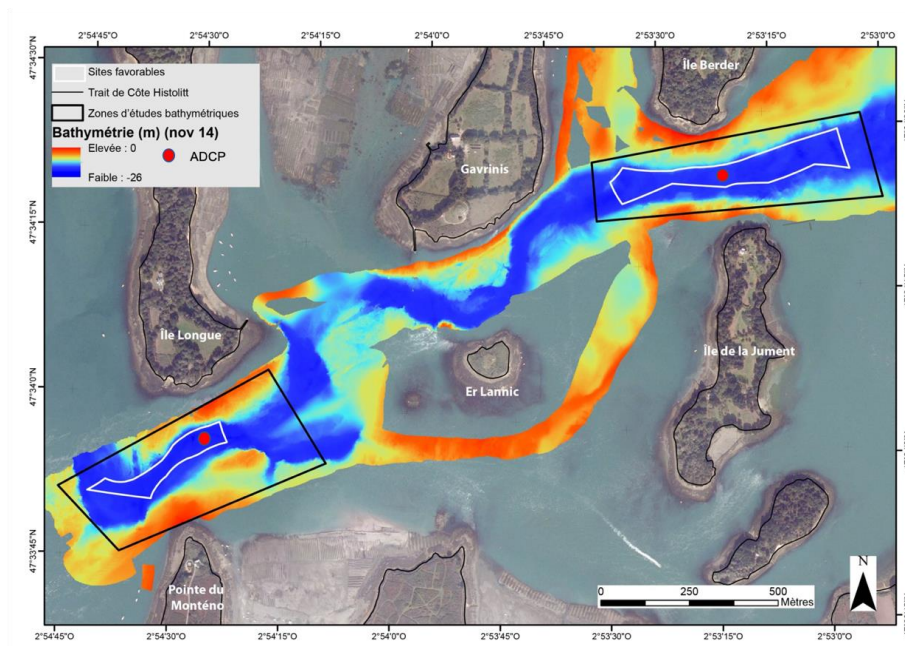


Figure 7.1. Bathymétrie de l'entrée du Golfe du Morbihan (UBS-2014) avec la localisation des deux ADCP déployés entre décembre 2014 et janvier 2015.

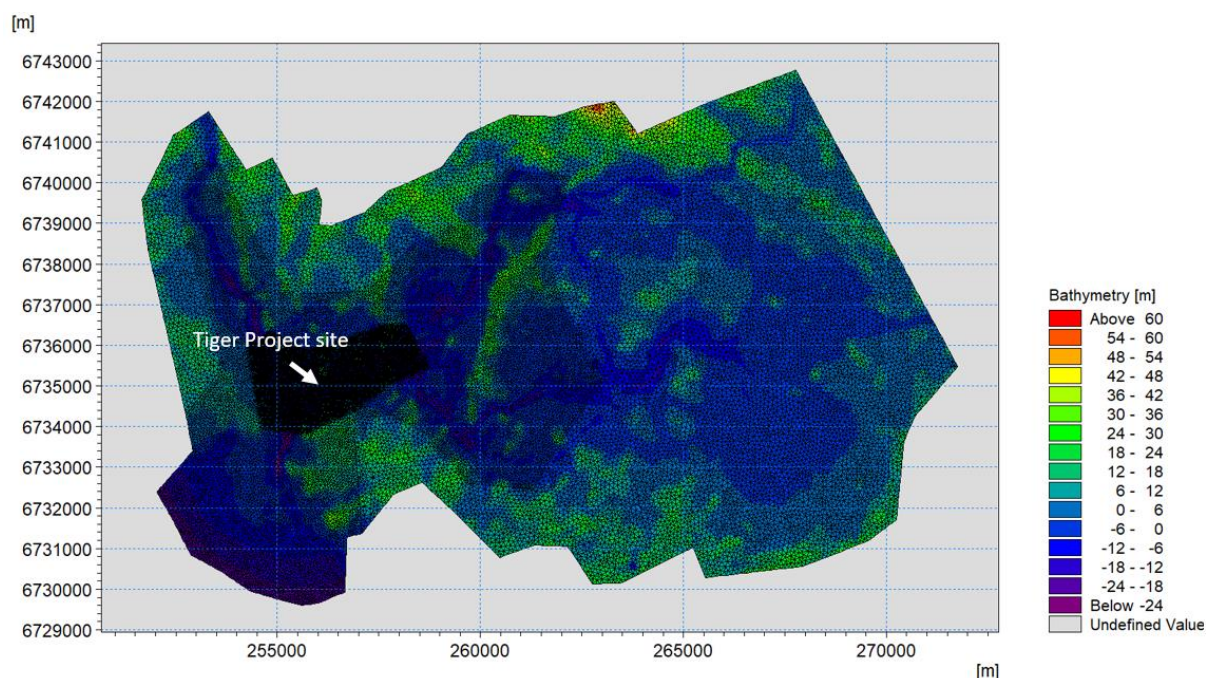


Figure 7.2. Maillage de calcul pour le modèle MIKE 21.

7.2.2 Paramètres temporels

La configuration du modèle Mike 21 utilisée pour le projet TIGER couvre une période d'un mois. Cette période a été choisie pour permettre une calibration optimale du modèle en intégrant les mesures effectuées par les deux ADCPs déployés entre décembre 2014 et janvier 2015 (Figure 7.3).

Cela permet d'effectuer une analyse harmonique pour extrapoler les données modélisées sur un an, afin d'estimer le rendement énergétique annuel. Les variables de sortie du modèle

sont extraites à une résolution de 10 minutes pour capturer la variabilité temporelle des vitesses et des directions d'écoulement modélisées.

2.1.1 Représentation des turbines hydroliennes

Les turbines ne sont pas représentées dans le modèle MIKE 21 utilisé pour TIGER.

7.2.3 Entrées et conditions limites

Les données d'entrée sont la bathymétrie, la rugosité du lit (estimée à partir de cartes sédimentaires) et les composantes de la marée. Météorologie : les données de vent et de pression atmosphérique ont été collectées pour la région de Vannes auprès de Météo-France. Pour obtenir des résultats viables pour les élévations de la surface de l'eau et les vitesses du courant, les différences entre les résultats du modèle et les mesures doivent être réduites à un niveau acceptable.

Des mesures hydrodynamiques supplémentaires provenant des deux ADCPs déployés sur le site (Figure 7.1) ont été intégrées au modèle afin de calibrer les simulations de manière optimale. Il s'agit de mesures du niveau d'eau et de la vitesse et de la direction du courant (Figure 7.3).

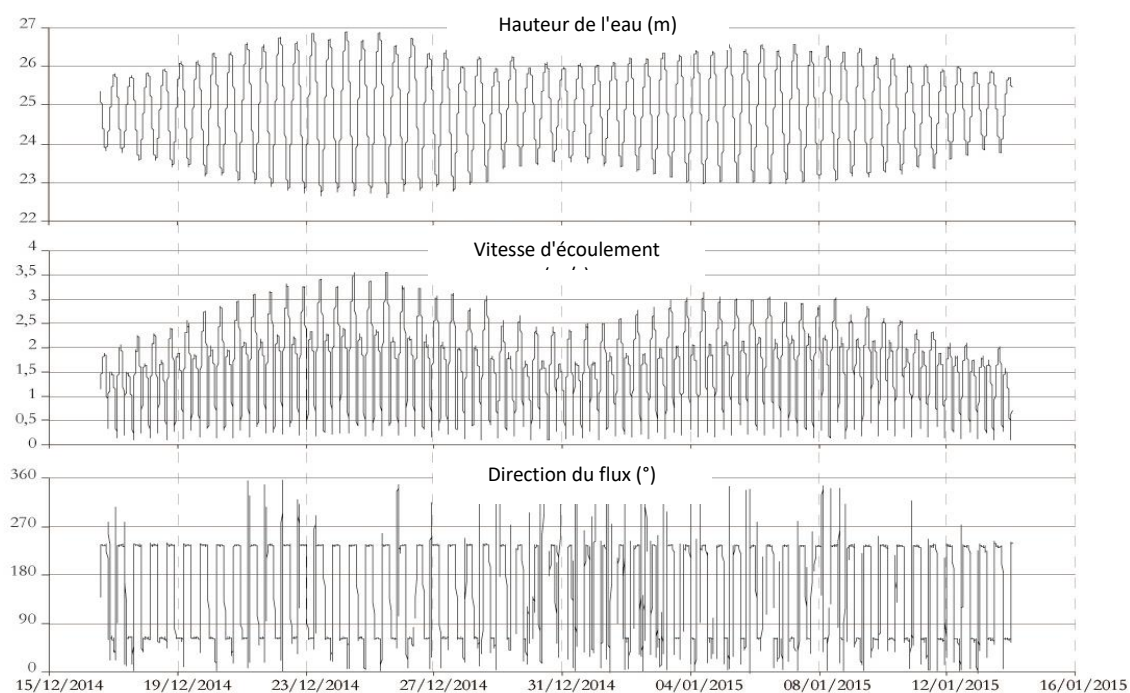
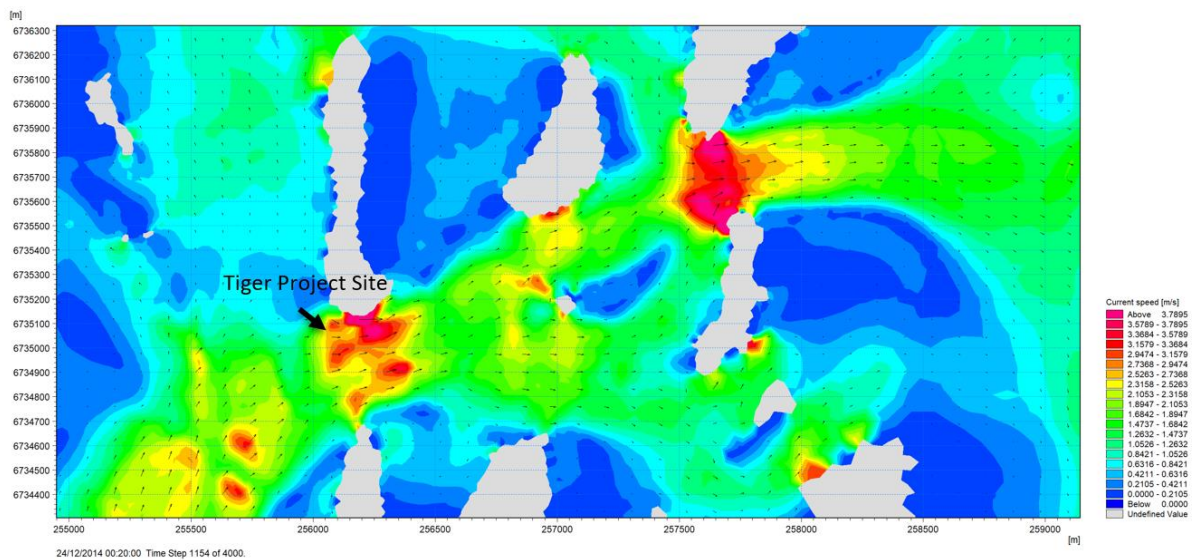
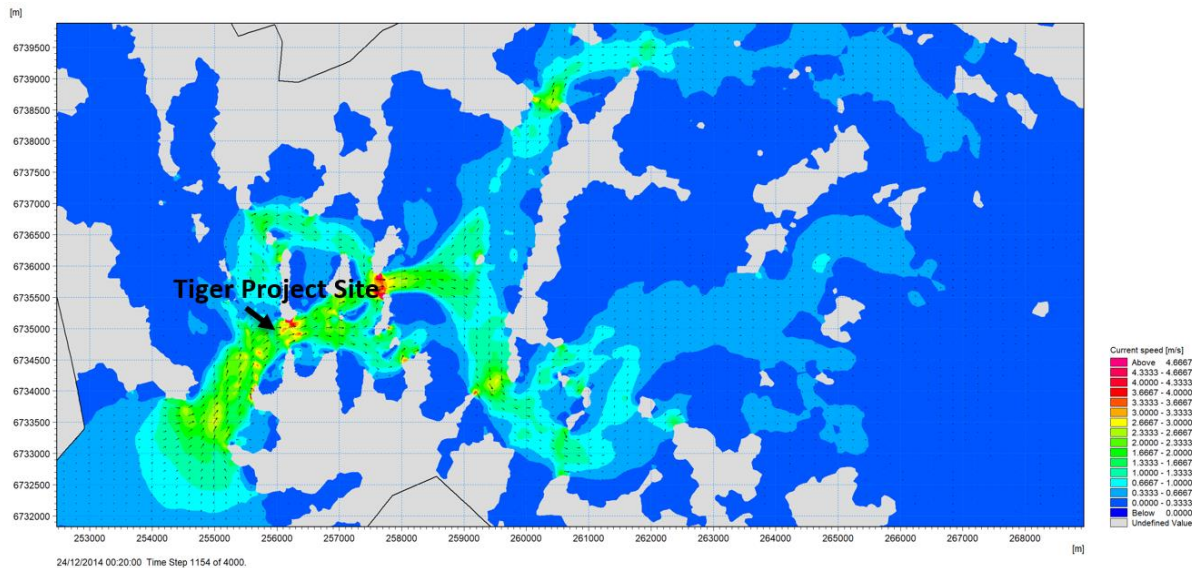


Figure 7.3. Exemple de données utilisées pour la calibration du modèle : série temporelle de mesures hydrodynamiques obtenues par l'ADCP déployé sur le site TIGER dans le Golfe du Morbihan (site de l'Île Longue).

7.2.4 Sorties

Pour le modèle d'écoulement MIKE 21, les sorties sont les vitesses de courant moyennes (temps-moyenne) et la profondeur de l'eau avec un pas de temps de 10 minutes. Les données peuvent être produites sur l'ensemble du Golfe du Morbihan (Figure 7.4). Un zoom sur le site du projet TIGER est présenté dans la.



La densité de puissance sur le site du projet TIGER (à l'ouest) et sur un autre site à l'est avec de forts courants (site de l'île de Berder), est présentée dans la Figure 7.6. Les valeurs indiquées sont la densité de puissance moyenne par unité de surface d'écoulement transversal, moyennée sur une période de marée, définie comme suit : $1. P = \frac{1}{2} \rho U_{avg}^3$ où P est la densité de puissance moyenne théorique, ρ est la densité de l'eau de mer et U_{avg} est la vitesse moyenne du courant en profondeur. 7.1 résume le calcul de la densité de puissance moyenne dans le site TIGER du Golfe du Morbihan.

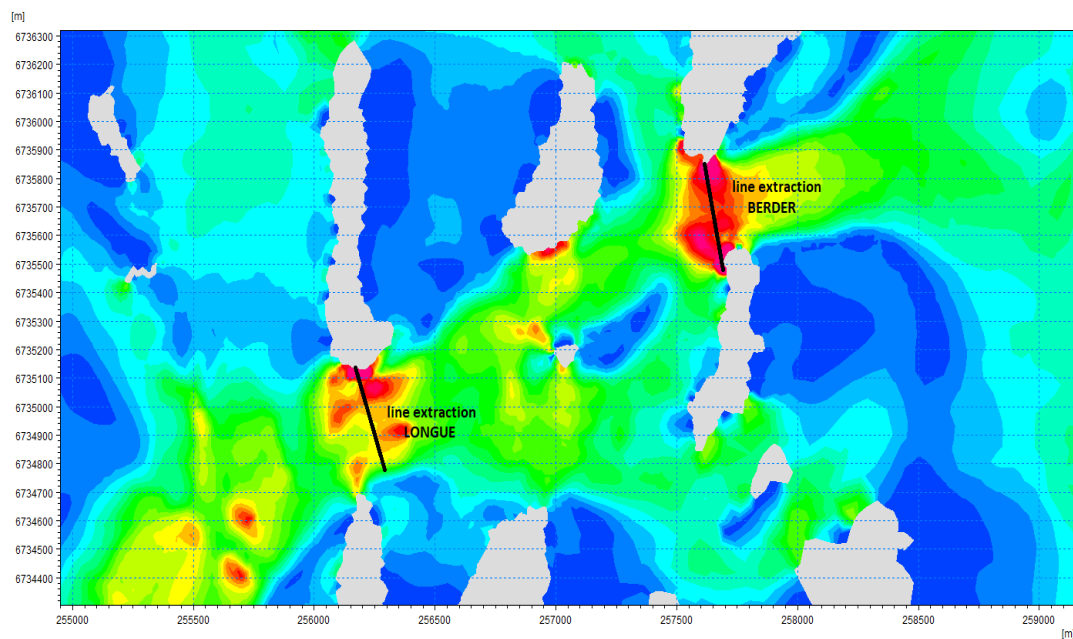


Figure 7.6. Extraction des lignes pour le calcul de la densité de puissance sur deux sites du Golfe du Morbihan.

Table 7.1. Calcul de la densité de puissance moyenne pour le site du projet TIGER du Golfe du Morbihan.

	Vitesse d'écoulement [m/s]	Densité de puissance [kW/m] ²
Max	5.04	65.6
Min	0.007	0
Moyenne	1.82	3.1

8 DOFAS : Université de Manchester

Le modèle DOFAS a été appliqué à la simulation de turbines éoliennes et hydroliennes à axe horizontal et vertical fonctionnant dans des écoulements turbulents. Les turbines peuvent être représentées dans le modèle DOFAS à l'aide de différentes méthodes, à savoir : une méthode de frontière immergée à forçage direct pour une approche résolue par la géométrie, une méthode de ligne d'actionneur anisotrope et un disque d'actionneur non rotatif pour les turbines à axe horizontal. Les fonctions de paroi peuvent être adoptées comme conditions limites lorsque des résolutions de maillage grossières sont adoptées, par exemple, dans l'application aux dispositifs à l'échelle réelle. Un modèle de fermeture de la turbulence de Large-Eddy Simulation est utilisé avec différents modèles à l'échelle de la sous-grille disponibles : Smagorinsky, WALE et le modèle à une équation. Les champs de vitesse turbulents sont ainsi bien résolus, y compris les sillages des turbines ou la turbulence due au développement du profil de cisaillement sur un lit à bathymétrie plate ou définie. La distance de développement des écoulements turbulents dans un canal peut être réduite par l'introduction de la turbulence à l'entrée, soit via une simulation précurseur (telle qu'un canal périodique ou utilisant une cartographie interne), soit via une méthode de turbulence synthétique, par exemple, la méthode des tourbillons synthétiques (SEM).

Une prédiction précise du déficit de vitesse et de la turbulence dans le sillage d'une turbine est importante pour la disposition des réseaux d'hydroliennes. Ce code est utilisé pour l'analyse des écoulements turbulents qui se produisent sur les sites de marée en raison du développement d'une couche limite au-dessus de son fond qui peut être plat ou rugueux, l'analyse des écoulements turbulents coexistant avec des vagues océaniques, et le chargement et les effets de sillage en aval des turbines exposées à de tels écoulements. Dans le cadre du projet TIGER, DOFAS a été utilisé pour les applications suivantes :

- Simulation d'écoulements turbulents dans des canaux à profondeur constante sans vagues de surface, avec des vagues océaniques de surface et des turbines en aval (dans la région du sillage) pour générer un champ de vitesse variable dans le temps sur un plan de rotor à introduire dans les modèles BEM (voir section 9).
- Simulation des conditions instables dans le sillage d'un système à rotor unique établi sur le rotor TGL et d'un système à établi sur le système O2 d'Orbital Marine Power. Dans cette étude, l'impact de la distribution verticale du flux d'approche avec des caractéristiques uniformes et de loi logarithmique a été analysé. Une turbulence artificielle a été superposée à l'entrée en utilisant une méthode de Foucault synthétique anisotrope avec des échelles de longueur de turbulence idéalisées. Les simulations ont été exécutées sur 384 processeurs et ont nécessité quatre jours de travail en utilisant l'installation informatique partagée (CSF) de l'Université de Manchester.
- Développement du code pour la simulation de vagues coexistant avec un écoulement turbulent résultant en un chargement instable de la turbine dû à la cinématique induite par les vagues et avec une attention particulière sur l'impact des vagues sur le taux de récupération du sillage. Cette analyse s'est concentrée sur un canal de 0,45

m de profondeur à l'échelle du laboratoire et sur une turbine de 0,27 m de diamètre en raison de la disponibilité de données expérimentales publiées. Quatre longueurs d'onde régulières différentes ont été analysées pour évaluer l'impact sur les charges de la turbine et la dynamique du sillage.

Plusieurs publications académiques sont disponibles concernant l'utilisation du modèle DOFAS pour différents aspects de la simulation de turbines et de sillages :

- Ouro, P., L. Ramirez et M. Harrold (2019). *Analyse de l'espacement des réseaux sur les performances des fermes d'hydroliennes à courant de marée en utilisant la simulation à grande échelle*. Journal of Fluids and Structures 91, 102732.
- Ouro, P. & T. Stoesser (2019). *Impact de la turbulence environnementale sur la performance et les charges d'une turbine de courant de marée*. Flow, Turbulence and Combustion 102, 613-639.
- Ouro, P. & T. Nishino (2021). *Performance et caractéristiques de sillage des turbines hydroliennes dans un réseau infiniment grand*. Journal of Fluid Mechanics 925, A30.
- Ouro, P, P. Stansby & T. Stallard (2021). *Étude de la récupération du sillage derrière une turbine à courant de marée pour différents niveaux de submersion*. 14^{ème} EWTEC, Plymouth, Royaume-Uni.
- Ouro, P, H. Mullings & T. Stallard (2022). *Établir la confiance dans les prédictions de charge de fatigue pour les turbines hydroliennes flottantes établies sur des simulations à grand tourbillon et le momentum instationnaire des éléments de pale*. Tendances des énergies renouvelables en mer. Conférence RENEW, Lisbonne, Portugal.
- Stansby, P. & P. Ouro (2022). *Modélisation des réseaux de turbines marines dans les flux de marée*. Journal of Hydraulic Research 60, 187-204.

Le modèle a également contribué à des présentations et des affiches lors des événements locaux et internationaux suivants :

- EWTEC 2021 : 14^{ème} Conférence européenne sur l'énergie des vagues et des marées, Plymouth, Royaume-Uni.
- PRIMaRE 2022 : 9^{ème} conférence annuelle PRIMaRE, Cornouailles, Royaume-Uni.
- ICOE 2022 : Conférence internationale sur l'énergie océanique, Donostia/San Sebastian, Espagne
- RENEW 2022 : 5^{ème} Conférence internationale sur les énergies renouvelables en mer, Lisbonne, Portugal.

8.1 Description du modèle

DOFAS est un code CFD interne à code ouvert pour la simulation à grande échelle qui résout les équations incompressibles de Navier-Stokes moyennées dans l'espace sur des grilles cartésiennes rectangulaires en adoptant un stockage échelonné des vitesses. L'avancement dans le temps est effectué à l'aide d'une méthode standard à étapes fractionnaires entièrement explicite pour coupler les champs de pression et de vitesse, ces derniers étant résolus de manière itérative à l'aide d'une méthode Runge-Kutta à trois étapes à faible stockage. DOFAS approxime les flux convectifs et diffusifs par un schéma de différence centrale ou un WENO d'ordre 5th, et l'équation de pression de Poisson est résolue par une méthode multigrille. DOFAS est complètement parallélisé à l'aide de l'interface MPI (Message

Passing Interface) pour effectuer des simulations sur plusieurs processeurs avec une évolutivité effective prouvée jusqu'à 100 000 cœurs sur ARCHER2 (installation HPC de niveau 1 au Royaume-Uni), avec la possibilité d'adopter OpenMP pour alléger la charge de calcul liée à la résolution des particules lagrangiennes.

8.1.1 Paramètres spatiaux

De multiples simulations ont été réalisées avec différentes dimensions de turbine, blocage par rapport à la section transversale du canal, propriétés des vagues et configurations de maillage. Les détails de la résolution spatiale et de la configuration des différentes parties du domaine sont spécifiques à la simulation et sont rapportés dans les publications pertinentes. Les résolutions spatiales typiques sont déterminées par le nombre de cellules de grille sur le diamètre du rotor, soit 50 fois le nombre moyen considéré. Pour les principaux types de simulation de turbine réalisés, les dimensions suivantes sont représentatives.

Pour une géométrie générique "grandeur nature" établie sur la géométrie TGL et le système O2, chaque rotor a un diamètre de 0 (20 m) et un espacement moyen à moyen de 25 m. Le domaine de calcul a une résolution de maillage uniforme de 0,375 m dans les trois directions spatiales et mesure 1152 m de long, 480 m de large et 42 m de profondeur, pour un total d'environ 250 millions de cellules. La géométrie de la turbine est représentée avec la méthode de la ligne d'action en suivant la géométrie de l'aile et les propriétés hydrodynamiques soit publiées (TGL) soit fournies. Les nacelles sont également simulées avec la méthode des frontières immergées.

Pour les simulations établies sur des expériences avec un rotor de 0,27 m de diamètre : le domaine de calcul du canal ouvert est de 14 m de long, 3,0 m de large et 1,2 m de profondeur, dans lequel la profondeur moyenne de l'eau est définie comme étant de 0,45 m. Une méthode de niveau est employée pour décrire le mouvement et les vitesses de la surface libre induits par l'action des vagues, la densité de l'air étant définie au-dessus de la surface libre et la densité de l'eau en dessous. La turbine est représentée par la méthode de la ligne d'actionnement avec une résolution de 0,005 m uniforme sur les trois axes du domaine. La méthode des tourbillons synthétiques est adoptée pour générer une turbulence artificielle avec une intensité de 10% qui est superposée à l'entrée, sur un profil de vitesse logarithmique.

8.1.2 Paramètres temporels

Le pas de temps des simulations CFD est défini à une valeur suffisamment faible pour que la condition de Courant-Friedrich-Lewy (CFL) soit satisfaite. Pour les simulations avec une turbine, le pas de temps est défini de telle sorte que la distance avancée par les points de l'actionneur définissant le rotor soit inférieure à la dimension de la cellule. Pour une turbine à axe horizontal, la distance de déplacement des points d'actionnement par pas de temps est proportionnelle à la vitesse angulaire et à la position radiale. Avant l'analyse des conditions de sillage, les pas de temps ont été sélectionnés pour satisfaire ces contraintes et assurer une prédiction précise de la poussée moyenne et du coefficient de puissance au point de fonctionnement d'intérêt. Pour les simulations comparées aux données expérimentales, un pas de temps de 0,001 s'est adopté, car il a permis une bonne correspondance avec les mesures expérimentales de la poussée moyenne et du coefficient de puissance. Pour les simulations de turbine en grandeur réelle, un pas de temps fixe de 0,0475 s'est adopté, car il

fournit une correspondance étroite avec les données BEM pour les coefficients de puissance et de poussée.

8.1.3 Représentation d'une turbine hydrolienne

Pour l'analyse créée dans TIGER à l'aide de DOFAS, les turbines sont représentées en utilisant une méthode de ligne d'actionneur avec une projection de force anisotrope dans laquelle la fonction d'étalement gaussienne varie avec la longueur de corde réelle de chaque point d'actionneur. La méthode de ligne d'actionneur mise en œuvre dans DOFAS a un coût de calcul négligeable, qui est très similaire lors de la simulation d'une turbine ou de 60 dispositifs.

8.1.4 Entrées et conditions limites

Les équations de Navier-Stokes sont résolues en utilisant une fermeture de turbulence LES, qui résout les échelles de turbulence grandes à moyennes et permet ainsi de résoudre la vitesse instantanée variant dans le temps. Pour réduire la distance sur laquelle une couche limite turbulente se développe en aval de l'entrée, les fluctuations de vitesse sont définies à l'entrée en utilisant une méthode de turbulence synthétique.

Les flux de surface libre peuvent également être simulés avec DOFAS en adoptant une méthode d'ensemble de niveau avec la capacité de générer des vagues. Cette méthode nécessite la résolution d'une équation d'advection qui est résolue par une méthode Runge-Kutta avec variation totale décroissante en trois étapes et un schéma WENO d'ordre 5 pour l'approximation des flux de la fonction de niveau. Au niveau du plan d'entrée, la variation en profondeur de la cinématique et l'élévation de la surface sont définies par la théorie des ondes linéaires ou la théorie de Stokes de 2^e ordre. Vers le plan d'écoulement, une couche d'absorption est imposée sur laquelle l'amplitude de la vague est réduite pour que la profondeur de l'eau est constante à la limite de l'écoulement. Un exemple d'un tel domaine est illustré à la figure 8.1.

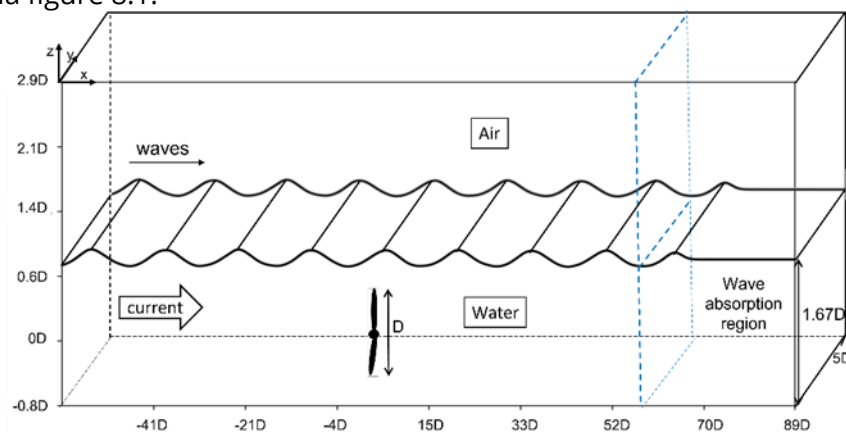


Figure 8.1. Configuration typique du domaine utilisé pour les simulations DOFAS, avec un flux entrant turbulent défini par la méthode des tourbillons synthétiques et des ondes de surface libre modélisées par la méthode du level-set. La géométrie du rotor et les caractéristiques du canal sont basées sur les conditions étudiées expérimentalement par Stallard et al. (2015).

8.1.5 Sorties

Les sorties que DOFAS génère à partir de ces simulations sont : les vitesses moyennes de premier ordre, les statistiques de turbulence de deuxième ordre telles que les contraintes de Reynolds, les statistiques d'écoulement de troisième et quatrième ordre, le niveau d'eau moyen, les séries temporelles de vitesse à des emplacements spatiaux sélectionnés, et les

valeurs instantanées du champ d'écoulement à post-traiter pour des analyses telles que la décomposition orthogonale propre. Pour les simulations avec une ou plusieurs turbines, les sorties comprennent également la charge et la puissance moyennes et variables dans le temps, ainsi que les propriétés d'écoulement énumérées précédemment dans toute la région du sillage, ce qui permet de caractériser la structure stable et instable en aval d'une ou plusieurs turbines.

8.1.5.1 Débits instables dus à l'écoulement du canal et aux sillages des turbines

Quelques exemples des types de sortie pour un système de courant de marée dans un écoulement en canal sont présentés dans les figures suivantes. De plus amples détails sont donnés dans les articles référencés.

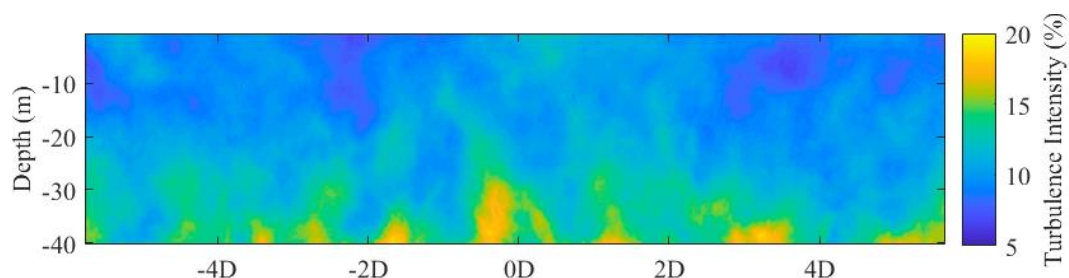


Figure 8.2. Exemple de tracé de contour du plan vertical de l'intensité de la turbulence à travers la profondeur de l'eau d'un chenal de marée périodique à fond plat obtenu par simulation de grands remous avec DOFAS (Ouro et al., 2022).

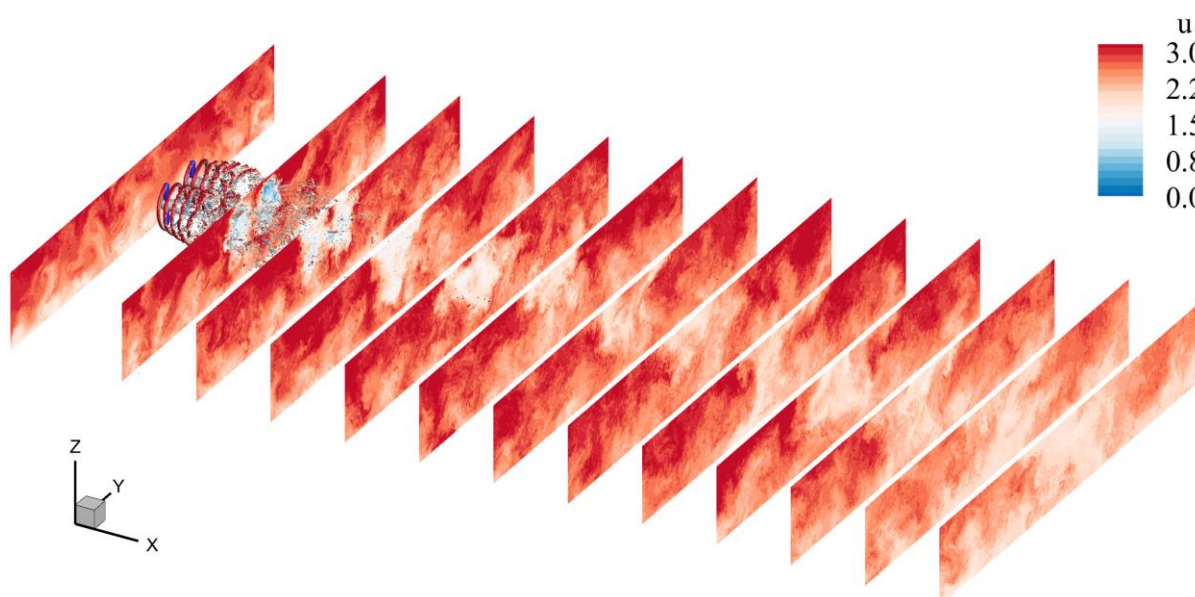
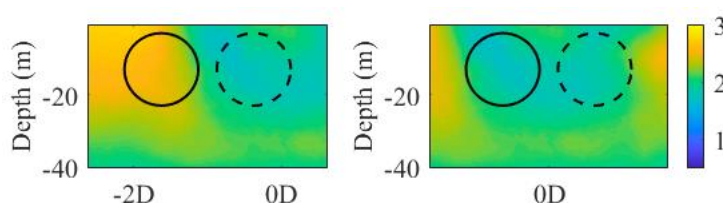


Figure 8.3. Exemple de tracé de contour des plans verticaux (yz-) de la vitesse dans le sens du courant en aval d'un système d'hydrolienne à deux rotors généré à partir du modèle DOFAS de l'hydrolienne à deux rotors avec des structures turbulentes représentées à l'aide du critère Q . (source de l'image : Ouro et al., 2022)



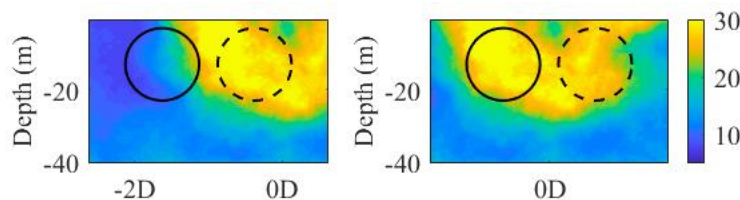


Figure 8.4. Exemple de champs d'écoulement d'entrée aux rotors à un plan 6D en aval d'un système de courant de marée à deux rotors obtenus par simulation LES avec DOFAS. Vitesse dans le sens du courant en m/s (en haut) et intensité de la turbulence [%] (en bas) avec les cercles indiquant les régions sur lesquelles la vitesse variable dans le temps est extraite pour fournir un flux d'entrée à l'analyse BEM du chargement instationnaire. (Image adaptée de Ouro et al., 2022)

8.1.5.2 Modélisation de l'écoulement et du sillage avec turbulences et ondes

L'action des vagues coexistant avec la turbulence de l'écoulement d'approche et l'impact de ces conditions environnementales sur le chargement des turbines ont reçu une certaine attention jusqu'à présent, par le biais de modèles d'ingénierie et de CFD de diverses fidélités. Cependant, peu d'études ont été entreprises concernant l'effet de la vitesse et de la turbulence induites par les vagues sur la forme, les caractéristiques et le taux de récupération du sillage derrière une turbine hydrolienne. Les développements et les analyses utilisant DOFAS ont porté sur les coefficients de puissance et de poussée moyens, le déficit de vitesse et les niveaux de turbulence dans le sillage proche et lointain, et le rapport d'expansion du sillage d'une turbine dans un écoulement turbulent en canal, en même temps sans et avec la présence de vagues.

Un exemple est donné ici pour un cas comparable aux expériences de laboratoire. Le coefficient de poussée moyen dans le temps pour un rapport de vitesse de pointe (TSR) de 5,5 est de 0,86 en raison de l'écoulement turbulent uniquement, sans vagues. Ceci est comparable aux données expérimentales pour le même rotor, et la valeur moyenne n'est pas significativement modifiée pour les simulations avec des vagues. Puisque la génération de sillage est conduite par l'extraction de momentum, on s'attend à ce que cette similarité du coefficient de poussée résulte en la formation d'un sillage moyen similaire. Figure 8.5 et Figure 8.6 comparent la moyenne temporelle de la vitesse du flux et l'intensité de la turbulence à 8D en aval d'un rotor avec et sans vagues. Alors qu'une forme de sillage semblable est observée en présence de vagues, le profil vertical est affecté par la présence de vagues de surface et la cinématique résultante induite par les vagues à travers la profondeur. La simulation sans vagues présente une vitesse moyenne sur le disque et une intensité de turbulence moyenne sur le disque plus faibles (0,39 m/s et 11 %) que la simulation avec vagues (0,40 m/s et 16 % de turbulence et d'intensité induite par les vagues), ce qui pourrait affecter la charge de la turbine en aval.

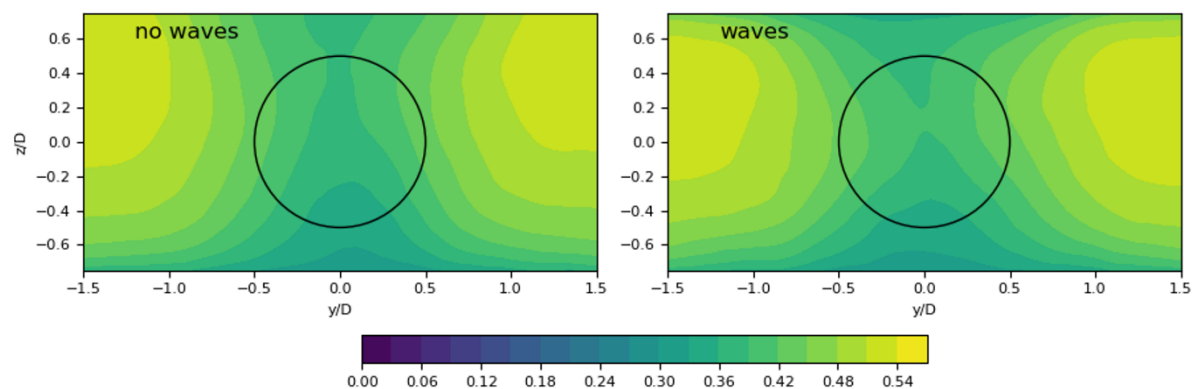


Figure 8.5 Exemple de contour de la vitesse moyenne en fonction du temps à 8D en aval de la turbine sans vagues (à gauche) et avec vagues (à droite), d'après le modèle DOFAS. Le cercle indique la surface et la position du rotor.

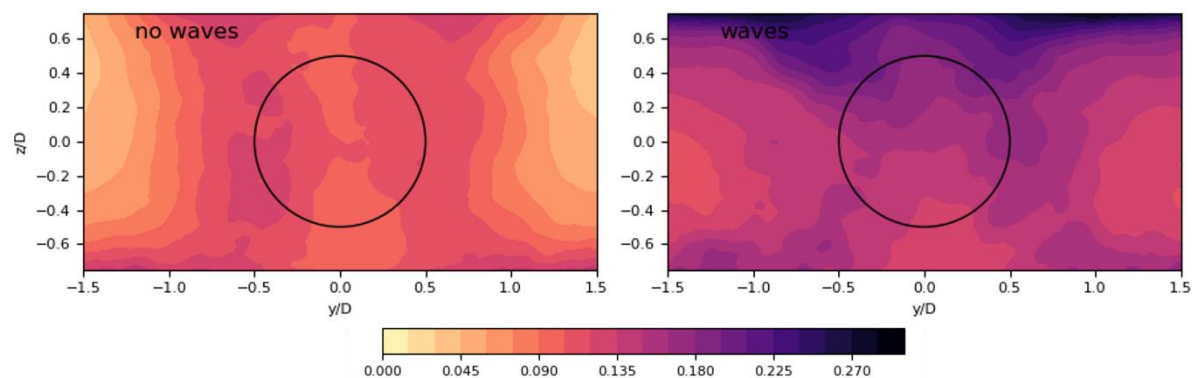


Figure 8.6. Exemple d'intensité de la turbulence dans le sens du courant à 8D en aval de la turbine sans vagues (à gauche) et avec vagues (à droite), d'après le modèle DOFAS. Le cercle indique la position et la zone du rotor.

La comparaison avec les expériences et l'analyse détaillée de la variation des caractéristiques de l'écoulement dans le cycle des vagues sont documentées en vue d'une publication. L'extension de la méthodologie pour analyser les séries d'ondes irrégulières spécifiques et les champs d'ondes qui sont obliques par rapport au plan du rotor, et donc à l'axe du sillage, qui sont connus pour se produire sur de nombreux sites, progresse également.

9 BEM instable : Université de Manchester

9.1 Aperçu du modèle et de l'utilisation prévue

L'université de Manchester a mis au point une méthode interne de calcul des éléments de pale (BEM) qui peut être utilisée pour déterminer la charge et la puissance de sortie d'un dispositif dans des conditions de fonctionnement stables et instables. La principale application de la méthode est la prédiction des spectres de charge des pales à partir desquels on obtient un indicateur des charges de fatigue agrégées, une charge équivalente aux dommages (DEL).

Les normes de conception stipulent un point de fonctionnement "normal" qui contribue à la fatigue mesurée sur un site comme une condition de dix minutes (Peacock, 2011). Ces conditions varient en fonction de la vitesse d'écoulement initiale, du cisaillement, de la turbulence et des vagues. Chacun de ces types de conditions instables a été étudié au cours du projet TIGER, en utilisant les données de mesure acquises sur différents sites TIGER, avec un accent particulier sur le Raz Blanchard. Avant la disponibilité des données ADCP de ce site, l'analyse et le développement des méthodes ont été entrepris en utilisant les données d'écoulement et les prédictions du modèle du site EMEC. Tout au long de ce travail, l'accent est mis sur l'utilisation d'un BEM efficace pour déterminer l'impact de la variation spatiale des conditions sur un site unique et entre les sites sur la charge de fatigue subie par une turbine unique et un ensemble de turbines. La caractérisation de la variation spatiale des conditions sur un site sera également utilisée pour mieux informer et valider les modèles à l'échelle du canal.

Pendant le projet TIGER, plusieurs dispositifs hydroliens différents ont été modélisés, y compris une turbine à l'échelle du laboratoire pour laquelle des données de charge sont disponibles dans des publications antérieures (Payne et al. 2018), une géométrie publiquement disponible d'une turbine "à l'échelle réelle" (Scarlett et al., 2019) et avec une étude menée avec les développeurs de turbines Orbital Marine Power (OMP) (par exemple, Ouro et al. 2022). Le dispositif hydrolien modélisé se compose de deux rotors comportant chacun deux pales, suivant la conception d'un dispositif flottant en grandeur réelle par OMP. En outre, une étude de modélisation en aveugle a été menée entre l'ULHN et l'UNIMAN pour évaluer le niveau de fidélité requis dans les modèles à l'échelle du dispositif et l'incertitude dans la charge et la production d'énergie des différentes méthodes, pour les cas énumérés dans le tableau 9.1.

Table 9.1. Cas considérés dans l'étude de modélisation en aveugle.

Modèles de turbines / Conditions de débit de départ	LES-ALM (UoM)	LL-VPM (ULHN)	BEM (UoM)	BEM (à lame)
Vitesse d'écoulement moyenne au début, T1	TGL	TGL	TGL / O2	O2
Turbulence synthétisée	TGL / O2	TGL	TGL / O2	O2
Turbulence synthétisée + cisaillement	TGL / O2	N/A	TGL / O2	O2
Modèle haute-fidélité de turbulence + cisaillement	TGL / O2		TGL / O2	O2

Plusieurs publications académiques ont été produites en utilisant les données du modèle BEM instationnaire :

- Mullings H, Stallard T. (2019) Assessment of tidal turbine load cycles using synthesised load spectra, including blade-scale fluctuations, *EWTEC 2019 13th European Wave and Tidal Energy Conference*, Naples, Italie.
- Mullings H, Stallard T. (2021) Assessment of dependency of unsteady onset flow and resultant tidal turbine fatigue loads on measurement position at a tidal site. *Energies*, volume Special Issue Tidal Turbines DOI : 10.3390/en14175470.
- Mullings H, Stallard T. (2022) Impact of spatially varying flow conditions on the prediction of fatigue loads of a tidal turbine. *International Marine Energy Journal*. 5(1) 103-111. DOI : <https://doi.org/10.36688/imej.5.103-111>.
- H. Mullings, T. Stallard (2022) Analysis of tidal turbine blade loading due to blade scale flow, *Journal of Fluids and Structures*, Volume 114, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2022.103698>.
- Ouro P, Mullings H, Stallard T. (2022) Establishing confidence in predictions of fatigue loading for floating tidal turbines based on large-eddy simulations and unsteady blade element momentum, *Trends in Renewable Energies Offshore*, 915-924, DOI : 10.1201/9781003360773-101.

Le modèle a également contribué à des présentations et des affiches lors des événements locaux et internationaux suivants :

- -EWTEC 2021 : 14e Conférence européenne sur l'énergie des vagues et des marées, Plymouth, Royaume-Uni.
- SEANERGY 2022 : Conférence et exposition Seanergy, Le Havre, France.
- PRIMaRE 2022 : 9e conférence annuelle PRIMaRE, Cornouailles, Royaume-Uni.
- -ICOE 2022 : Conférence internationale sur l'énergie océanique, Donostia/San Sebastian, Espagne.
- -RENEW 2022 : 5e conférence internationale sur les énergies renouvelables en mer, Lisbonne, Portugal.

9.2 Description du modèle

9.2.1 Paramètres spatiaux

Contrairement aux modèles de ressources, la grille spatiale n'est pas spécifique au site dans ce code. La grille spatiale est principalement utilisée pour définir les conditions d'écoulement de début, et comme il ne s'agit pas d'un code coûteux en calcul, la grille peut être très détaillée. L'espacement de la grille généralement utilisé pour définir le champ d'écoulement de début variant dans le temps est de l'ordre de 0,25 m à 1 m pour des turbines de 20 m de diamètre. Un espacement plus petit, par exemple 0,01 m, peut être utilisé pour des échelles de longueur de turbulence plus fines et pour différentes tailles de turbines considérées.

9.2.2 Paramètres temporels

Comme pour la grille spatiale, les paramètres temporels ne sont pas limités en raison du coût de calcul. Cependant, pour la validation avec les expériences et pour considérer les intervalles quasi stationnaires de la ressource marémotrice, des périodes spécifiques sont utilisées, allant de 60 à 600 secondes. Ces périodes sont échantillonnées à haute fréquence, correspondant généralement à l'ensemble des données expérimentales, ou pour résoudre les fréquences pertinentes de l'écoulement instationnaire de départ. Pour les simulations axées sur la cinématique induite par les vagues, on utilise habituellement O (10) pas de temps

par cycle de vague. Pour les simulations avec des conditions d'apparition turbulentes, une gamme de fréquences plus élevée est modélisée, et cela peut varier avec le modèle de turbulence employé pour synthétiser l'écoulement d'apparition.

9.2.3 Représentation de la turbine

Le modèle d'élément de pale (BEM) extrait le flux d'attaque à des positions "N" le long d'une longueur de pale, à des positions qui tournent avec le temps, en fonction du point de fonctionnement choisi de la turbine. L'écoulement de début est utilisé pour déterminer l'écoulement de début relatif (U_{REL}) et l'angle d'entrée (φ) par rapport à la pale à chaque position le long de la pale, comme le montrent les équations (9.1) et (9.2).

$$\partial U_{REL}(t) = \sqrt{U_X^2 + (\omega r - U_\theta^2)} \quad (9.1)$$

$$\partial \varphi(t) = \sin^{-1} \frac{U_X(t)}{U_{REL}(t)} \quad (9.2)$$

Où U_{REL} est la vitesse relative à la pale qui incorpore la vitesse longitudinale, U_X est la vitesse de départ dans le sens de l'écoulement qui comprend une induction axiale (a) par $U_X = U_0(1 - a)$ où U_0 est la vitesse amont, et les composantes dans la direction tangentielle, U_θ avec la vitesse angulaire ω et chaque rayon, r . La force de portance, L et la force de traînée, D sur chaque segment de pale varient selon les équations (9.3) et (9.4).

$$\partial L(t) = \frac{1}{2} B \rho c U_{REL}^2 C_L \partial r \quad (9.3)$$

$$\partial D(t) = \frac{1}{2} B \rho c U_{REL}^2 C_D \partial r \quad (9.4)$$

où, c est la longueur de la corde, ∂r est la largeur radiale du segment de pale, B est le nombre de pales, ρ est la densité du fluide, C_L et C_D correspondent respectivement aux coefficients de portance et de traînée. En utilisant les forces de portance et de traînée calculées pour chaque pale, les forces axiales ($F_a(t)$) et tangentielle ($F_t(t)$) le long de chaque pale sont calculées à l'aide des équations (9.5) et (9.6).

$$F_a(t) = \partial L(t) \cos(\varphi(t)) + \partial D(t) \sin(\varphi(t)) \quad (9.5)$$

$$F_t(t) = \partial L(t) \sin(\varphi(t)) - \partial D(t) \cos(\varphi(t)) \quad (9.6)$$

La force axiale ($F_a(t)$) sur chaque segment de la pale conduit au calcul du moment de flexion à la racine ainsi que de la poussée du rotor. Ces résultats peuvent être utilisés pour établir les spectres de charge respectifs, et donc déterminer les cycles de charge permettant de prédire les charges de fatigue pour les pales et le rotor. Cette méthode peut être mise en œuvre pour déterminer les charges instationnaires par l'utilisation de l'écoulement à début variable.

9.2.4 Autres paramètres numériques

Les modèles d'éléments de pale dépendent généralement de l'entrée des courbes polaires des coefficients de portance et de traînée. Le code BEM utilisé à l'Université de Manchester a été étendu pour inclure la contribution des fluctuations à plus haute fréquence à l'échelle de la pale des forces de portance et de traînée dues à la vitesse relative turbulente de la pale (Mullings et Stallard, 2022). Il a été démontré que cela permettait d'obtenir de meilleures prédictions de la charge de fatigue lorsque des structures très cohérentes sont présentes dans l'écoulement initial, comme cela est observé dans les mesures sur le terrain et lors de la modélisation à l'aide d'une méthode de tourbillon synthétique.

9.2.5 Conditions d'entrée et conditions aux limites

Les principales conditions d'entrée de ce code BEM sont les suivantes :

- Géométrie de la turbine (N pales, rayon du rotor et du moyeu)
- Géométrie de la pale (variation radiale de la section du profil, de la corde et du pas)
- Définition de la section, stable (variation des coefficients de portance et de traînée en fonction de l'angle d'attaque)
- Définition de la section, instationnaire (Spectre de variation des coefficients de portance et de traînée)

Les conditions limites de l'écoulement comprennent :

- Domaine maillé des vitesses d'apparition variant dans le temps dans la zone balayée, y compris :
 - Débit de début (simple ou multiple/cycles tidaux)
 - Profils de cisaillement
 - Échelles de longueur de la turbulence (dans le sens du courant, vertical, transversal)
 - Intensité de la turbulence (moyennée au moyeu ou au disque)
 - Position de la turbine (par rapport à la surface et au lit)
 - Cinématique induite par les vagues

Ce code BEM fonctionne sur la base de vitesse d'entrée définies. Celles-ci peuvent aller d'un ensemble simplifié de conditions stables pour examiner les caractéristiques de performance globales à un chargement à partir d'un début instable, défini par un modèle de turbulence (tel que Von Karman ou la méthode des tourbillons synthétiques) et/ou avec une cinématique due à des vagues (régulières ou irrégulières, typiquement des vagues linéaires sont supposées) ou défini par une simulation CFD précurseur (par exemple, grâce à simulations DOFAS, voir section 8). Dans le cadre de TIGER, une étude collaborative a été menée pour examiner la façon dont le flux entrant peut être défini et l'incertitude qui se produit en modélisant de plusieurs façons différentes un écoulement instable avec les mêmes propriétés moyennées dans le temps.

9.2.6 Sorties

Ce code a été principalement utilisé pour évaluer la variation de la charge subie par une pale et un rotor d'une turbine marémotrice. Des travaux antérieurs ont validé le code par rapport aux résultats expérimentaux, comme le montre la 9.1 Les travaux précédents ont validé le

code face aux résultats expérimentaux, comme le montre la figure 9.1, avec une prédiction de la charge de pointe à 2 % près et de la charge de fatigue à 7 % près.

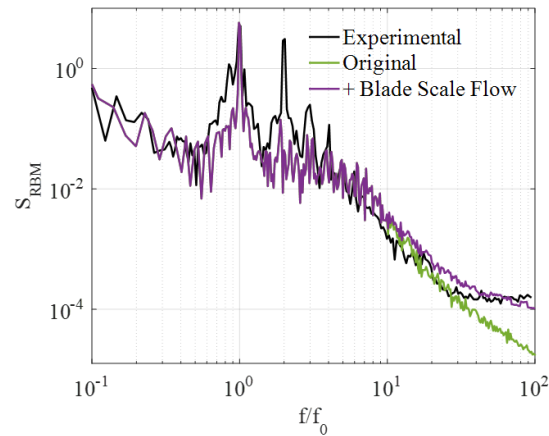


Figure 9.1. Spectres du moment de flexion à la racine provenant du code BEM avec simulation de l'écoulement initial utilisant un modèle spectral de Von Karman de la turbulence et des coefficients moyens de portance et de traînée et avec inclusion des fluctuations de force à haute fréquence dues à l'écoulement à l'échelle de la pale, montrant un accord sur toute la gamme de fréquences avec l'expérience (Mullings & Stallard 2022).

En outre, le code a été utilisé pour analyser l'impact de différentes conditions de conception, telles que la série de points de fonctionnement et l'influence du sillage en aval, pour quantifier la variation des charges de fatigue avec les conditions d'amorçage et pour évaluer la gamme des charges de fatigue prédites avec une méthode de synthèse de flux d'amorçage différente (illustrée à la Figure 9.2). Ce travail alimente l'analyse des stratégies de contrôle pour atténuer la variation de la charge en même temps pour les turbines individuelles soumises à un flux d'amorçage instable et pour les turbines dans les réseaux soumises aux sillages des turbines en amont.

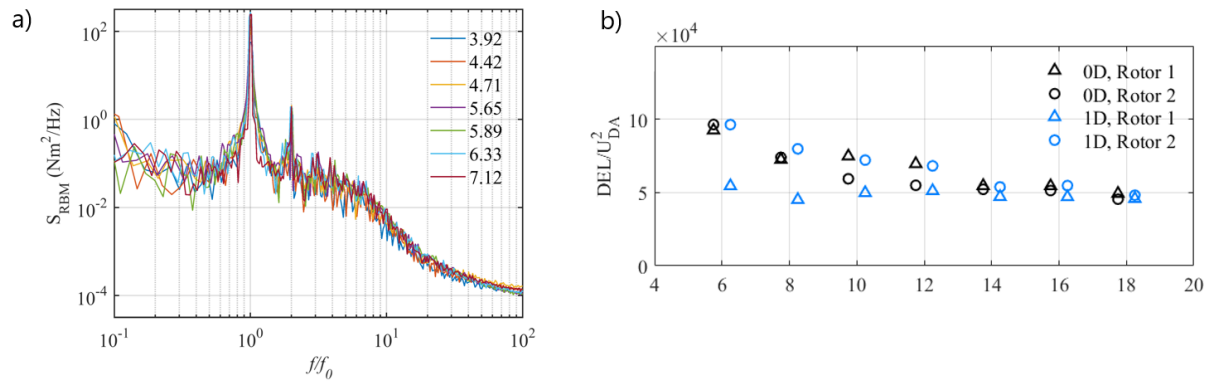


Figure 9.2. (a) Spectres du moment de flexion à la racine pour de multiples rapports de vitesse de pointe (Mullings et Stallard, 2022). (b) Variation des charges normalisées équivalentes aux dommages pour un système à deux turbines situé à différentes positions en aval, pour un système de turbine en ligne et un système décalé d'un diamètre (Ouro et al., 2022).

10 Conclusions

Ce rapport résume la gamme de modèles utilisés dans le cadre du projet TIGER. Dans de nombreux cas, les modèles ont été utilisés pour fournir des informations aux développeurs de technologies et de sites afin de les aider dans leur processus de conception. Cela contribue à l'un des objectifs clés de TIGER, qui est d'accélérer le développement du secteur de l'énergie hydrolienne, plus rapidement et plus efficacement que cela ne serait possible sans le soutien d'Interreg.

Les données des modèles ont également été utilisées pour alimenter des considérations technico-économiques stratégiques de haut niveau pour l'industrie de l'énergie hydrolienne. En particulier, les données de plusieurs modèles ont été utilisées pour aider l'ORE Catapult à élaborer son rapport "Cost Reduction Pathway of Tidal Stream Energy in the UK and France"².

Ce rapport peut être considéré comme un complément au livrable T3.1.2 de TIGER, "Data Collection & Survey Best Practice Report", qui traite des exigences générales pour l'évaluation des ressources marines. Le livrable T3.1.2 a souligné l'importance clé de la modélisation numérique dans le cadre de toute étude d'évaluation des ressources. Le rapport a aussi souligné la capacité de la gamme de modèles, concernant les différentes entrées océanographiques, y compris la bathymétrie, les courants de marée dépendant de la profondeur, la turbulence, les effets du vent et des vagues, ainsi que l'inclusion de là ou des turbines hydroliennes elles-mêmes.

En tant que tel, le rapport devrait aider les chercheurs, les praticiens et les décideurs à sélectionner les approches et les outils de modélisation appropriés pour couvrir le domaine spatial et temporel requis pour leurs besoins. Étant donné les différentes dispositions et le coût de calcul, une combinaison de deux ou plusieurs approches de modélisation pour couvrir le domaine régional, de site et de turbine à travers les années, les cycles de marée et la turbulence est la plus probable.

Les recherches, les ressources et les applications présentées ici et menées dans le cadre de TIGER contribueront à l'avancement général du secteur, en fournissant des données de modélisation de la plus haute qualité pour la prise de décisions en matière d'ingénierie, d'environnement et de finances.

² <https://ore.catapult.org.uk/?orecatapultreports=cost-reduction-pathway-of-tidal-stream-energy-in-the-uk-and-france>

Annexe A - Comparaison croisée des modèles de ressources et des données mesurées au Raz Blanchard

Préparé par l'Université de Manchester

A1 Introduction

L'objectif principal de l'étude présentée dans cette annexe est de quantifier la gamme des prédictions de charges stationnaires à partir de méthodes de détermination des conditions d'écoulement initial sur un site. Dans le cadre du projet TIGER, six sites différents ont été examinés, avec des dispositifs de mesure déployés sur certains d'entre eux et l'analyse de modèles appliquée à d'autres. Cette annexe se concentre sur le site du Raz Blanchard, au large des côtes de Normandie en France. Ce site a été choisi, car il s'agit de l'un des sites les plus énergétiques de la région du chenal, avec plusieurs modèles déjà appliqués pour indiquer le potentiel de capture d'énergie pour les turbines hydroliennes.



Figure A.1. Sites de la région de la Manche étudiés dans le cadre du projet TIGER. Obtenu à partir de Interregtiger.com

Cette étude est divisée en trois domaines. Tout d'abord, la section A2 se concentre sur les données disponibles sur un site d'essai bien défini (EMEC). La section A3 présente l'application de l'analyse utilisée pour le site EMEC à un site du projet TIGER (Le Raz Blanchard), avec une comparaison des conditions de début d'écoulement, menant à une autre comparaison avec les données modélisées sur le site. Un bref aperçu de l'application de ces conditions dans les modèles à l'échelle du dispositif est inclus. En outre, l'influence de la variation des conditions pour un seul cas de conception (vitesse moyenne d'un seul disque) sur la charge est montrée.

A1.1 Comprendre la ressource instable

Afin de planifier le développement d'une installation hydrolienne, une compréhension approfondie de la ressource est nécessaire. L'utilisation des marées pour la production

d'énergie permet d'obtenir des résultats fiables, car les cycles des marées sont prévisibles. Cette prévisibilité peut être définie en utilisant les composantes de la marée sont spécifiques à une zone, en termes d'amplitude, mais cohérentes en termes de fréquence. La compréhension des marées dans une zone spécifique permet de déterminer facilement les sites les plus appropriés pour l'extraction de l'énergie des courants de marée. L'un des moyens les plus simples pour calculer les meilleurs sites est d'utiliser des modèles de canaux, qui reposent sur les équations non linéaires des eaux peu profondes. Plusieurs de ces modèles ont été utilisés dans ce projet par les partenaires universitaires. Certains de ces modèles ont été inclus dans cette étude sur le site du Raz Blanchard afin de les comparer aux données de mesure. Une campagne de mesure a été menée dans le cadre de ce projet pour déterminer la variabilité spatiale sur un site de marée, avec plusieurs dispositifs déployés et mesurés sur une période simultanée.

Les modèles de canaux sont très utiles pour déterminer la production d'énergie globale qui peut être obtenue d'un site. Les modèles de canaux peuvent inclure des turbines comme termes de traînée pour donner une idée de l'écoulement perturbé autour d'un réseau. L'intérêt de cette étude est d'établir la variation des conditions pour chaque cas de conception, où un cas de conception est considéré comme une vitesse moyenne spécifique du disque utilisée pour estimer la performance d'une turbine ou d'un réseau. La variation des conditions d'écoulement peut différer entre les sites, entre les emplacements à l'intérieur d'un site et également entre les positions des turbines à chaque emplacement. Ici, les mesures et les données du modèle définiront la variation des conditions pour chaque cas de conception.

A2 Étude initiale : Site d'essai EMEC

Une première étude a été menée en regardant le site d'essai EMEC, en utilisant les données acquises dans le cadre du projet REDAPT (Sellar et al., 2016). Ces données comprenaient deux ADCPs mesurant simultanément, espacés d'environ 78m, ainsi que les résultats des modèles de canaux MIKE3 validés sur le site. L'influence de la position de la turbine sur la charge subie a été étudiée avec des résultats présentés dans (Mullings et Stallard, 2021) comme la variation de la charge avec la position et l'emplacement sur un site, résultats présentés dans (Mullings et Stallard, 2022). Ces résultats peuvent varier de 0,5% à 30% entre la position, l'emplacement et le modèle à la mesure. Cela illustre la nécessité d'avoir une compréhension approfondie de la variation spatiale des conditions sur un site.

Pour un cas de conception unique, les conditions instationnaires de départ sont définies par un profil de cisaillement de la vitesse, la turbulence et les caractéristiques des vagues. Pour cette étude, la gamme de vitesse moyenne du disque est de 2.0-2.2 m/s pour une turbine considérée comme "montée sur le lit" et donc la position sera appelée "proche du lit". L'utilisation des mesures du projet REDAPT fournit des données ADCP de qualité assurée fournissant des profils verticaux des vitesses de courant. Le post-traitement des données dans le cadre du projet REDAPT a également permis d'obtenir des caractéristiques de vagues moyennes, ce qui permet d'éliminer les cas où de très grandes vagues sont présentes afin de voir l'impact sans la présence de vagues. Les caractéristiques de l'écoulement initial ont été publiées dans Mullings et Stallard (2021, 2022) et les figures A2 et A3 en donnent un aperçu.

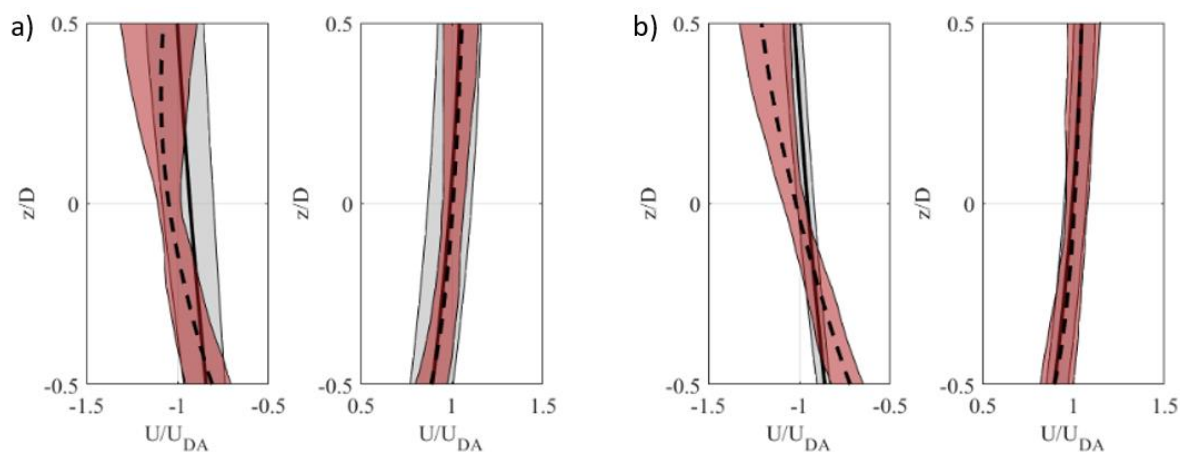
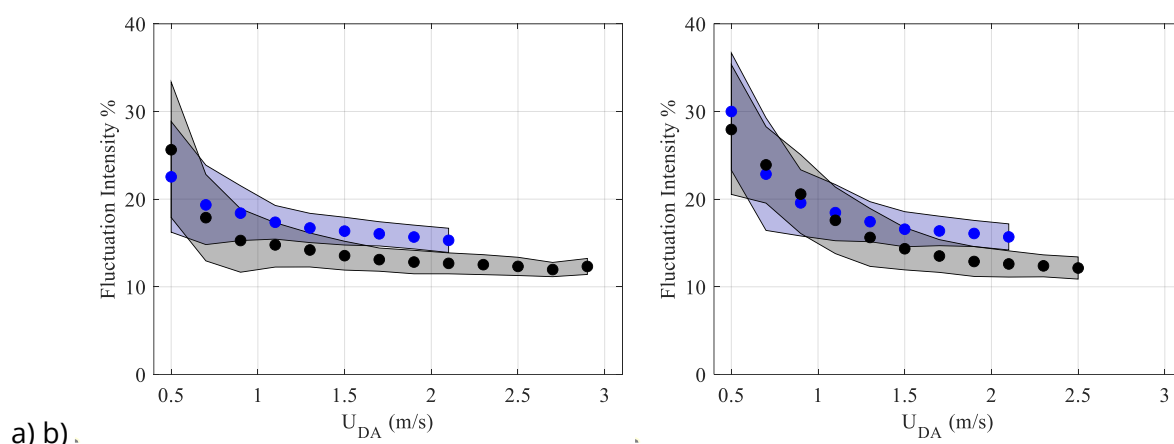
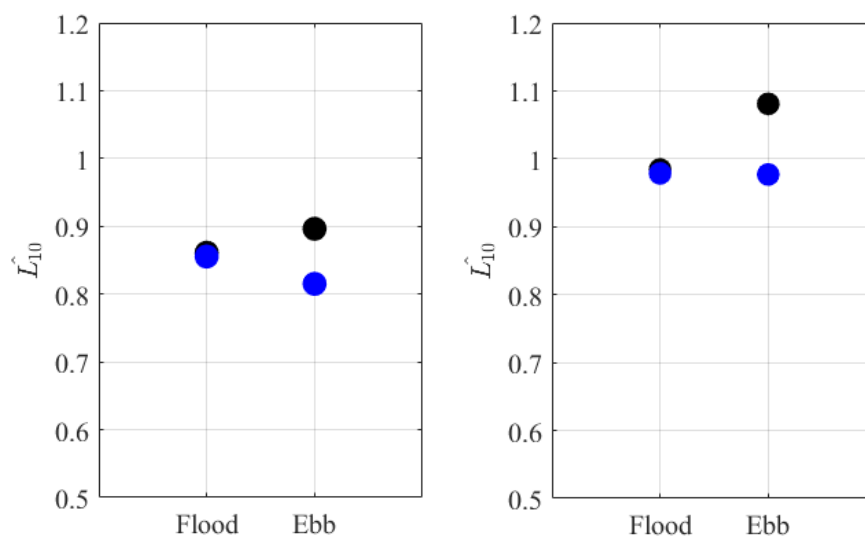


Figure A2. Variation du profil de cisailment vertical, normalisé avec l'UDA, pour le cas de conception unique, moyenne du profil mesuré (pointillés noirs), variation du profil mesuré (bande rouge), moyenne du profil prédit (plein noir) et variation du profil prédit (bande grise).



a) b).

Figure A3. Intensité de la fluctuation de la vitesse à deux emplacements ADCP (a et b), pour une turbine proche du fond pour la marée montante (RHS) et la marée descendante (LHS) dans le site d'essai EMEC, pour une gamme de vitesses moyennes du disque.



a) b)

Figure A4. Variation de la charge équivalente aux dommages pour une turbine subissant une charge à la vitesse moyenne d'un disque.

Références

Section 2 - Delft3D FM-SWAN

Service EDINA Marine Digimap. 2013. Arcsecond Gridded Bathymetry [données géospatiales ASC].

Deltares, 2019 Delft3D-FLOW : Manuel d'utilisation. Rapport technique.

Egbert, G. D., Bennett, A. F., et Foreman, M. G. G. 1994. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 99(C12) :24821-24852. doi : 10.1029/94jc01894

Groupe de compilation bathymétrique GEBCO 2020. La grille GEBCO_2020 - un modèle de terrain continu des océans et des terres du globe. NERC, UK 2020. doi :10.5285/a29c5465-b138-234d-e053-6c86abc040b9.

Hersbach, H, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* vol :146 730, pg1999-2049,

Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M., et Stelling, G. S. 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(8-9) :883-915, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>

SHOM. 2016. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

Trihartono, A., McLellan, B., Putra, S. S., Wegen, M. v. d., Reyns, J., Dam, A. v., Solomatine, D. P., et Roelvink, J. A. 2015. Le 5e avenir durable pour la sécurité humaine (2014) Calibration multi-stations du modèle de maillage flexible 3D : Une étude de cas de l'estuaire du Columbia. *Procedia Environmental Sciences*, 28 :297-306, 2015. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.038>

TU Delft, 2010. SWAN : Documentation scientifique et technique. Rapport technique.

Xia, J., Falconer, R. A., et Lin, B. 2020 Impact of different tidal renewable energy projects on the hydrodynamic processes in the Severn Estuary, UK. *Ocean Modelling*, 32(1-2) :86-104, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.11.002>.

Section 3 - Thétis

Balay S, Abhyankar S, Adams M.F, Brown J, Brune P, Buschelman K, Dalcin L, Eijkhout V, Gropp WD, Kaushik D, Knepley MG, McInnes LC, Rupp K, Smith BF, Zampini S, Zhang H, Zhang H, 2016, PETSc Users Manual, Rapport technique, Argonne National Laboratory

Université de Bangor, 2017, Données du réseau de marégraphes de l'UKHO.

Black & Veatch, 2020, Lessons Learnt from MeyGen Phase 1A Final Summary Report, rapport technique.

Coles DS, Blunden LS, Bahaj AS, 2016. Validation expérimentale de la méthode de traînée distribuée pour la simulation de grands réseaux de turbines de courant marin utilisant des clôtures poreuses, *International Journal of Marine Energy*, 16 :298-316.

Coles DS, Mackie L, White D, Miles J, 2021a, Cost modelling and design optimization of tidal stream turbines (modélisation des coûts et optimisation de la conception des turbines hydroliennes), Actes de la 14th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC), Plymouth, UK, 2139 :1-11

Coles DS, Angeloudis A, Goss Z, Miles J, 2021b, Tidal stream vs. wind energy : The value of cyclic power when combined with short-term storage in hybrid systems, *Energies*, 14 :1106

Coles DS, Angeloudis A, Goss Z, Miles J, 2021c, Tidal stream vs. wind energy : The value of cyclic power when combined with short-term storage in hybrid systems, *Energies*, 14 :1106

Egbert G, Erofeeva S, Ray R, 2010, Assimilation des données altimétriques pour les marées non linéaires en eaux peu profondes : Marées quart-de-jour du plateau continental nord-ouest européen, *Cont. Shelf Res.*, 30 :668-679

Fairley I, Williamson B, McIlvenny J, King N, Masters I, Lewis M, Neill S, Glasby D, Coles DS, Powell B, Naylor K, Robinson M, Reeve D, 2022, Drone-based large-scale particle image velocimetry applied to tidal stream energy resource assessment, *Renewable Energy*, 196 : 839-855.

Frost C., Quantifying the benefits of tidal stream energy to the wider UK energy system, rapport technique, Offshore Renewable Energy Catapult.

Karna, T, de Brye, B, Gourgue, O, Lambrechts, J, Comblen, R, Legat, V, Deleersnijder, E, 2011, A fully implicit wetting-drying method for DG-FEM shallow water models, with an application to the Scheldt Estuary, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200 (5) :509-524

Mackie L, Evans PS, Harrold MJ, O'Doherty T, Piggott MD, Angeloudis A, 2021, Modelling an energetic tidal strait : investigating implications of common numerical configuration choices, *Applied Ocean Research*, 108 :102494

Miles J, Coles DS, Paine A, Barr S, 2022, Flow characteristics at Ramsey Sound relevant to tidal déploiement de dispositifs et planification de la récupération, affiche PRIMaRE, Penryn, Royaume-Uni

Pennock S, Coles DS, Angeloudis A, Bhattacharya S, Jeffrey H, 2022, Temporal complementarity of marine renewables with wind and solar generation : Implications for GB system benefits, *Applied Energy*, 319 :119276

Pudjianto D, Frost C, Coles DS, Angeloudis A, Smart G, Strbac G, UK Studies on the Wider Energy System Benefits of Tidal Stream, 2022, en préparation.

Seazone Solutions Ltd, 2014, Edina Digimap Service, Hydrospatial one, bathymétrie quadrillée.

Soulsby RL, 2005, Tidal current boundary layers, In : Le Mehaute, B., Hanes, D.M. (Eds.), *The Sea*, Volume 9 : Ocean Engineering Science, 9. Harvard University Press

Thiebot J, Guillou N, Coles DS, Guillou S, 2022, On nodal modulations of tidal-stream energy ressource in north-western Europe, *Applied Ocean Research*, 121 :103091

Todeschini G, Coles DS, Lewis M, Popov I, Angeloudis A, Fairley I, Johnson F, Williams AJ, Robins P, Masters I, 2022, Medium-term variability of the UK's combined tidal energy resource for a net-zero grid, *Energy*, 238(Part A) :121990

Section 4 - Palabos

Bouzidi M., Firdaouss M., et Lallemand P., "Momentum transfer of a Boltzmann-lattice fluid with boundaries", *Phys. Fluids* 13, 3452 (2001).

Grondeau M., Poirier J.-C., Guillou S.S., Méar Y., Mercier P., et Poizot E., "Modelling the wake of a tidal turbine with upstream turbulence : LBM-LES versus Navier-Stokes LES," *Int. Mar. Energy J.* 3(2), 83 (2020).

Grondeau M., Guillou S.S., Mercier P. et Poizot E., "Wake of a ducted vertical axis tidal turbine in turbulent flows, LBM actuator-line approach ", *Energies* 12, 4273 (2019).

Grondeau M., Guillou S.S., Poirier J.-C., Mercier P., Poizot E., et Méar Y., "Studying the Wake of a Tidal Turbine with an IBM-LBM Approach Using Realistic Inflow Conditions", *Energies* 15, 2092 (2022).

Khaled F., Guillou S.S., Méar Y., et Hadri F., "Impact of blockage ratio on the transport of sediments in the presence of a hydrokinetic turbine : numerical modelling of the interaction sediments-turbine", *International Journal of Sediment Research* 36, 696-710 (2021).

Latt J., O. Malaspinas, D. Kontaxakis, A. Parmigiani, D. Lagrava, F. Brogi, M. Ben Belgacem, Y. Thorimbert, S. Leclaire, S. Li, F. Marson, J. Lemus, C. Kotsalos, R. Conradin, C. Coreixas, R. Petkantchin, F. Raynaud, J. Beny, et B. Chopard, "Palabos : Parallel lattice boltzmann solver", *Comput. Math. Appl.* 81, 334-350 (2021)

Malaspinas O. et Sagaut P., " Consistent subgrid scale modelling for lattice Boltzmann methods ", *J. Fluid Mech.* 700, 514-542 (2012)

Mercier P., Grondeau M., Guillou S.S., Thiébot J., et Poizot E., "Numerical study of the turbulent eddies generated by the seabed roughness. Case study at a tidal power site", *Appl. Ocean Res.* 97, 102082 (2020).

Mercier P., Ikhennicheu M., Guillou S.S., Germain G., Poizot E., Grondeau M., Thiébot J., et Druault P., "The merging of Kelvin-Helmholtz vortices into large coherent flow structures in à high Reynolds number flow past a wall-mounted square cylinder", *Ocean Engineering* 204, 107274 (2020).

Mercier P., Thiébot M., Guillou S.S., Maisondieu C., Poizot E., Pieterse A., Thiébot J., Filipot J.-F., et Grondeau M., "Turbulence measurements : An assessment of Acoustic Doppler Current Profiler accuracy in rough environment", *Ocean Engineering* 226, 108819 (2021).

Mercier P., et Guillou S.S., "The impact of the seabed morphology on turbulence generation in a strong tidal stream", *Phys. of Fluids* 33, 055125 (2021).

Mercier P., Guillou S.S., Thiébot J., et Poizot E., "Turbulence characterisation during ebbing and flooding tides in the Raz Blanchard with large eddy simulation", *Proceedings of the 14th European Wave and Tidal Energy Conference* 5-9th Sept 2021, Plymouth, UK.

Mercier P. et Guillou S.S., Spatial and temporal variations of the flow characteristics at a tidal stream power site : a high-resolution numerical study, *Energy Conversion and Management*, 269 (2022) 116123. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116123>

Mercier P. et Guillou S.S., Simulation des grandes échelles de la turbulence dans un écoulement de marée : effet d'une turbulence synthétique en condition d'entrée. *Congrès Français de Mécanique*, 29 août - 2 sept. 2022, Nantes.

Nguyen V.T., Guillou S.S., Thiébot J. et Santa Cruz A., " On the use of turbulent models for simulating the flow behind a tidal turbine represented by a porous media ", *Renewable Energy* 97, 625-635 (2016).

Polleto R., Craft T., et Revell A., "A new divergence free synthetic eddy method for the reproduction of inlet flow conditions for LES", *Flow Turbul. Combust.* 91, 519-539 (2013).

Section 5 - Télémac

Bourgoin A., Guillou S.S., Thiébot J., Ata R (2019) Utilisation de la simulation Large-Eddy pour l'estimation de la contrainte de cisaillement du lit sur une dune. *International Journal of Sediment Research*, 36(6), pp. 687-695.

Bourgoin A., Guillou S.S., Thiébot J., Ata R. (2020) Turbulence characterization at tidal energy sites using Large Eddy Simulations : Case of the Alderney Race. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 378 : 20190499.

Djama Dirieh N., Thiébot J., Guillou S., Guillou N. (2022) Blockage Corrections for Tidal Turbines-Application to an Array of Turbines in the Alderney Race. *Energies*, 15, Article 3475.

Guillou S., Bourgoin A., Thiébot J., Ata R. (2021) On the spatial variability of the flow characteristics at a Tidal energy site : Cas du Raz Blanchard, EWTEC 21.

Thiébot J., Bailly du Bois P., Guillou S. (2015) Modélisation numérique de l'effet des hydroliennes sur l'hydrodynamique et le transport sédimentaire - Application à la course d'Aurigny (Raz Blanchard), France. *Énergies renouvelables*, 75, pp. 356-365.

Thiébot J., Guillou S.S., Nguyen V.T. (2016) Modélisation de l'effet de grands réseaux d'hydroliennes avec des disques actionneurs à profondeur moyenne. *Ocean Engineering*, 126, pp. 265-275.

Thiébot J., Guillou N., Guillou S.S, Good A., Lewis M. (2020) Wake field study of tidal turbines under realistic flow conditions. *Renewable Energy*. 151, pp. 1196-1208.

Thiébot J., Djama Dirieh N., Guillou S., Guillou N. (2021) L'efficacité d'une clôture d'hydroliennes dans la course d'Alderney : comparaison entre modèles analytiques et numériques. *Energies*, 14(4), Article 892.

Thiebot J, Guillou N, Coles DS, Guillou S, 2022, On nodal modulations of tidal-stream energy ressource in north-western Europe, *Applied Ocean Research*, 121:103091

Section 6 - DOROTHY

C. Choma Bex, C. Carlier, A. Fur, G. Pinon, G. Germain, et al. (2020a). Une méthode stochastique pour tenir compte de la turbulence ambiante dans les calculs de Vortex Lagrangiens. *Modélisation mathématique appliquée*, Elsevier, 2020, 88, pp.38-54. [. <10.1016/j.apm.2020.05.025>. <hal-03400955>](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03400955)

C. Choma Bex, G. Pinon, M. Slama, B. Gaston, G. Germain, et al. (2020b). Lagrangian Vortex computations of turbine wakes : recent improvements using Poletto's Synthetic Eddy Method (SEM) to account for ambient turbulence. *Journal of Physics : Conference Series*, IOP Publishing, 2020, 1618 (6), pp.062028. [. <10.1088/1742-6596/1618/6/062028>. <hal-03776677>](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03776677)

- C. Choma Bex, M.-A. Dufour, Y. Ben Belkacem, G. Pinon, G. Germain, E. Rivoalen (2022). Simulation d'hydroliennes et d'éoliennes avec le code de simulation DOROTHY. Accepté pour présentation à la conférence RENEW2022.
- A. van Garrel, (2003). Développement d'un module de simulation de l'aérodynamique d'une éolienne. Rapport technique ECN-C-03-079, Centre de recherche énergétique des Pays-Bas.
- J. Katz, A. Plotkin, (2001). Low-Speed Aerodynamics (2e éd.). Cambridge University Press.
- G. Pinon, P. Mycek, G. Germain, E. Rivoalen (2012). Simulation numérique du sillage des turbines de courant marin par une méthode particulaire. *Énergies renouvelables*, Elsevier, 2012, 46, pp.111-126. [10.1016/j.renene.2012.03.037](https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.037). [hal-03515424](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03515424)
- G. Pinon, C. Carlier, A. Fur, B. Gaurier, G. Germain, et al. (2017). Prise en compte de la turbulence ambiante pour les sillages de turbines à l'aide d'une méthode Synthetic-Eddy-Method. *Journal of Physics : Conference Series*, IOP Publishing, 2017, 854, pp.012016. [10.1088/1742-6596/854/1/012016](https://doi.org/10.1088/1742-6596/854/1/012016). [hal-03776682](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03776682)
- G.T. Scarlett (2019). Hydrodynamique instationnaire des pales de turbines hydroliennes. Thèse de doctorat, Université d'Édimbourg, août 2019.
- K. Shaler, E. Branlard, A. Platt (2020). Guide de l'utilisateur et manuel théorique d'Olaf. Rapport technique NREL/TP-5000-75959, Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory.
- M. Slama, C. Choma Bex, G. Pinon, M. Togneri, L. Evans (2021a). Lagrangian Vortex Computations of a Four Tidal Turbine Array : An Example Based on the NEPTHYD Layout in the Alderney Race. *Energies*, MDPI, 2021, 14 (13), pp.3826. [10.3390/en14133826](https://doi.org/10.3390/en14133826). [hal-03296921](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03296921)
- M. Slama, G. Pinon, Y. Ben Belkacem, C. Choma Bex, M. Togneri, et al. (2021b). Fluctuation de la charge perçue par la turbine aval dans une ferme. *14e Conférence européenne sur l'énergie des vagues et des marées*, Sep 2021, Plymouth, Royaume-Uni. [hal-03372956](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03372956)

Section 7 - MIKE 21

DHI (2007). Modèle d'écoulement MIKE 21 & MIKE 3 FM . Hørsholm, Danemark.

DHI (2012). Manuel de l'utilisateur MIKE SHE, Volume-1.

Section 8 - DOFAS

P. Ouro, L. Ramirez, & M. Harrold (2019). Analyse de l'espacement des réseaux sur les performances des fermes d'hydroliennes à courant de marée en utilisant la simulation à grande échelle. *Journal of Fluids and Structures* 91, 102732.

P. Ouro & T. Stoesser (2019). Impact de la turbulence environnementale sur la performance et les charges d'une turbine de courant de marée. *Flow, Turbulence and Combustion* 102, 613-639.

P. Ouro & T. Nishino (2021). Performance et caractéristiques de sillage des turbines hydroliennes dans un réseau infiniment grand. *Journal of Fluid Mechanics* 925, A30.

P. Ouro, P. Stansby & T. Stallard (2021). Étude de la récupération du sillage derrière une turbine à courant de marée pour différents niveaux de submersion. 14ème EWTEC, Plymouth, Royaume-Uni.

P. Ouro, H. Mullings & T. Stallard (2022). Établir la confiance dans les prédictions de charge de fatigue pour les turbines hydroliennes flottantes basées sur des simulations à grand tourbillon et sur le momentum instationnaire des éléments de pale. Tendances des énergies renouvelables en mer. Conférence RENEW, Lisbonne, Portugal.

T. Stallard, T. Feng, & P. K. Stansby (2015). Étude expérimentale du sillage moyen d'un rotor de courant de marée dans un écoulement turbulent peu profond. *Journal of Fluids and Structures* 54, 235-246.

P. Stansby & P. Ouro (2022). Modélisation des réseaux de turbines marines dans les flux de marée. *Journal of Hydraulic Research* 60, 187-204.

Section 9 - BEM instationnaire

D. Peacock, "Power Performance Assessment of Electricity Producing Tidal Energy Converters Commissioned by IEC", no. Cd, 2011

P. Ouro, H. Mullings, T. Stallard, (2022) Establishing confidence in predictions of fatigue loading for floating tidal turbines based on large-eddy simulations and unsteady blade element momentum, *Trends in Renewable Energies Offshore*, 915-924, DOI : 10.1201/9781003360773-101.

H. Mullings, T. Stallard, (2022) Analysis of tidal turbine blade loading due to blade scale flow, *Journal of Fluids and Structures*, Volume 114, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2022.103698>.

G.S. Payne, T. Stallard, R. Martinez, T. Bruce, (2018). Variation des charges sur une hydrolienne à axe horizontal à trois pales avec la fréquence et la position des pales. *Journal of Fluids and Structures*, 83, 156-170.

G. T. Scarlett, B. Sellar, T. van den Bremer, I. M. Viola, (2019). Hydrodynamique instationnaire d'une turbine hydrolienne en grandeur réelle fonctionnant dans des conditions de grandes vagues. *Renewable Energy* 143, 199-213.

Annexe A - Comparaison croisée des ressources

Deltares, 2019 Delft3D-FLOW : Manuel d'utilisation. Rapport technique.

Mullings H, Stallard T. (2021) Assessment of dependency of unsteady onset flow and resultant tidal turbine fatigue loads on measurement position at a tidal site. *Énergies*, volume : Special Issue Tidal Turbines. <https://doi.org/10.3390/en14175470>.

Mullings H, Stallard T. (2022) Impact of spatially varying flow conditions on the prediction of fatigue loads of a tidal turbine. *International Marine Energy Journal*. 5(1) 103-111. DOI: <https://doi.org/10.36688/imej.5.103-111>.

Sellar BG, Sutherland DR, " Caractérisation du site d'énergie hydrolienne à la chute de Warness, EMEC, Royaume-Uni. Energy Technologies Institute Redapt Ma1001 (Md3.8) ", décembre, 2016. [En ligne]. Disponible : <http://redapt.eng.ed.ac.uk>

Thiebot J, Guillou N, Guillou S, Good A, Lewis M, Wake field study of tidal turbines under realistic flow conditions, *Renewable Energy* 151 (2020) 1196-1208. doi:10.1016/j.renene.2019.11.129