



Rapport de développement du site TIGER : Ramsey Sound T3.2.1

V0.2

Juin 2022

Historique du document

Révision	Origine	Examiné par	Approuvé par
2	CF	GS	

Clause de non-responsabilité

Les informations, analyses et recommandations contenues dans ce rapport de l'Offshore Renewable Energy Catapult sont données à titre d'information générale. Bien que nous nous efforcions de veiller à ce que les informations soient exactes, à jour et fournies en toute bonne foi, toutes les informations sont fournies "en l'état", sur la base des informations fournies par le propriétaire de la technologie au moment de la rédaction et Offshore Renewable Energy Catapult ne donne aucune garantie d'exhaustivité, et ne fait aucune déclaration ou garantie d'aucune sorte, expresse ou implicite, concernant l'exactitude ou la fiabilité des informations et l'adéquation à un usage particulier. Toute confiance accordée à ces informations est à vos propres risques et en aucun cas Offshore Renewable Energy Catapult ne sera pas tenu responsable de toute perte, de tout dommage, y compris mais sans s'y limiter, de tout dommage indirect ou consécutif ou de toute perte ou dommage quel qu'il soit résultant de la confiance accordée à ces informations. En aucun cas Offshore Renewable Energy Catapult, ni aucun de ses employés, affiliés, partenaires ou agents, ne sera responsable envers vous ou toute autre personne de toute décision prise ou action entreprise sur la base des informations contenues dans ce rapport, même si elle a été informée de la possibilité de tels dommages. Ce rapport et son contenu sont confidentiels et ne peuvent pas être modifiés, reproduits ou distribués en tout ou en partie sans l'accord écrit préalable d'Offshore Renewable Energy Catapult.

Contenu

Acronymes	1
Résumé	2
1 Introduction	4
1.1 Cambrian Offshore South West Ltd.	5
1.2 Activités TIGER	5
2 Historique du site	5
2.1 Ramsey Sound	5
2.2 St David's Head	7
3 La région	8
3.1 Pays de Galles	8
3.1.1 Projets d'hydroliennes dans le nord du Pays de Galles	9
3.2 Pembrokeshire	11
3.2.1 Énergie marine	11
3.2.2 Installations portuaires	12
4 Caractéristiques du site	16
4.1 Ramsey Sound	16
4.1.1 L'environnement	16
4.1.2 Régime d'écoulement	17
4.1.3 Connexion au réseau	18

Tête de St David	19
4.1.4 L'environnement	19
4.1.5 Régime d'écoulement	20
4.1.6 Connexion au réseau	20
5 Options technologiques	21
6 Sites d'exploitation viables	22
6.1 Méthodologie	22
6.1.1 Sélection de la zone	22
6.1.2 Données sur la vitesse du flux de marée	23
6.1.3 Données provenant des développeurs de technologies	23
6.1.4 Contraintes environnementales	25
6.1.5 Approche	26
6.2 Cartes : contraintes douces	27
6.2.1 Trafic maritime	27
6.2.2 Zones de protection de l'environnement	27
6.2.3 Activité de pêche	27
6.2.4 Sédiments des fonds marins	27
6.2.5 Hauteurs extrêmes des vagues	31
6.2.6 Distance par rapport au rivage et au réseau	31
6.2.7 Pente du fond marin	33
6.3 Cartes : contraintes fortes	33
6.3.1 Vitesse d'écoulement	33
6.3.2 Bathymétrie	34
6.3.3 Zones d'exclusion et grille	36
6.4 Régimes des appareils	37
6.5 Résumé	40
7 Évaluation technico-économique	41
7.1 Méthodologie	41
7.2 Forme hypothétique de l'exploitation et évaluation des PEA	42
7.2.1 Évaluation du PEA	42
7.3 Évaluation technico-économique	43
7.3.1 Hypothèses de modélisation	43
7.3.2 Évaluation technico-économique à la date de mise en service	45
7.3.3 Trajectoire des LCOE et du prix d'exercice du CfD	46
7.3.4 Résumé	48
8 Résumé et recommandations	49
8.1 Résumé	49
8.2 Recommandations	52
Références	54
Annexe A. Les contraintes	60

Liste des figures

Figure 1 - Emplacement du DeltaStream dans le Ramsey Sound. Tiré de [7].	6
Figure 2 - Le TEL DeltaStream. À gauche : le dispositif construit et installé à Ramsey Sound. L'image date de 2014 à Pembroke Port. À droite : impression d'artiste d'un ensemble de dispositifs DeltaStream.	7
Figure 3 - Réseau commercial de 10 MW proposé par TEL à St David's Head. À gauche : limites du site proposé et emplacement des turbines. À droite : Emplacement de la zone de recherche par rapport au Ramsey Sound. Tiré de [8].	7
Figure 4 - Résumé des quatre projets composant le programme Pembroke Dock Marine, d'une valeur de 60 millions de livres sterling.	13
Figure 5 - L'économie de l'hydrogène dans les Orcades. Image créée par EMEC [39].	14
Figure 6 - Les éléments qui composent le RWE Net Zero Centre. Tiré de [41].	15
Figure 7 - Profil du courant à l'emplacement de l'éolienne TEL Ramsey Sound. Tiré de [46].	18
Figure 8 - Données bathymétriques (recueillies dans le cadre du projet SMMNR) et réseau électrique dans la région de St David's Head. L'emplacement de la ferme hydrolienne de St David's Head proposée précédemment par TEL est également indiqué.	19
Figure 9 - La zone d'analyse examinée. Les zones de concession de Ramsey Sound et de St David's Head sont également représentées.	23
Figure 10 - Densité des navires (en haut) et zones de protection environnementale désignées (en bas) dans la région de Ramsey Sound et sur la côte du Pembrokeshire.	29
Figure 11 - Activité de pêche commerciale (en haut) et classification FOLK5 des sédiments du fond marin (en bas) dans la région de Ramsey Sound et sur la côte du Pembrokeshire.	30
Figure 12 - Hauteur de vague significative extrême (période de retour de 50 ans) dans la région de Ramsey Sound et sur la côte du Pembrokeshire.	31
Figure 13 - Distance du rivage (contours) et distance de la sous-station 33kV (couleurs) (en haut) et pente du fond marin (en bas) dans la région de Ramsey Sound.	32
Figure 14 - Courant maximal de printemps (en haut) et bathymétrie (en bas) dans la région de Ramsey Sound.	35
Figure 15 - Contraintes dures et zones d'exclusion dans la région de Ramsey Sound et sur la côte du Pembrokeshire.	36
Figure 16 - Zones de déploiement viables pour les quatre technologies de référence.	39
Figure 17 - Positions hypothétiques des turbines et taille des exploitations considérées pour l'analyse technico-économique du site.	42
Figure 18 - Ventilation des LCOE pour le scénario de base. Il convient de noter que ces chiffres sont exprimés en termes de 2012 afin de correspondre à l'année de référence pour les prix d'exercice.	45
Figure 19 - Prix d'exercice du CfD nécessaire pour atteindre différents TRI de projets	46
Figure 20 - Trajectoire LCOE pour le projet Ramsey Sound de 40 turbines. Il convient de noter que ces données sont exprimées en termes de 2012 afin de correspondre à l'année de référence pour les prix de la grève.	47
Figure 21 - Prix d'exercice du CfD au fil du temps pour le scénario de base afin d'atteindre un TRI de 5 à 15 %. La ligne orange montre le prix d'exercice pour ce que nous considérons comme un niveau de TRI approprié (indiqué sur l'axe secondaire).	48
Figure 22 - Zones prometteuses en dehors de Ramsey Sound, telles qu'identifiées par l'analyse SIG. Les classes de dispositifs se réfèrent aux quatre dispositifs de référence décrits dans le tableau 4 (les zones viables pour chacun d'entre eux sont indiquées dans la figure 16).	51

Liste des tableaux

Tableau 1 - Parcs éoliens offshore gallois.....	10
Tableau 2 - Les deux sites développés par TEL. Le COSW a repris le site de Ramsey Sound en 2019.....	16
Tableau 3 - Le DeltaStream TEL prévu pour le Ramsey Sound.	21
Tableau 4 - Les quatre classes de dispositifs prises en compte pour l'analyse.	24
Tableau 5 - Rendement énergétique calculé pour les quatre densités d'exploitation.....	42
Tableau 6 - Hypothèses relatives aux appareils et aux exploitations agricoles utilisées pour l'analyse technico-économique.	43
Tableau 7 - Hypothèses commerciales et financières utilisées pour l'analyse technico-économique.	44

Acronymes

Acronyme	Description
AR4	Quatrième tour d'allocation
COSW	Cambrian Offshore South West Ltd.
FEDER	Fonds européen de développement régional
FCE	France (Manche) Angleterre
JS	Secrétariat conjoint
JV	Entreprise commune
MEC	Conseil de l'énergie marine
MEW	Énergie marine au Pays de Galles
MHWS	Sources des hautes eaux moyennes
OREC	Catapulte pour les énergies renouvelables en mer
PSG	Groupe de pilotages du projet
SAC	Zone spéciale de conservation
SAG	Groupe de pilotages des parties prenantes
SPA	Zones protégées spéciales
SSSI	Site d'intérêt scientifique particulier
TIGRE	Projet de dynamisation de l'industrie hydrolienne
TEL	Tidal Energy Ltd.
TSE	Énergie hydrolienne
WADZ	Zone de démonstration de West Anglesey

Résumé

Ramsey Sound est un site prometteur pour l'énergie hydrolienne, situé au large de la côte du sud-ouest du pays de Galles, entre l'île de Ramsey et le continent. Dans le détroit, il existe un bail de projet appartenant au développeur de projet Cambrian Offshore South West Ltd (COSW). Il s'agit de régénérer un dispositif testé sur le site et abandonné sur le fond marin, et d'adapter ou de déployer une nouvelle turbine. Le projet TIGER (Tidal Stream Industry Energiser), financé par Interreg à hauteur de 45,3 millions d'euros, soutient le développement de six sites dans la région de la Manche, entre le Royaume-Uni et la France.

L'objectif de ce rapport est d'évaluer le potentiel du site de Ramsey Sound pour un réseau commercial de TSE. Le rapport s'adresse aux développeurs de projets potentiels, aux investisseurs, aux décideurs politiques et aux fournisseurs qui bénéficieraient d'une évaluation holistique et tierce mise à jour. Notre étude comprend les aspects suivants :

- *Une analyse documentaire* : inclus des descriptions de l'histoire du site, des principales parties prenantes, du soutien et des programmes régionaux et des conditions d'écoulement.
- *Une analyse SIG* : pour évaluer la taille de la ferme commerciale qui pourrait être construite, identifier les impacts potentiels sur les autres usagers de la mer et montrer les obstacles potentiels et les aspects géographiques à considérer.
- *Une analyse technico-économique* : pour estimer le coût de l'énergie nivelé (LCOE) qu'une ferme représentative sur le site pourrait atteindre et le prix d'exercice du CfD nécessaire pour encourager le développement du projet et l'investissement privé. Nous avons envisagé des scénarios industriels optimistes et pessimistes, et appliqué des taux d'apprentissage afin de mieux comprendre la trajectoire du LCOE et du prix d'exercice du CfD approprié au fil du temps.

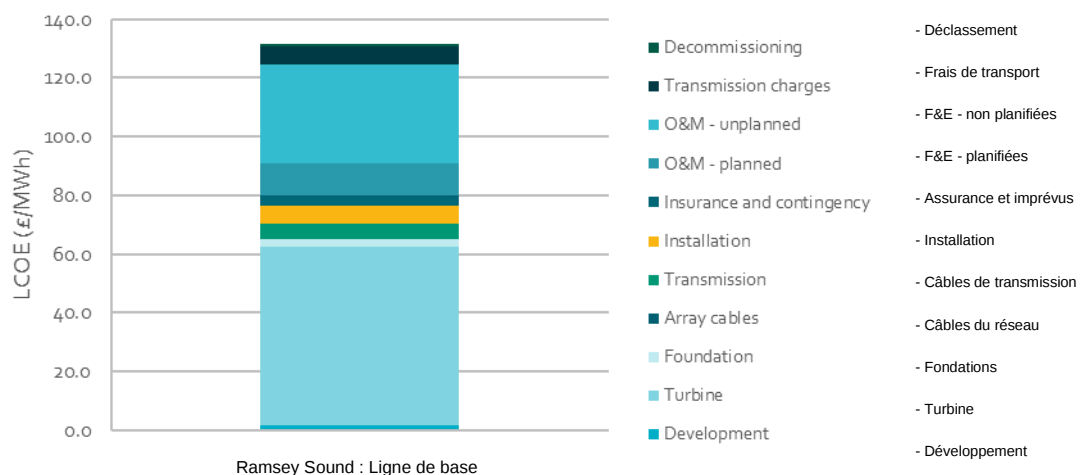
Notre analyse nous permet d'apporter les précisions suivantes sur le site :

- Ramsey Sound est un endroit isolé où les obstacles au développement sont peu nombreux. Il ne semble pas y avoir de conflits significatifs avec d'autres utilisateurs de la mer. Ainsi, le détroit et la zone environnante ont uniquement peu ou manquent d'activités de pêche ou de navigation commerciale notables. L'exception à cette règle pourrait être les désignations environnementales. Alors, l'ensemble du littoral se trouve dans une zone spéciale de conservation (ZSC) et que l'île de Ramsey est un site d'intérêt scientifique spécial (SSSI). Il conviendrait d'approfondir cette question pour un réseau plus important de plus de 10 MW.
- Les vitesses d'écoulement sont correctes, la modélisation de l'écoulement des marées à l'aide du solveur d'écoulement côtier THETIS indiquant des courants de marée printaniers maximums dépassant 5 m/s. La zone est connue pour sa bathymétrie irrégulière, ce qui entraîne un flux turbulent et irrégulier qui peut rendre le site moins souhaitable pour certains types de technologies.
- En dehors du Ramsey Sound lui-même, il existe des endroits qui pourraient convenir à des dispositifs fixes et flottants, simultanément à petite échelle et à l'échelle des services publics. Ces sites méritent d'être étudiés de manière plus approfondie comme sites de la prochaine génération, en mettant l'accent sur les dispositifs conçus pour des conditions de faible débit. L'analyse GIS a indiqué une zone de 0,6 km² dans la zone de concession de COSW convenant à une technologie à petite échelle. L'analyse

effectuée par l'Université de Plymouth à l'aide de THETIS suggère qu'une ferme de 40 appareils de 0,5 MW (diamètre de rotor de 15 m) aurait un facteur de capacité brut de 36 %. Nous avons utilisé ce cas représentatif comme base pour l'évaluation technico-économique.

- D'ici à 2030, notre modèle indique qu'une ferme de 20 MW (40 turbines de 0,5 MW) pourrait être déployée à un LCOE de 85 à 195 £/MWh, avec une estimation centrale de 131 £/MWh (comme indiqué ci-dessous). Avec cette estimation centrale, nous pensons que £191/MWh serait un niveau suffisant pour un CfD. Cela garantirait un TRI du projet de 7,5 % (sans effet de levier, en supposant 100 % de capitaux propres) et offrirait donc une perspective raisonnable pour les flux de financement privés.
- Notre étude porte sur un exemple de ferme hypothétique. Il existe de nombreuses options de projet qui pourraient débloquent des niveaux plus importants de réduction des coûts, ramenant le LCOE à l'estimation inférieure de 85 £/MWh. Ces options pourraient inclure des économies d'échelle plus cruciales grâce à des fermes plus grandes, une optimisation technico-économique du diamètre du rotor et de la puissance nominale de la turbine, ainsi qu'une meilleure stratégie d'exploitation et de maintenance, entre autres.

En résumé, notre étude montre que Ramsey Sound est un site qui présente un potentiel intéressant pour un réseau commercial précoce et qui pourrait fournir d'importantes quantités d'énergie prévisibles au réseau du Pembrokeshire. Le succès du site pourrait dépendre de la trajectoire des coûts des petites turbines de moins de 1 MW. Les perspectives commerciales de ce site s'amélioreront une fois que le TSE sera déployé à plus grande échelle. Il sera aussi probablement un site d'intérêt d'ici à 2030, à mesure que d'autres sites commerciaux seront développés et que des leçons seront tirées.



Ventilation des LCOE pour le scénario de base. Il convient de noter que ces chiffres sont exprimés en £ de 2012 afin de correspondre à l'année de référence pour les prix d'exercice.



Le continent gallois depuis le détroit de Ramsey [1].

1 Introduction

L'énergie hydrolienne (TSE) gagne du terrain auprès des décideurs politiques. Au Royaume-Uni, même si le soutien politique a été historiquement réduit, l'industrie prévoit d'allouer une enveloppe annuelle de 20 millions de livres sterling dans le cadre du cycle 4 de l'allocation des contrats pour différence (CfD) à la fin de l'année 2021. En France, plusieurs projets sont en cours de développement, les réseaux du Raz Blanchard négociant des accords d'achat d'électricité (AAE) avec le régulateur.

La technologie de TSE présente des avantages uniques qui la rendent apte à jouer un rôle dans notre futur système énergétique. Il s'agit notamment de la prévisibilité extrêmement élevée de la ressource, d'une chaîne d'approvisionnement nationale qualifiée avec un contenu local élevé dans les premiers projets et d'une densité énergétique élevée prévue pour les exploitations agricoles. À la lumière des récents événements géopolitiques (conflit entre la Russie et l'Ukraine) et des prix élevés de l'énergie, TSE propose un profil de production cyclique fiable et régulier qui peut renforcer la sécurité énergétique.

Ramsey Sound est une étendue d'eau située entre l'île de Ramsey et le continent gallois. La région suscite depuis longtemps l'intérêt d'un projet de démonstration du TSE, avec la possibilité d'un réseau commercial précoce.

Le site présente de nombreux avantages qui en font un candidat idéal pour un tel projet. Il est bien abrité et se trouve à proximité du réseau électrique et de Pembroke Dock. En outre, le développement antérieur du site par Tidal Energy Limited (TEL) signifie qu'il y a une bonne compréhension du site, avec des permis déjà en place pour une turbine d'une puissance maximale de 1,2 MW. Ce bail comprend un accord de rachat à un niveau de cinq ROC, une subvention généreuse qui constituerait une source de revenus pour un promoteur du projet.

Cambrian Offshore est le propriétaire du site. Dans le cadre des activités du projet TIGER, ils prévoient de régénérer un dispositif existant déployé sur le site en 2015 (le TEL Deltastream) et de déployer une nouvelle technologie. En dehors de la concession de 1,4 MW, il existe un potentiel pour d'autres EST dans la région. St-David's Head, au nord, est considéré comme une zone prometteuse, mais n'a pas fait l'objet d'autant de recherches que Ramsey Sound.

Ce rapport sur le site décrit la région du Pembrokeshire au sens large, englobant simultanément Ramsey Sound et St-David's Head, et évalue la capacité future du TSE qui pourrait être déployée.

1.1 Cambrian Offshore South West Ltd.

Cambrian Offshore South West Ltd (COSW) a été fondée en 2018. COSW a acquis les actifs de Ramsey Sound de TEL en 2019. L'objectif initial de la société est de réaffecter le site de Ramsey Sound via le projet de régénération de Ramsey Sound, grâce à autant que possible l'infrastructure existante, en assumant le rôle de développeur de projet.

L'équipe de COSW a plus de 30 ans d'expérience dans le domaine de l'énergie marine et a occupé des postes de direction dans un certain nombre d'entreprises de premier plan. Les responsables de COSW dirigent également le Conseil britannique de l'énergie marine (MEC). Il s'agit d'une organisation composée de représentants des principales entreprises britanniques spécialisées dans l'énergie houlomotrice et le TSE, dont l'objectif est de commercialiser l'industrie et d'encourager la collaboration à l'échelle de l'industrie.

1.2 Activités TIGER

Contrairement à d'autres sites développés dans le cadre de TIGER, Ramsey Sound dispose déjà d'une licence maritime pour une capacité de 1,4 MW. L'objectif de TIGER est d'aider le détenteur de la licence, Cambrian Offshore South West Ltd. (COSW) à déployer la technologie sur ce site.

La première activité consiste à régénérer le TEL Deltastream sur le fond marin. Cette opération fera l'objet d'un examen médico-légal qui fournira des informations précieuses sur l'impact de l'environnement marin sur la structure.

COSW déploiera ensuite un nouveau dispositif sur le site. Il s'agira soit de réaffecter l'actuel Deltastream avec de nouveaux rotors, soit d'acquérir une nouvelle turbine auprès d'un fournisseur établi de technologie TSE (par exemple, Proteus Marine Renewables, Orbital Marine Power, Verdant Power ou Sabella).

Le projet TIGER est une large base de partenaires, y compris les universités, la recherche et l'industrie. Il est dirigé par l'Offshore Renewable Energy Catapult (OREC). En reliant COSW à d'autres partenaires, en particulier les institutions universitaires, le projet permettra un développement plus rapide et plus rentable du site de Ramsey Sound.

L'une des principales ambitions de TIGER est également de renforcer les relations entre les organisations britanniques et françaises. Le rôle influent de COSW au sein du MEC signifie qu'il est bien placé pour diriger cet effort, en développant les connaissances et l'expérience des membres britanniques afin d'accélérer l'industrie française.

2 Historique du site

2.1 Ramsey Sound

Lorsque l'intérêt pour les EST s'est accru dans les années 2000, Ramsey Sound a été identifié par un certain nombre d'études préliminaires comme un lieu prometteur (par exemple [2]).

Historiquement, la majorité des investissements dans le site ont été réalisés par TEL. TEL a été fondée en 2001. Elle a commandé une étude à ABPmer, avant 2008, qui indiquait plusieurs sites de TSE prometteurs à travers le Royaume-Uni [3]. [3]. Le choix s'est finalement porté sur Ramsey Sound en raison d'un certain nombre d'avantages, notamment sa situation

abritée et sa proximité avec le réseau électrique et les installations portuaires. L'emplacement du projet dans le détroit est indiqué dans la Figure 2.

À la même époque, E.ON a également annoncé une collaboration avec Lunar Energy pour développer un projet du TSE dans le Ramsey Sound [4]. Il s'agirait d'un projet de six turbines, d'une puissance de 8 MW, composé de turbines hydroliennes canalisées de Rotech [5]. [5]mais le projet n'a jamais vu le jour et Lunar Energy a finalement été dissoute.

En 2011, TEL a obtenu l'autorisation de tester un prototype de son DeltaStream dans le Ramsey Sound, aux coordonnées 51° 52' 40" N et 05° 19' 34" W.

Le dispositif DeltaStream est illustré à la Figure 3. Le concept consiste en trois rotors de 400 kW, d'un diamètre de 15 m, montés sur un cadre triangulaire et fixés au fond de la mer. Le prototype installé avait un seul rotor de 12 m de diamètre sur un cadre triangulaire plus petit, pour montrer la technologie de l'éolienne et maintenir les coûts à un niveau bas avant de passer à une échelle supérieure.

Le dispositif a été déployé en décembre 2015. L'électricité a été créée avec succès et transférée au réseau, mais après environ un mois de fonctionnement, l'appareil a développé une défaillance dans son système de sonar pour détecter la faune marine et n'a donc pas pu être exploité dans le cadre de sa licence marine [6]. Un autre problème mécanique est survenu avant que la société ne soit mise sous administration en octobre 2016. L'appareil est toujours au fond de la mer et sa récupération est prévue et financée par le projet TIGER.

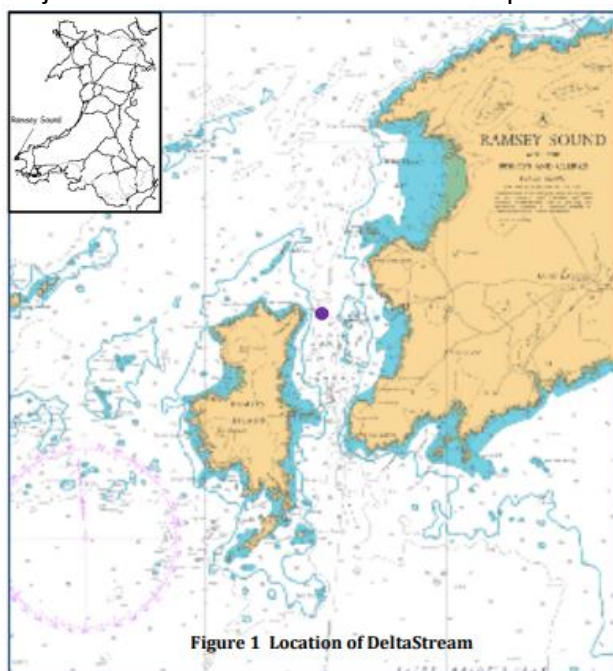


Figure 1 - Emplacement du DeltaStream dans le Ramsey Sound. Tiré de [7].



Figure 2 - Le TEL DeltaStream. À gauche : le dispositif construit et installé à Ramsey Sound. L'image date de 2014 à Pembroke Port. À droite : impression d'artiste d'un ensemble de dispositifs DeltaStream

2.2 St David's Head

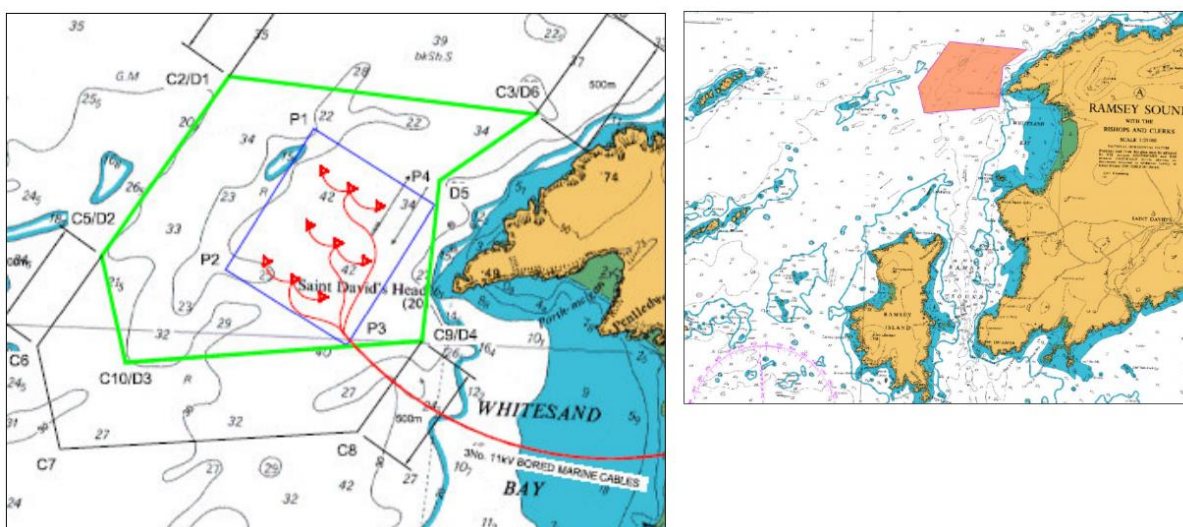


Figure 5 – TEL's proposed 10MW commercial array at St David's Head. Left: Proposed site boundary and turbine locations. Right: Location of the area of search with respect to the Ramsey Sound. Taken from [8].

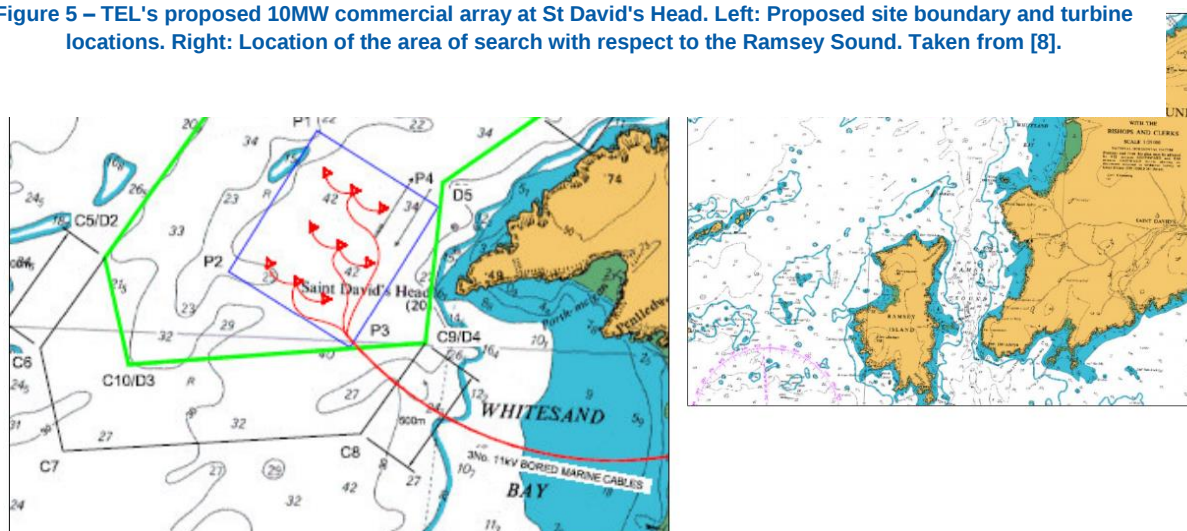


Figure 3 – TEL's proposed 10MW commercial array at St David's Head. Left: Proposed site boundary and turbine locations. Right: Location of the area of search with respect to the Ramsey Sound. Taken from [8].

2.3 St David's Head

En 2012, TEL a obtenu un contrat d'emplacement avec le Crown Estate pour un maximum de 10 MW exploités pendant une période de 25 ans. L'emplacement de ce projet est indiqué dans la Figure 4. Le bail était valable pour cinq ans, jusqu'en 2017, ce qui donnait à TEL le

temps de réaliser les études nécessaires et d'obtenir le permis de construire et les licences marines pour un bail complet.

Le projet prévu était un réseau commercial de neuf appareils, d'une puissance de 1,2 MW chacun [8]. [8]. Il devait constituer la phase suivante du projet après le projet de démonstrateur Ramsey Sound, mais n'a jamais été réussi, TEL ayant été placé sous administration judiciaire. Depuis la disparition de TEL, aucun autre développeur de TSE n'a exprimé publiquement son intérêt pour cette zone, probablement parce que la ressource hydrolienne est relativement faible et que le site est exposé aux vagues.

3 La région

3.1 Pays de Galles

Le Pays de Galles a un fort héritage industriel et a été considéré comme la Première Nation industrielle du monde. L'abondance de charbon, extrait dans les vallées et expédié dans le monde entier, ainsi que d'autres matières premières telles que le minerai de fer, le cuivre et le calcaire, en ont été le fer de lance. En effet, Swansea était autrefois connue sous le nom de "Copperopolis" et était le centre de la production mondiale de cuivre au début des années 1800[9].

L'industrie houillère galloise a connu un déclin lors 20^e siècle, avec des fermetures de mines et une diminution de la main-d'œuvre due à plusieurs facteurs (notamment l'essor de l'industrie nucléaire et du pétrole de la mer du Nord). Cette situation a eu des répercussions sociales importantes, en particulier dans les vallées qui ont connu un exode [10]. L'un des principaux objectifs du gouvernement a été de réduire ces impacts sociaux et de rajeunir les communautés galloises. Parmi les exemples récents concernant les énergies marines renouvelables, on peut citer

- Le Fonds des communautés côtières du gouvernement gallois. L'objectif était de promouvoir une croissance économique durable et des emplois pour les communautés côtières[11].
- Le Small Scale Coastal Infrastructure Scheme (programme d'infrastructures côtières à petite échelle) : Ce programme accorde des subventions allant jusqu'à 100 000 £ aux ports pour les dépenses en capital. [12].

Le Pays de Galles présente un intérêt significatif pour l'énergie marine. Il possède un littoral d'environ 2 700 km (y compris Anglesey et Holy Island), avec d'importantes ressources de TSE dans le nord, principalement au large d'Anglesey, et dans le sud, dans le Pembrokeshire. On estime que 6 GW d'énergie houlomotrice et de TSE pourraient être déployés au large de la côte galloise[13], avec des accords sur les fonds marins en place pour 532 MW [14].

Le gouvernement gallois s'est montré très favorable aux énergies marines renouvelables. Voici quelques exemples de politique et de soutien :

Cadre stratégique pour les énergies marines renouvelables (2011).

Cette étude d'un million de livres sterling a examiné les ressources énergétiques marines dans les eaux territoriales galloises et a étudié différents scénarios sur sa façon de pouvoir être exploitées. [15]. Visant une capacité de déploiement de 4 GW d'ici à 2025, l'étude a révélé que jusqu'à 6,4 GW pourraient être possibles dans le scénario de déploiement élevé. La quantité de dispositions dépendait fortement des contraintes supposées, qui en réalité peuvent être acceptables ou non. L'analyse s'est appuyée en grande partie sur le SIG.

SMARTCymru

Ce programme, dirigé par Business Wales, soutient les entreprises et les organismes de recherche gallois par le biais de financements du FEDER (Fonds européen de développement régional)[16]. [16]. Les fonds sont alloués sous la forme de contrôle innovation, qui peuvent être utilisés pour acheter du matériel ou faire appel à des experts. Ils offrent également des services de faisabilité technique et commerciale.

Parmi les entreprises d'énergie marine qui ont recouru à ce service, citons Bombora Wave Power [17] et Marine Power Systems [18].

Office gallois de financement européen Fonds structurels de l'UE

Le Pays de Galles a reçu 2 milliards de livres de l'Union européenne au titre des Fonds structurels européens pour la période 2014-2020. Sur cette somme, 100 millions de livres ont été alloués aux énergies marines renouvelables. Le Welsh European Funding Office a administré cet argent et l'a utilisé pour divers projets, y compris 14,9 millions de livres à Minesto pour développer son projet Holyhead Deep [19] et 10,3 millions de livres à Bombora pour construire et tester son démonstrateur d'énergie houlomotrice de 1,5 MW.

3.1.1 Projets d'hydroliennes dans le nord du Pays de Galles

Ramsey Sound et St-David's Head ne sont pas les seuls sites de TSE examinés au Pays de Galles. Le nord du pays de Galles, en particulier autour d'Anglesey et de Holy Island, suscite un grand intérêt et des projets commerciaux sont en cours de développement.

Morlais

Morlais est un projet TSE entrepris par Menter Môn, une entreprise sociale du nord du Pays de Galles qui vise à réaliser des projets au profit des communautés locales. L'objectif de Morlais est de développer la zone de démonstration de West Anglesey (WADZ), une étendue d'eau au large de la côte ouest d'Anglesey qui s'est vu attribuer un bail de 45 ans par The Crown Estate en 2014. Il s'agit d'une zone de 35 km² avec une capacité estimée à 240 MW [20].

Le site est conçu pour permettre aux développeurs de tester et de déployer leurs dispositifs à grande échelle. L'un des principaux objectifs du projet est de présenter différents types de dispositifs TSE. Selon les plans actuels, Morlais serait propriétaire de l'infrastructure électrique, qui comprendrait jusqu'à neuf câbles sous-marins. Les développeurs paieraient une redevance annuelle pour le site.

Plusieurs développeurs de technologies se sont engagés dans le projet, notamment HydroQuest, Sabella, Orbital Marine Power, Magallanes Renovables et Verdant Power[21]. [21]. D'autres partenaires industriels sont Black & Veatch et Royal Haskoning.

Une demande d'autorisation a été déposée à l'automne 2019. Lors l'année 2020, plusieurs consultations publiques ont été organisées, et une décision est attendue pour 2021. Plusieurs promoteurs souhaitent faire une offre pour des projets hydroliens à Morlais dans le cadre de l'Allocation Round 4 (AR4) du Royaume-Uni.

Holyhead Deep

Holyhead Deep est un projet entrepris par Minesto. Minesto est un développeur suédois de TSE et un partenaire de TIGER, avec une forte présence au Pays de Galles. Il s'agit d'un nouveau cerf-volant à courant de marée conçu pour les applications à faible débit.

En 2014, Minesto s'est vu attribuer un contrat de location par The Crown Estate pour un projet de 10 MW. Ce projet a été suivi d'une licence maritime en 2017 et de l'installation d'un dispositif de 500 kW en 2018, où le dispositif a été testé. L'appareil a été connecté à une

bouée Micro Grid System, plutôt qu'au réseau, pour contrôler et dissiper la production électrique.

L'objectif de Minesto est de déployer une capacité de 80 MW sur le site, avec un échelonnement dans le temps. En raison de la proximité du site avec la WADZ, Minesto collabore avec Morlais pour développer le réseau et l'infrastructure de câblage. [22]. L'entreprise cite également l'engagement du gouvernement gallois en faveur des énergies marines renouvelables comme l'une des principales raisons du choix du site de Holyhead :

« De nombreux sites ont été envisagés au Royaume-Uni, mais le Pays de Galles a été choisi comme option privilégiée en raison des conditions environnementales très favorables et de l'engagement du gouvernement en faveur des énergies marines renouvelables, qui propose des opportunités significatives pour attirer le soutien et l'investissement dans le projet de Holyhead ». [23]

Ynys Enlli (Bardsey Sound)

Ce projet, également situé dans le nord du Pays de Galles, est développé par Nova Innovation. Nova Innovation est un développeur de technologie écossais spécialisé dans les dispositifs à petite échelle. Le Shetland Array a été le premier réseau TSE au monde, avec trois turbines de 100 kW installées en 2016. Une quatrième turbine a été ajoutée fin 2020, et deux autres seront installées en 2021/22.

Le projet Enrii doit être installé dans le Swnt Enlli, ou Bardsey Sound. Le projet sera d'une puissance maximale de 1 MW, et Nova obtient les autorisations nécessaires.

L'éolien en mer

Le pays de Galles compte trois parcs éoliens opérationnels, tous situés dans les eaux du nord : North Hoyle, Rhyl Flats et Gwynt y Môr. Awel y Môr, une extension de Gwynt y Môr, est aussi en cours de développement. Les propriétés de ces sites sont indiquées dans le Tableau 1. Tous les parcs éoliens sont exploités par RWE Renewables.

Tableau 1 - Parcs éoliens offshore gallois

Nom	Développeur	Date de mise en service	Taille de l'exploitation (MW)	Taille de la turbine (MW)	Type de fondation
North Hoyle	RWE npower	2003	60	2	Monopile
Plats de Rhyl	RWE npower	2009	90	3.6	Monopile
Gwynt y Môr	RWE npower	2015	576	3.6	Monopile
Mona	BP & ENBW	2028 (estimation)	Environ 1500	A CONFIRMER	TBC (probablement monopile)
Awel y Môr	RWE Énergies renouvelables	2030 (estimation)	A confirmer (probablement 300 - 1100)	A CONFIRMER	A CONFIRMER

Tous les parcs éoliens touchent terre près de la ville de Rhyl, dans le Denbighshire. Le port de Mostyn a été utilisé pour la construction et est utilisé pour les bases d'exploitation et d'entretien des parcs éoliens.

3.2 Pembrokeshire

Le Pembrokeshire est un comté du sud-ouest du Pays de Galles, où se trouve le site de Ramsey Sound. La population est d'environ 125 000 habitants, dont une proportion plus importante que la moyenne britannique travaille dans l'hébergement et la restauration (2 fois la moyenne britannique), la construction (1,5 fois) et l'industrie extractive (2,2 fois)[24] [24]. Les deux plus grandes agglomérations de la région sont Haverfordwest (population d'approximativement 15 000 habitants) et Milford Haven (population d'environ 14 000 habitants) [24].

En 2020, le Pembrokeshire avait le taux de chômage le plus élevé de tout le Pays de Galles, avec 6,4 % [25]. [25]. Si le taux de croissance de la population a été le plus élevé dans le sud-ouest du pays de Galles de 2008 à 2018, on observe une tendance générale à l'émigration des jeunes. Il en résulte un vieillissement démographique de la population [24].

Une étude pour le Conseil du comté de Pembrokeshire en 2015 [24] a identifié les énergies renouvelables, et plus particulièrement l'énergie marine, comme une opportunité importante pour la région. Elle mentionnait notamment les puissantes synergies avec les ports de Milford Haven et de Pembroke. Ces synergies sont décrites dans la section 3.2.2.

Un secteur des énergies renouvelables en mer florissant pourrait apporter prospérité et migration à la région, contribuant ainsi à inverser certaines des tendances observées.

La centrale électrique de Pembroke, d'une capacité de 2,2 GW, est exploitée par RWE. Historiquement, le Pembrokeshire est un exportateur net vers le réseau [26]. [26]et la capacité et l'infrastructure du réseau sont très bonnes, en particulier autour de Pembroke.

3.2.1 Énergie marine

Énergie marine au Pays de Galles et META

Le Pembrokeshire Coastal Forum a fondé Marine Energy Wales (MEW) en 2016, bien que ses origines soient plus anciennes, puisqu'il était auparavant connu sous le nom de Marine Energy Pembrokeshire, avec un objectif de faire progresser le secteur de l'énergie marine au Pays de Galles en rassemblant les développeurs de technologies, la chaîne d'approvisionnement, le secteur public et le monde universitaire.

La MEW joue un rôle important dans la promotion de l'énergie marine au Pays de Galles, notamment en communiquant avec le gouvernement.

L'un des principaux projets du MEW est la zone d'essai de l'énergie marine (META). Ce projet établit des zones nationales d'essai de l'énergie marine autour de la voie navigable de Milford Haven. Huit sites ont été identifiés et ont fait l'objet d'un consentement préalable, proposant une capacité d'essai pour les modèles à petite échelle/échelle des dispositifs TSE et houlomoteurs.

Cinq sites d'essai de la première phase sont situés à proximité des quais de Pembroke Dock et conviennent aux dispositifs à micro-échelle et aux modèles réduits. Trois sites de la seconde phase ont obtenu des licences marines en janvier 2021 [27]et proposent des installations d'essai en eau libre pour les modèles à plus grande échelle et les petits dispositifs à l'échelle commerciale (profondeur de l'eau d'environ 8 à 30 m).

META a reçu l'assistance du Centre européen de l'énergie marine (EMEC), avec un accord signé en mai 2020 [28]. [28]. Cet accord s'appuie sur des collaborations antérieures entre

les deux organisations. Plus récemment, META a travaillé avec l'Université de Bangor pour caractériser la ressource hydrolienne sur leurs sites d'essai, avec des données ADCP collectées [29].

Zone de développement du Pembrokeshire

La zone de développement du Pembrokeshire (PDZ) est une zone de démonstration de 90 km² au sud du Pembrokeshire, à environ 13-20 km des côtes [30]. Un bail pour le site a été initialement convenu avec The Crown Estate en 2017. Alors que l'ambition initiale était d'utiliser le site comme site de démonstration commerciale de l'énergie houlomotrice, l'accent a été mis sur l'éolien flottant durant dernières années.

Wave Hub a estimé que le site pourrait accueillir jusqu'à trois réseaux de 30 MW et un projet éolien flottant de 90 MW. La ligne de transmission de 400 kV à Pembroke est un avantage vanté de la PDZ, et c'est probablement là que se ferait la connexion au réseau.

Vent flottant

Dans la mer Celtique, un certain nombre de projets de démonstrateurs d'éoliennes flottantes sont en cours de développement, dans le but d'obtenir des CfD dans le cycle d'allocation 4 (AR4). Le Celtic Sea Cluster a été lancé en 2021 et est une collaboration entre le gouvernement gallois, le Cornwall & Isles of Scilly Local Enterprise Partnership, Celtic Sea Power, OREC et MEW. L'objectif est de stimuler la création d'un marché de l'éolien flottant dans la mer Celtique en développant des chaînes d'approvisionnement et une stratégie régionale.

Les premiers projets d'éoliennes flottantes en cours de développement à proximité du Pembrokeshire sont les suivants :

- Le parc éolien flottant Erebus est développé par Blue Gem Wind, une entreprise commune de TotalEnergies et Simply Blue Energy, basée à Pembroke Dock. D'une puissance maximale de 96 MW, il sera composé de 7 à 10 turbines fixées sur la plateforme flottante WindFloat Principle Power. Le projet devrait être mis en service d'ici à 2027.
- Valorous est un projet éolien flottant plus important, d'une puissance de 300 MW, également développé par Blue Gem Wind. Il se composera de 18 à 31 turbines, selon la taille choisie, et sera mis en service en 2028-2029.
- Floventis Energy, une JV entre SBM Offshore et Cierco, prévoit deux projets de 100 MW sur la côte galloise au sud de Pembrokeshire : Llŷr 1 et Llŷr 2. Ces projets serviront à tester différentes technologies flottantes.

3.2.2 Installations portuaires

Port de Milford Haven

Le Pembrokeshire abrite le port de Milford Haven (PoMH), situé sur la voie navigable de Milford Haven. Il s'agit d'un port naturel en eau profonde, la voie navigable étant un exemple d'estuaire de ria (ou "vallée fluviale noyée").

Le port possède un riche patrimoine dans le domaine de l'énergie. C'est le plus grand port énergétique du Royaume-Uni, sa profondeur lui permettant d'accueillir de grands navires de 22 mètres de tirant d'eau. Les pétroliers livrent le pétrole et le gaz, distribués dans le reste du Royaume-Uni par des pipelines. Il est capable de traiter jusqu'à 30 % de la demande en gaz du Royaume-Uni[31].

Le déclin de l'activité pétrolière et gazière entraîne un intérêt croissant pour le port comme plaque tournante de l'énergie renouvelable. [32]. Les eaux profondes sont propices à l'assemblage de fondations flottantes, et le port dispose d'une sous-station de 400 kVA. Une étude commandée par le port en 2011 a révélé que la voie navigable soutient plus de 4 000 emplois dans le Pembrokeshire (et 5 000 au Pays de Galles), dont 30 % dans le raffinage du pétrole, le traitement du gaz et la production d'électricité [33].

Le PoMH possède également le port de Pembroke, de l'autre côté de l'estuaire de Cleddau. Comme mentionné dans la section 3.1 MEW développe actuellement des sites d'essai à petite échelle pour les vagues et les marées au large du quai du port de Pembroke. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du programme marin de Pembroke Dock, d'une valeur de 60 millions de livres sterling, résumé dans la Figure 5. Ce programme comprend aussi de nouvelles zones de fabrication, une plus grande cale de halage, des bâtiments d'assemblage et de maintenance [34] et la mise en place du Marine Energy Engineering Centre of Excellence (MEECE) par l'Offshore Renewable Energy Catapult. Une demande de planification pour certains de ces travaux a été soumise en décembre 2020 [35]. S'il est probable que ces installations seront utilisées en priorité pour les projets d'éoliennes flottantes susmentionnés en mer Celtique [36], les projets de TSE dans la région bénéficieront également de ces transformations.

Le port étudie également la possibilité de servir de plaque tournante pour la recherche sur l'hydrogène et l'activité commerciale. Grâce à son expertise dans le domaine du pétrole et du gaz, le port est un candidat de premier plan pour la production et l'injection d'hydrogène vert et bleu dans le réseau britannique. L'énergie renouvelable produite au large des côtes du Pembrokeshire pourrait être convertie en hydrogène dans le port. Il s'agit d'une application particulièrement intéressante pour l'énergie éolienne offshore, qui permet d'utiliser l'énergie excédentaire au lieu de la réduire.

Le projet MK:EK (Milford Haven Energy Kingdom), d'une durée de deux ans et d'un montant de 4,5 millions de livres sterling, étudie cette possibilité [37]. [37]. Un électrolyseur d'hydrogène est en cours de construction sur les quais. Le système énergétique local est examiné pour déterminer les principales applications et les avantages de l'hydrogène. Une partie du projet consiste à construire deux voitures à hydrogène qui seront utilisées comme véhicules de flotte dans la région.

MEECE - 11 millions de livres sterling Soutenir les PME galloises en offrant : - Études de faisabilité gratuites - Démonstration et validation gratuites des technologies - Accès gratuit aux installations et aux compétences de l'université - Alignement étroit avec les META	Infrastructure des docks de Pembroke - 42 millions de livres sterling - Moderniser le port de Pembroke - Création d'un nouvel espace de dépose - Création d'un nouveau Mega-slipway - Focus sur l'éolien flottant
Centre d'essai de l'énergie marine (META) - 2,7 millions de livres sterling - Facilite les essais de composants, de sous-ensembles et d'appareils grâce à des zones d'essai pré-consenties - Réduire les délais, les coûts et les risques et accélérer la croissance du secteur	Zone de démonstration du Pembrokeshire - 5 millions de livres sterling - La plus grande zone de fonds marins autorisée pour l'énergie houlomotrice au monde - Créer une infrastructure offshore pour catalyser les industries de l'éolien offshore flottant et de la houle de la mer Celtique.

Figure 6 - Résumé des quatre projets composant le programme Pembroke Dock Marine, d'une valeur de 60 millions de livres sterling.

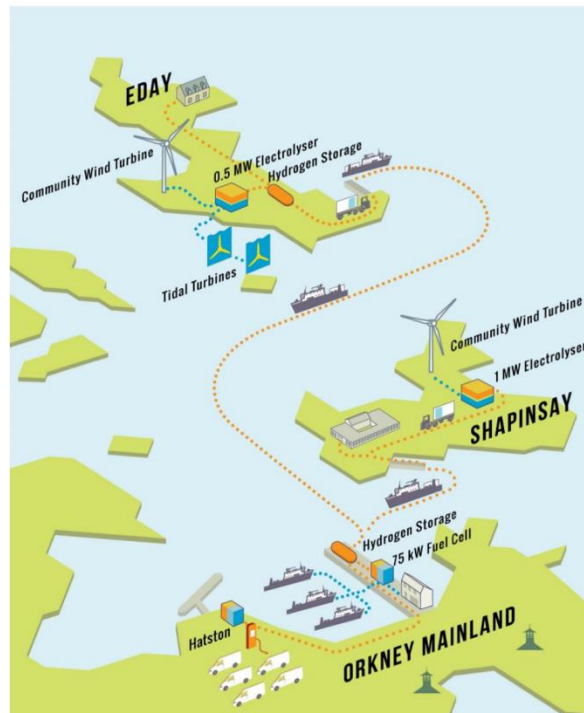


Figure 7 - L'économie de l'hydrogène dans les Orcades.
Image créée par EMEC [39].

La production d'hydrogène est également mise en œuvre et examinée dans l'industrie des EST au sens large, proposant une option efficace pour le stockage à long terme. Un exemple récent est celui d'EMEC, où une usine d'hydrogène composée d'un électrolyseur de 500 kW a été installée en 2016. EMEC a ensuite produit le premier hydrogène au monde grâce à l'énergie hydrolienne en 2017[38] [38]. En 2019, il y avait neuf projets d'hydrogène sur les Orcades, d'une valeur de 63 millions de livres sterling. [39].

Un projet commercial de TSE dans le Pembrokeshire pourrait proposer des avantages similaires, l'hydrogène étant produit et exporté vers Milford Haven pour y être raffiné.

Autres ports

Le port de Fishguard se trouve au nord du Pembrokeshire, à l'est de St-David's Head. Il est exploité par Stena Line Ports Ltd, qui propose un service de ferry vers Rosslare, en République d'Irlande. Le port a connu une baisse de la demande en raison des impacts combinés du Brexit et de Covid-19 [40], ce qui pourrait constituer une opportunité pour les énergies marines renouvelables. Bien qu'il ait été identifié comme un port d'intérêt pour l'éolien offshore, pouvant servir de base d'exploitation et de maintenance (O & M), il n'a pas été identifié comme un port d'intérêt pour l'éolien offshore. [32] Stena Line n'en a pas fait la promotion publique. L'emplacement et le statut de Milford Haven comme port énergétique de premier plan et plaque tournante de l'activité liée aux énergies renouvelables en font l'option préférentielle.

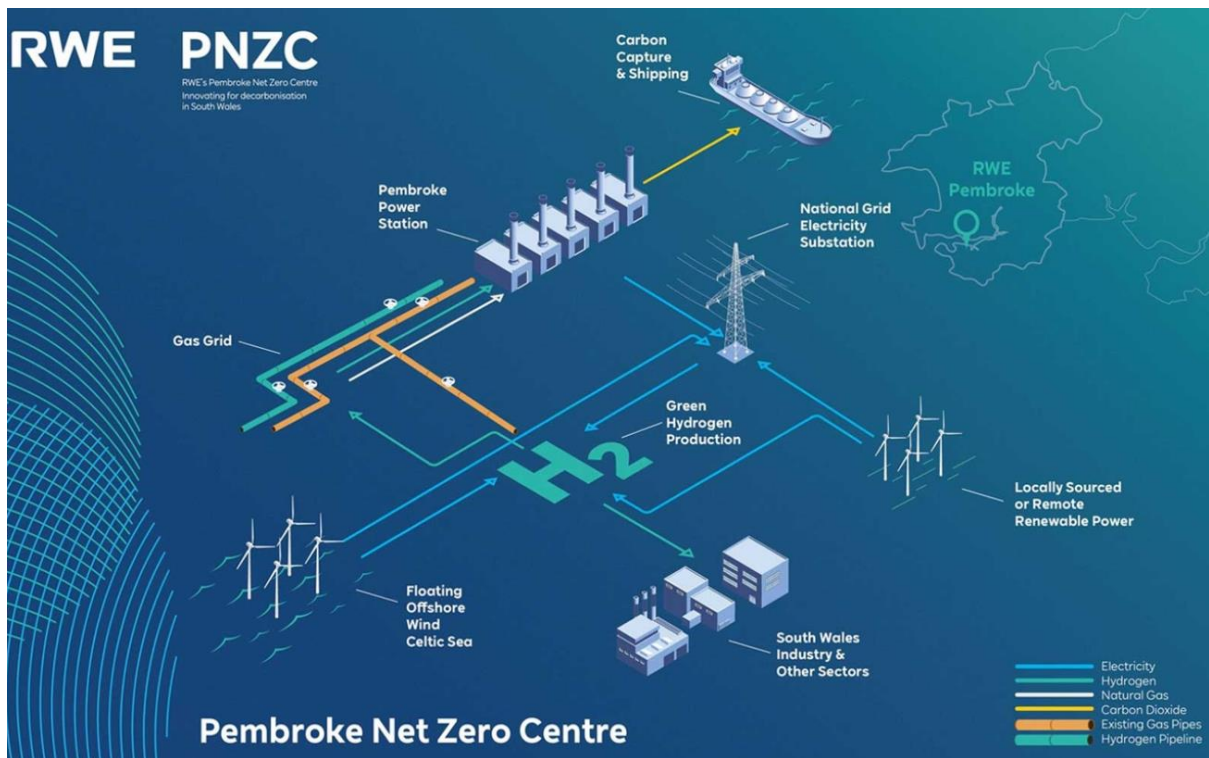


Figure 8 - Les éléments qui composent le RWE Net Zero Centre. Tiré de [41].

Plusieurs petits ports se trouvent à proximité. Justinian's et le port de Porthclais, utilisé pour des activités de loisirs comme le canoë-kayak. Ces sites sont probablement trop petits et trop éloignés pour servir de base d'exploitation et d'entretien pour les dispositifs de TSE à l'échelle du MW prévus dans la région.

Autres projets

En mai 2021, RWE a annoncé la création d'un centre de décarbonisation à Pembroke : le Net Zéro Centre [41]. Ce centre relierait la centrale électrique de RWE à Pembroke et l'éolien offshore flottant au réseau de gaz par le biais de la production d'hydrogène vert. Le projet examinera comment la production d'hydrogène et le captage et le stockage du carbone (CSC) peuvent être intégrés dans la centrale électrique existante.

Le Pembrokeshire est également l'emplacement du projet d'interconnexion Greenlink. Ce câble CCHT de 190 km irait de la centrale électrique de Pembroke au pays de Wexford, en République d'Irlande. Il aurait une capacité de 500 MW et sa mise en service est prévue pour 2023.

4 Caractéristiques du site

Le tableau 2 présente les principales caractéristiques des deux sites du Pembrokeshire situés à proximité de Ramsey Sound. Les deux sites, tels qu'ils ont été planifiés, sont assez petits. Comme nous l'avons mentionné, l'ambition de TEL était d'utiliser Ramsey Sound comme site de démonstration et St-David's Head comme premier projet à l'échelle commerciale.

Tableau 2 - Les deux sites développés par TEL. COSW a repris le site de Ramsey Sound en 2019.

Nom du site	Ramsey Sound	Tête de St David
Propriétaire	COSW	Aucun
Ancien propriétaire	TEL	TEL
Capacité prévue (MW)	1.2	10 [8]
Statut	Consentie	Bail anciennement accordé, expiré en 2017. Actuellement en sommeil
Mécanisme de soutien	5 ROC	Aucun
Superficie du site (km) ²	0.5	1.6 [8]
Vitesse d'écoulement maximale de la marée de printemps (m/s)	3.23 (à 23,3 m au-dessus du fond marin) [26]	~3 [42]
Profondeur d'eau typique (m)	31-44 [43]. Profondeur moyenne de 32 m à la turbine [26]	30-42 [8]
Ports potentiels	Fishguard (~35km OF) ¹	Fishguard (~30km ¹)
	Milford Haven (~45km ¹)	Milford Haven (~50km ¹)
Atterrissage du câble	St Justinians (~1.2 km [44])	Baie de Whitesands (~2.2km [8])

4.1 Ramsey Sound

4.1.1 Environnement

Ramsey Sound

Le Ramsey Sound se situe entre le continent et l'île de Ramsey à l'ouest. Le plan d'eau mesure environ 3 km de long, avec une largeur variant de 500 à 1,6 km [45]. La zone s'étend sur approximativement 3 km². La partie sud du détroit présente des caractéristiques bathymétriques notables qui influencent le flux des marées et rendent l'extraction d'énergie plus difficile pour les dispositifs fixés au fond de l'eau [46]. Il s'agit notamment de :

- Une tranchée profonde de plus de 75 m de profondeur.
- Le pinacle de Horse Rock qui est parfois visible au-dessus de la surface de l'eau à marée basse.

¹ Estimation à l'aide d'une analyse SIG

- Un récif de piquage de surface, connu sous le nom de "The Bitches".

Le nord du son, en revanche, est assez uniforme. Cela a été un facteur décisif pour TEL dans le choix de l'emplacement de son projet dans la région.

Les études initiales de TEL ont noté que les phoques gris et les marsouins sont les mammifères marins les plus fréquemment observés dans la région [7]. Les oiseaux plongeurs, tels que les fous de Bassan, les petits pingouins et les puffins, qui ne sont généralement pas observés, ne pourraient pas être en danger, car leur technologie est sous-marine. Le Ramsey Sound est considéré comme ayant une valeur de conservation faible à modérée concernant l'écologie des poissons et ne semble pas être une zone de frai ou de nurserie. Un puffin a été observé sur une période de neuf mois.

Le site se trouve en dehors de toute route maritime [26]. Il est en grande partie inaccessible en raison des flux de marée élevés, les principaux navires étant les bateaux de plaisance, les canoës et les excursions en bateau vers l'île de Ramsey.

Île de Ramsey

L'île de Ramsey a une superficie de 2,6 km² et appartient à la RSPB. [47]. L'île est connue sous le nom de Ynys Dewi ou St-David's Island. [1].

Faisant partie du parc national de la côte du Pembrokeshire, l'île est une réserve naturelle qui bénéficie de plusieurs désignations de protection. Il s'agit notamment de son statut de site d'intérêt scientifique spécial (SSSI), de zone de protection spéciale (SPA) et de zone marine de conservation (MSAC). Elle abrite des espèces d'oiseaux comme le puffin de Manx et le pétrel tempête européen, dont le nombre a augmenté durant 20 dernières années suite à une extermination coordonnée des rats sur l'île [47].

L'île peut être visitée en bateau à partir de St-David's. Elle est généralement occupée par deux personnes, mais elle est essentiellement inhabitée. Par conséquent, toute l'électricité produite par les projets d'énergie renouvelable à Ramsey Sound a tout intérêt à être exportée vers le réseau du continent plutôt que vers l'île.

La zone est considérée comme une région d'une beauté naturelle exemplaire. Pour cette raison, la zone est particulièrement sensible aux activités de construction qui auraient un impact négatif sur l'environnement local.

4.1.2 Régime d'écoulement

La marée de vive-eau maximale dans la direction de l'inondation a été mesurée à 3,4 m/s [45]. Ce n'est pas aussi élevé que certains sites de marée, par exemple Meygen où les marées de vives eaux maximales dépassent régulièrement 4,5 m/s [48] mais dépasse les 2 à 3 m/s généralement considérés comme économiquement viables (par exemple [49]).

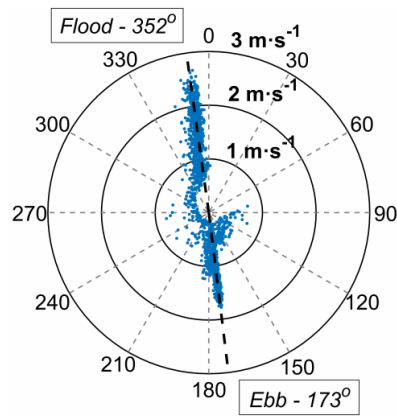


Figure 9 - Profil du courant à l'emplacement de l'éolienne TEL Ramsey Sound. Tiré de [46].

Dans le sud du détroit, l'écoulement est plus turbulent, en raison des caractéristiques bathymétriques mentionnées ci-dessus. Le flux de crue traverse le détroit en direction du nord. Il est plus fort que la marée descendante du sud à cause du rétrécissement de la marée par les **Bitches** et la tranchée susmentionnée. [46]. TEL a déployé un ADCP à l'emplacement de l'éolienne avant qu'elle soit installée. Cela a montré que le débit de crue maximal est de 2,7 m/s contre 1,8 m/s dans la direction du jusant. Ceci est visible dans la Figure 8. Ceci est visible dans la Figure 8.

Cette grande asymétrie dans les marées descendantes et montantes est également notée dans [50]. En prenant les mesures de deux campagnes de mesures ADCP (septembre 2009 et octobre/novembre 2011), les données ont montré de très grandes variations de l'énergie cinétique turbulente dans la direction du jusant (140 % de différence pour deux endroits distants de seulement 50 m). Cela prouve la nécessité d'une implantation prudente dans le son.

La raison en est la bathymétrie irrégulière, qui crée un écoulement assez instable et turbulent. [46]. Cela a également un impact sur le profil de cisaillement vertical, qui n'est pas uniforme d'un bout à l'autre du son [45]. Ces turbulences peuvent entraîner une charge inégale sur les composants de la turbine, par exemple, les pales, ce qui peut réduire la durée de vie des composants mécaniques [50]. Cet aspect doit être considéré dans la conception de l'éolienne et c'est la raison pour laquelle le micro-situationnement dans le son est si important.

The Bitches et Horse Rock constituent des obstacles à l'écoulement, ce qui se traduit par un déficit de vitesse en aval de ces éléments [45]. Le Horse Rock, en particulier, rend l'écoulement plus turbulent dans son voisinage.

4.1.3 Connexion au réseau

Le site est relié au réseau par un câble d'exportation de 1,2 km. Il s'agit d'un câble de 6,6 kV à six conducteurs et double armure (6 conducteurs en cuivre de 6/10(12) kV, 35 mm²) qui relie le dispositif au continent à l'ancienne station de sauvetage de la RNLI. [26]. COSW a indiqué que la capacité du site pourrait être augmentée. Ce câble est accompagné d'un câble en fibre optique monomode à 24 brins, 9/25 microns.

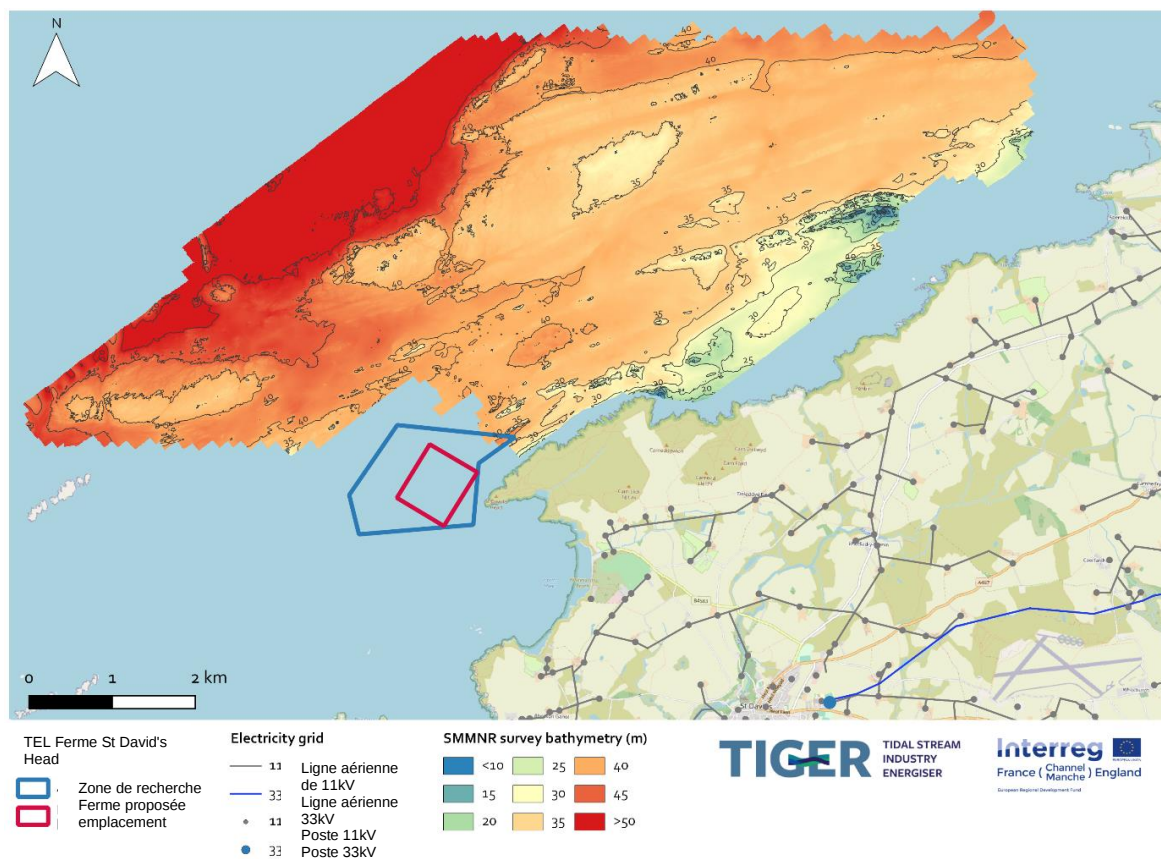


Figure 10 - Données bathymétriques (recueillies dans le cadre du projet SMMNR) et réseau électrique dans la région de St David's Head. L'emplacement de la ferme hydrolienne de St David's Head proposée précédemment

À terre, le câble d'exportation est acheminé vers un complexe électrique clôturé et sécurisé. Celui-ci contient les transformateurs haute tension nécessaire à l'exportation vers le réseau à 11 kV. Il y a également un bureau et un centre de contrôle dans l'enceinte où le dispositif sera surveillé et la production d'énergie vérifiée.

Le réseau électrique comporte aussi des résistances de décharge qui permettent de décharger l'électricité produite en cas de perte de la connexion au réseau. Un disjoncteur G59 est également présent, une exigence pour la production d'électricité, afin de protéger le réseau.

St David's Head

4.1.4 Environnement

St-David's Head est situé au nord de Ramsey Sound. Il se trouve également dans le parc national de la côte du Pembrokeshire et constitue un endroit isolé, réputé pour observer les étoiles en raison de la faible pollution lumineuse.

Comme l'île de Ramsey, St-David's Head fait partie de certaines zones protégées, notamment la Pembrokeshire Marine SAC. Les falaises sont protégées par la zone spéciale de protection des falaises du Pembrokeshire (Pembrokeshire Cliffs SSSI). Malgré ces falaises abruptes, l'atterrissage du câble est possible dans la zone de la baie de Whitesands, comme le prévoyait TEL [8].

En 2019, ABPmer a réalisé des levés bathymétriques multifaisceaux dans la région de St-David's Head, pour le compte du gouvernement gallois. Ceci dans le cadre du deuxième work package du projet Sustainable Management of Marine Natural Resources (SMMNR), visant à collecter des données et des connaissances pour soutenir la planification durable

des projets aquacoles, houlomoteurs et TSE dans les eaux galloises. Ces données, téléchargeables gratuitement, sont présentées dans la [Figure 9](#).

Les données, obtenues à une résolution de 5 m sur une zone de 35 km², indiquent que la bathymétrie est généralement uniforme, avec peu de caractéristiques bathymétriques extrêmes comme pour le détroit de Ramsey. Il y a une grande zone de fond marin au centre de la région entre environ 30 et 40 m, la profondeur augmentant à partir de la côte comme on pouvait s'y attendre.

Les études ont révélé une gamme de conditions de sol inclus du sable, des sédiments mixtes et des récifs rocheux [51]. ABPmer a également effectué des relevés vidéo dans des zones sélectionnées, qui ont révélé des fonds marins très rocheux à l'un ou l'autre endroit de la bande centrale de 30 à 40 mètres. Des récifs biogènes ont été découverts au nord-ouest, et des mammifères marins et des oiseaux ont été observés pendant les études. D'autres sources indiquent que des phoques gris, des marsouins communs et des macareux moines (entre autres espèces) peuvent être observés dans ces eaux [8] [52].

4.1.5 Régime d'écoulement

Il n'y a pas eu autant d'études sur St-David's Head que sur Ramsey Sound. Cela s'explique par le fait que le projet était à un stade de développement antérieur et qu'il n'a pas progressé depuis la liquidation de TEL.

L'amplitude de la marée sur le site a été estimée à 5 m, avec une vitesse de pointe du printemps d'environ 3 m/s [42]. Des ADCP ont été déployés sur le site, par exemple, comme mentionné dans [53].

4.1.6 Connexion au réseau

Le plan de TEL consistait à poser un câble d'exportation dans la baie de Whitesands, avec une longueur de câble d'approximativement 2 km [8]. [8]. Bien qu'il y ait une ligne de 11 kV à proximité de la baie, comme le montre la Figure 9 cette ligne serait insuffisante pour le projet de 10 MW prévu.

Dans [8] TEL a indiqué qu'une enceinte de 20 m x 12 m serait construite pour abriter la sous-station et les transformateurs. Celle-ci serait reliée au réseau de 33 kV de St-David par un câble souterrain installé par Western Power Distribution (WPD). La distance en ligne droite entre la baie de Whitesands et la sous-station de 33 kV de St-David est de 3 km.

5 Options technologiques

Le tableau 3 montre les propriétés du dispositif TEL déployé dans le Ramsey Sound. Dans un premier temps, un rotor de 400 kW a été monté sur le DeltaStream, puis trois rotors ont été montés à l'échelle réelle.

La turbine est équipée d'un système de lacet hydraulique. Un aspect particulièrement novateur de la conception était un rotor capable de surrégime à la puissance nominale afin de réguler la puissance et la charge. Cet aspect diffère d'autres concepts de turbine qui utilisent le contrôle du pas.

Tableau 3 - Le DeltaStream TEL prévu pour le Ramsey Sound.

Propriété	Valeur
Modèle de turbine	DeltaStream
Description	Turbine fixe de fond à axe horizontal
Puissance nominale (MW)	0,4 (0,8 supplémentaire était prévu)
Diamètre du rotor (m)	12 x 1 (2 autres étaient prévus))
Poids à sec (tonnes)	250
Vitesse d'écoulement nominale (m/s)	2,7 (2,25 pour un modèle de 15 m) [42])
Contrôle de la hauteur	Pas fixe
Type de fondation	Base de gravité

Ramsey Sound est bien équipé de vagues, ce qui le rend adapté aux dispositifs flottants. La bathymétrie irrégulière signifie que l'implantation de dispositifs utilisant des fondations à base de gravité pourrait être difficile. Le DeltaStream étant un appareil unique, le problème est moindre, mais le nombre d'appareils utilisant cette fondation pourrait être limité, en particulier si l'on tient compte des effets de sillage.

Il convient de noter que Ramsey Sound et St-David's Head sont peu profonds. Avec des profondeurs d'eau généralement comprises de 30 à 45 m, cela limitera la taille des rotors qui peuvent être déployés. Bien que ce ne soit pas un problème pour les appareils actuels, les futures générations d'appareils devraient avoir des rotors de plus de 30 m pour les plus grands. L'augmentation de la taille des rotors est l'un des principaux facteurs de réduction des coûts pour l'industrie hydrolienne, comme cela a été le cas pour l'éolien en mer [54]. [54], que ces régions pourraient ne pas être en mesure d'exploiter pleinement.

Enfin, le réseau électrique limitera en fin de compte la taille des fermes pouvant être déployées. Ce problème se pose moins pour Ramsey Sound, qui est un site de démonstration. La mise à niveau du réseau pour une ferme de plusieurs MW à St-David's Head serait coûteuse, car les 11 kV de la localité ne sont pas suffisants pour un réseau commercial.

6 Sites d'exploitation viables

Pour cette analyse, nous avons utilisé des ensembles de données SIG et des méthodes d'analyse pour quantifier la surface disponible sur le site TIGER pour une future ferme commerciale. Notre analyse indique également les zones de la région au sens large qui pourraient convenir à de futurs projets. La motivation est de donner un contexte au-delà de TIGER, lorsque des sites futurs sont examinés pour la technologie de la prochaine génération.

6.1 Méthodologie

6.1.1 Sélection de la zone

Pour l'étude SIG, nous avons choisi une zone d'analyse englobant les sites de Ramsey Sound et de St-David's Head. David's Head. Figure 10. La zone a été sélectionnée sur la base du modèle de marée sous-jacent utilisé, s'étendant au-delà des deux sites de marée de renom pour inclure les zones à l'ouest et au sud de l'île de Ramsey. L'étendue ouest comprend les îles Bishops et Clerks, car on pense qu'elles pourraient canaliser certains flux de marée.

Au fur et à mesure que le domaine s'agrandit, pour une résolution donnée, la simulation de la vitesse du flux de marée devient plus complexe sur le plan informatique et prend donc plus de temps à exécuter. Exécuter la zone choisie a pris environ une semaine. Cette durée a été jugée acceptable et pratique dans le contexte de l'étude.

6.1.2 Données sur la vitesse du flux de la marée

Les données sur les flux de marée ont été fournies par l'Université de Plymouth, partenaire du projet TIGER. Les vitesses d'écoulement ont été simulées à l'aide du solveur d'écoulement côtier Thetis (<http://thetisproject.org/>) [55] et le solveur d'équations différentielles partielles par éléments finis Firedrake [56] pour résoudre la forme non

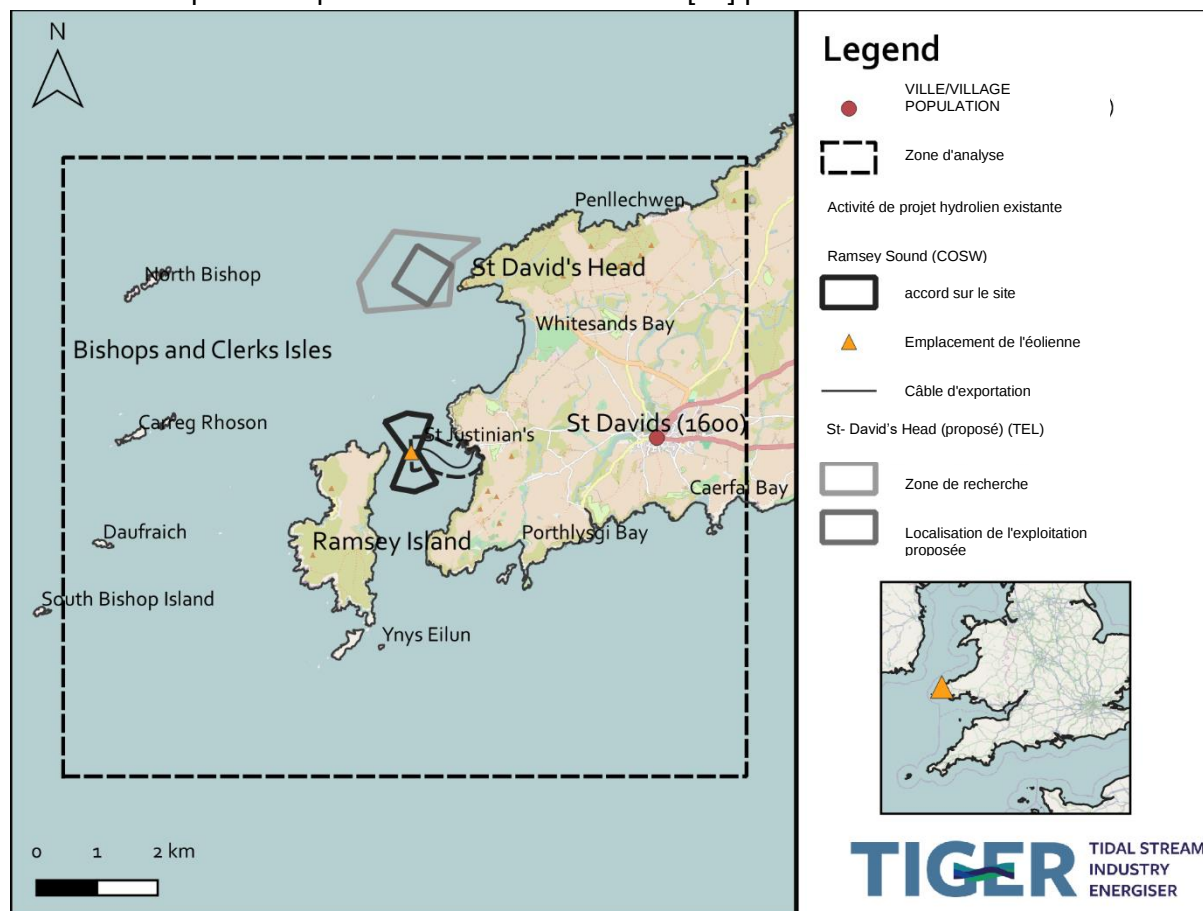


Figure 11 - La zone d'analyse examinée. Les zones de concession de Ramsey Sound et de St David's Head sont également représentées.

conservative des équations des eaux peu profondes.

Le domaine, qui englobe une grande partie de la mer d'Irlande, est discrétisé à l'aide d'un domaine à maillage non structuré généré avec qmesh [57]. La bathymétrie est interpolée en combinant des mesures d'une résolution de 2 m à proximité de Ramsey Sound [58] et des mesures plus grossières ailleurs [59].

Le modèle a été validé par rapport aux données des jauges, ainsi que face aux données ADCP montées sur le lit et sur le bateau. De plus amples informations sur le modèle sont disponibles dans [60]. Le modèle a été exécuté lors d'une marée de vive-eau le 27 avril 2017, pour se rapprocher du pic du cycle nodal lunaire de 18,6 ans le. Les vitesses d'écoulement moyennées en profondeur ont été extraites du modèle à une résolution de 100 m sur la zone souhaitée.

6.1.3 Données des développeurs de technologies

Plusieurs développeurs de technologies ont été contactés afin de comprendre les contraintes de déploiement qui affectent leurs dispositifs spécifiques. Ils ont été interrogés sur leur génération actuelle de technologie ainsi que sur les tendances qu'ils anticipent pour les futures générations d'appareils. Les aspects suivants ont été abordés :

Propriétés de l'appareil

- Cote de l'appareil
- Diamètre du rotor (nominal et minimum/maximum envisagé)
- Vitesse d'écoulement nominale
- Vitesses d'entrée et de sortie
- Espace libre au-dessus et au-dessous du dispositif
- Plage de profondeur d'eau de conception (min et max)

Propriétés agricoles

- Taille de l'exploitation (à une date donnée)
- Conception de l'espacement des turbines
- Densité énergétique approximative de l'exploitation
- Propriétés de la fondation :
- Type de fondation préféré
- Conditions de conception correspondantes (pente du fond marin, type de fond marin, navire d'installation requis)

Propriétés du réseau de transport

- Distance maximale par rapport à la côte (pour éviter des pertes de transmission élevées)
- Appareils par concentrateur sous-marin
- Besoin du réseau (établi sur la taille de l'exploitation, kVA)

Les dispositifs comprenaient des dispositifs fixes de petite taille (<500 kW) et à grande échelle (2 MW+), ainsi que des dispositifs flottant à grande échelle.

À partir de ces informations, nous avons pu déterminer les types de zones qui conviendraient le mieux à ces catégories de technologies. Nous avons modélisé quatre dispositifs génériques : trois des modèles les plus populaires développés aujourd'hui et une turbine de nouvelle génération à l'échelle de l'entreprise (3 MW). Les propriétés de ces dispositifs sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 - Les quatre classes d'appareils prises en compte pour l'analyse.

Technologie	Générique petite échelle fixe	Générique à l'échelle de l'utilité fixe	Générique à l'échelle de l'utilitaire flottant	Utilitaire générique de prochaine génération fixe
Configuration	Turbine à axe horizontal	Turbine à axe horizontal	Turbine à axe horizontal	Turbine à axe horizontal
Type de fondation	Base/pile de gravité	Base/pile de gravité	Ancrage par gravité/traînée/pile Amarrage caténaire	Base/pile de gravité
Puissance nominale (MW)	0.5	2	2	3

Diamètre nominal du rotor (m)	15	20	20	25
Vitesse maximale requise du courant de ressort (m/s)	>3.5	>3.5	>3.5	>3.5
Profondeur d'eau requise	25-40	35-50	30-80	40-55

La contrainte de vitesse d'écoulement a été choisie pour exclure les zones à faible débit qui seraient moins viables économiquement, laissant uniquement les emplacements les plus prometteurs. La contrainte de profondeur d'eau considère la profondeur minimale pour permettre un dégagement suffisant au-dessus et au-dessous du rotor et une profondeur maximale économiquement viable, car dans la réalité, les développeurs cibleront d'abord les zones les plus économiquement viables.

6.1.4 Contraintes environnementales

Outre les contraintes spécifiques aux appareils décrites ci-dessus, nous avons également exclu d'autres zones où il y aurait des interactions avec les risques marins ou d'autres usagers de la mer. Ces contraintes strictes sont les suivantes

- Zones proches des épaves (<250 m)
- Zones proches des ports (car les appareils peuvent constituer un danger pour la navigation) (<500 m)
- Plateformes pétrolières et gazières, forages et zones d'exploration
- Parcs éoliens en mer et autres énergies marines renouvelables (opérationnels et en développement)
- Sites de dépôt de boue de dragage
- Accords de site pour l'extraction de minéraux et d'agrégats
- Munitions immergées

Nous avons aussi cartographié les contraintes douces. Le développement dans ces zones pourrait être possible, nous ne les avons donc pas supprimées, mais elles nécessiteraient un examen et une évaluation plus détaillés du site. Ces contraintes sont les suivantes

- Trafic maritime
- Activité de pêche
- Zones marines protégées : Sites d'intérêt scientifique particulier (SSSI), zones de protection spéciale (SPA), zones spéciales de conservation (SAC).
- Type de sédiments des fonds marins
- Distance par rapport au rivage
- Distance par rapport au réseau
- Gradient des fonds marins

Certaines d'entre elles, par exemple, la distance au rivage et la grille, ont été calculées à l'aide d'un logiciel SIG. Les principales sources de données sont les suivantes :

- Portail de données de l'Amirauté (données bathymétriques)
- Portail de données du Crown Estate (zones de parcs éoliens)
- Portail de données EMODnet (activités humaines, par exemple, dépôt de boue de dragage, munitions immergées)
- Western Power Distribution (lignes de transmission et de distribution)

Des informations complètes sur les contraintes considérées et les sources de données utilisées figurent à l'Appendix A.

6.1.5 Approche

Notre objectif principal était de visualiser les zones de déploiement viables pour les quatre classes d'appareils dans la région.

Les données nécessaires ont été téléchargées et payées dans le logiciel SIG (QGIS). Les informations ont été examinées pour savoir combien elles sont importantes dans la zone choisie. Nous avons calculé la distance par rapport à la côte et la distance par rapport au réseau 33 kV grâce aux algorithmes du logiciel.

Pour chacune des quatre catégories de dispositifs, nous avons déterminé la zone viable où ils pouvaient être déployés. Pour ce faire, nous avons appliqué les conditions de vitesse d'écoulement et de bathymétrie indiquées dans le Tableau 4. Nous avons aussi converti les ensembles de données matricielles en vecteurs, en regroupant les emplacements viables en couches polygonales. De plus, nous avons combiné les zones viables de vitesse d'écoulement et de bathymétrie en une seule couche et soustrait les autres contraintes strictes, ce qui a donné des polygones montrant les zones potentielles pour les déploiements.

6.2 Cartes : contraintes douces

6.2.1 Trafic maritime

Figure 10 (en haut) montre le trafic maritime dans les océans entourant le Pembrokeshire, en unités d'heures moyennes par mois. Nous avons choisi l'ensemble de données de 2019, car l'ensemble de données plus récent de 2020 présentait un trafic anormal, nettement inférieur à celui des années précédentes en raison de la pandémie de coronavirus.

L'activité des navires est importante autour du port de Milford Haven, comme on peut s'y attendre, puisqu'il s'agit d'un grand port. Dans la région de Ramsey Sound, le trafic est crucial, en particulier au sud de l'île. Cela est dû aux excursions en bateau, que la société Voyages of Discovery organise actuellement huit fois par jour [61]. Il est peu probable que cela constitue un obstacle pour une ferme hydrolienne, nommément un dispositif à fond fixe, comme le prouve le fait que TEL a pu déployer sa turbine. De plus, une ferme hydrolienne intéresserait le public et pourrait stimuler l'intérêt pour les excursions en bateau et le tourisme en général.

Il existe une zone de trafic maritime plus importante au sud de la zone d'analyse et au nord de Milford Haven, dans la baie de St-Brides. Cette zone est utilisée pour l'amarrage des pétroliers [62] qui travaillent à Milford Haven.

6.2.2 Zones de protection de l'environnement

Figure 10 (en bas) montre les zones de protection environnementale désignées dans les eaux entourant le Pembrokeshire. L'ensemble de la zone d'analyse se trouve dans une ZSC, certaines zones étant également désignées comme SSSI. L'île de Ramsey elle-même est une réserve naturelle protégée. Comme les zones de Ramsey Sound et de St-David's Head ont obtenu des baux sur les fonds marins, ces contraintes ne sont pas considérées comme des obstacles au développement des fermes hydroliennes. Une étude précédente menée par Haverson et al. a conclu qu'un réseau de 10 MW à St-David's Head aurait probablement un faible impact, mais que les fermes hydroliennes pourraient avoir un effet notable sur l'environnement benthique en raison de l'accumulation localisée de sédiments [[42]. Cette question pourrait être étudiée si des fermes plus importantes étaient envisagées, car elle pourrait influencer des facteurs tels que la spécification des dispositifs et la disposition des réseaux.

6.2.3 Activité de pêche

Figure 11 (en haut) indique le trafic des activités de pêche dans les océans entourant le Pembrokeshire. Deux sources de données différentes sont présentées, le MMO étant superposé aux données du Global Fishing Watch. L'activité de pêche est très faible dans la zone d'analyse et n'est donc pas considérée comme une contrainte pour développer les fermes hydroliennes.

6.2.4 Sédiments des fonds marins

Figure 11 (en bas) montre les types de sédiments des fonds marins dans les eaux entourant le Pembrokeshire. En général, les fonds marins sont constitués de sédiments à gros grains, avec quelques zones intercalées présentant d'autres classifications. Les sédiments à gros grains conviennent généralement aux monopieux. Le jeu de données est de résolution assez faible et une campagne d'étude complète serait nécessaire pour caractériser complètement le fond marin. En outre, seule la couche supérieure est représentée. La profondeur du substratum rocheux est une mesure cruciale pour la conception des fondations monopieu, qui pourrait également être obtenue à partir d'études géotechniques.

Les monopiles éoliens offshore sont habituellement moins adaptés aux fonds marins de gravier, car il est plus difficile de les empiler [63]. Les monopiles des turbines hydroliennes sont beaucoup plus petites, ce qui pose moins de problèmes. Le jeu de données sur les

sédiments des fonds marins est indicatif, et les fondations pourraient être conçues et les turbines placées pour atténuer les problèmes locaux. C'est pourquoi le type de sédiments n'a pas été considéré comme une contrainte absolue.

Les données proviennent du réseau européen d'observation et de données du milieu marin (EMODnet). Les cartes sont basées sur les données AIS achetées chaque année à Collecte

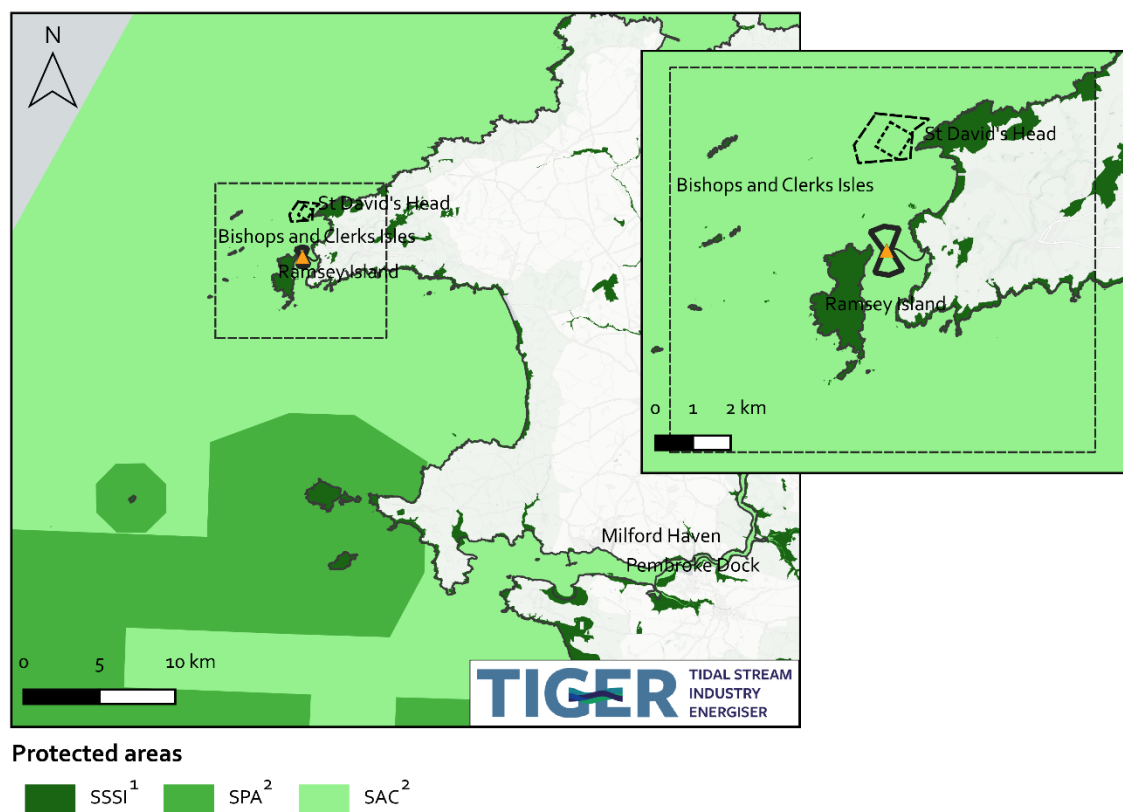
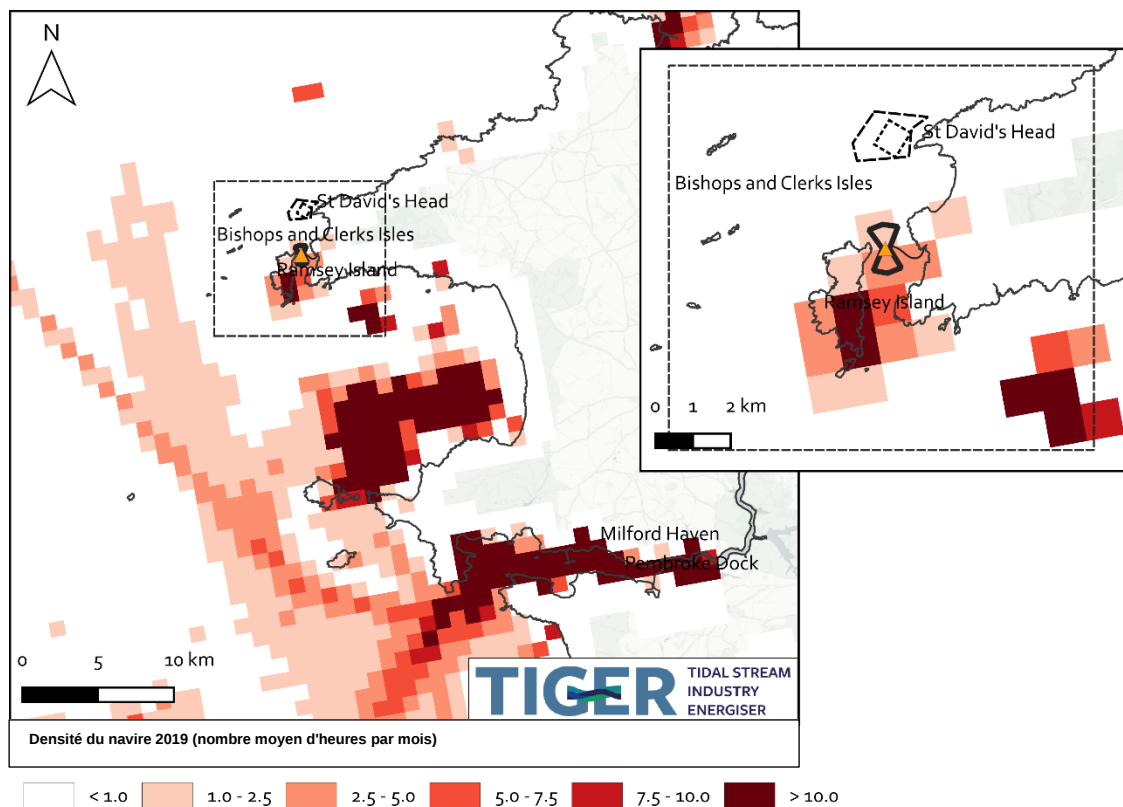


Figure 12 - Densité des navires (en haut) et zones de protection environnementale désignées (en bas) dans la région de Ramsey Sound et sur la côte du Pembrokeshire.

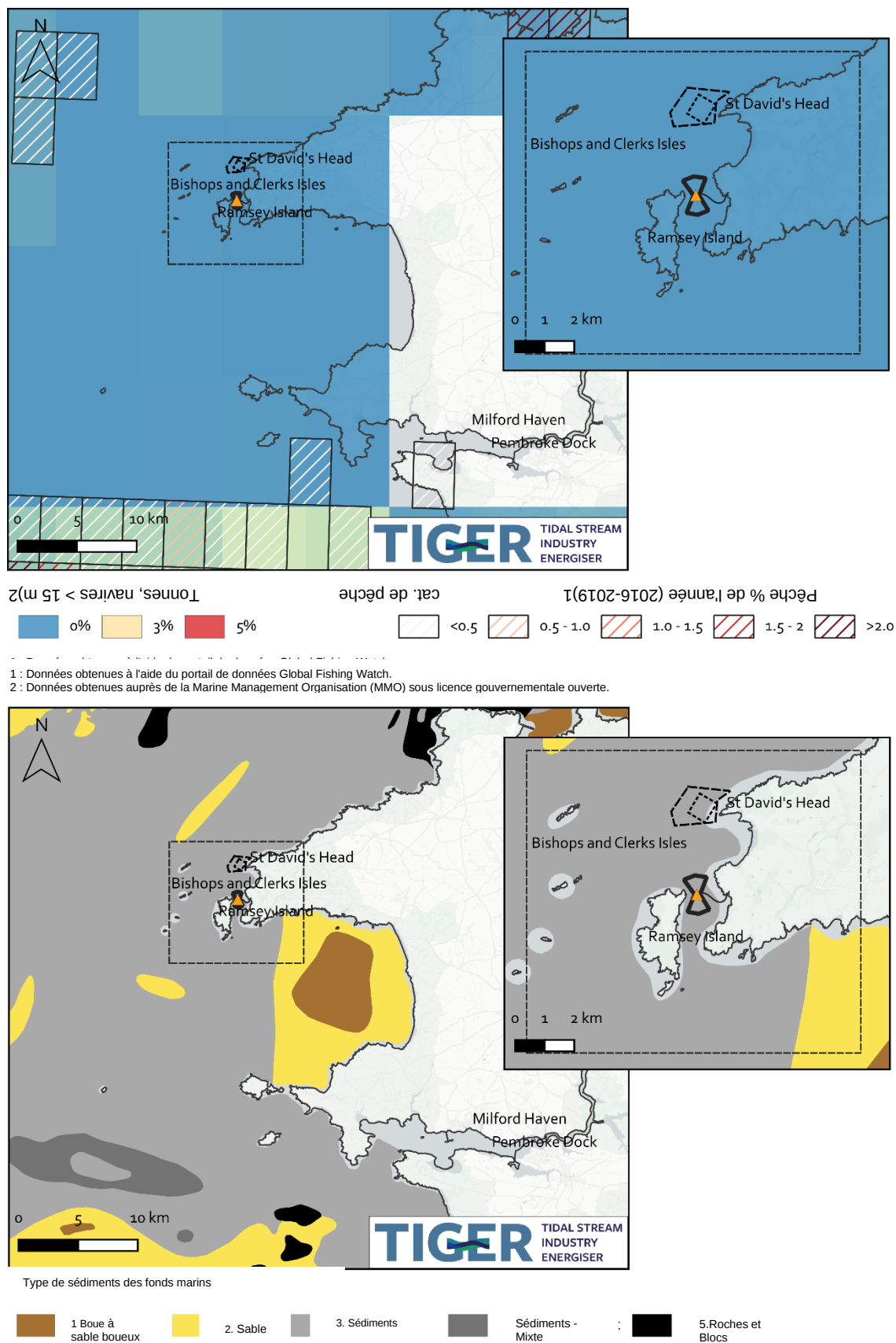


Figure 13 - Activité de pêche commerciale (en haut) et classification FOLK5 des sédiments du fond marin (en bas) dans la région de Ramsey Sound et sur la côte du Pembrokeshire.

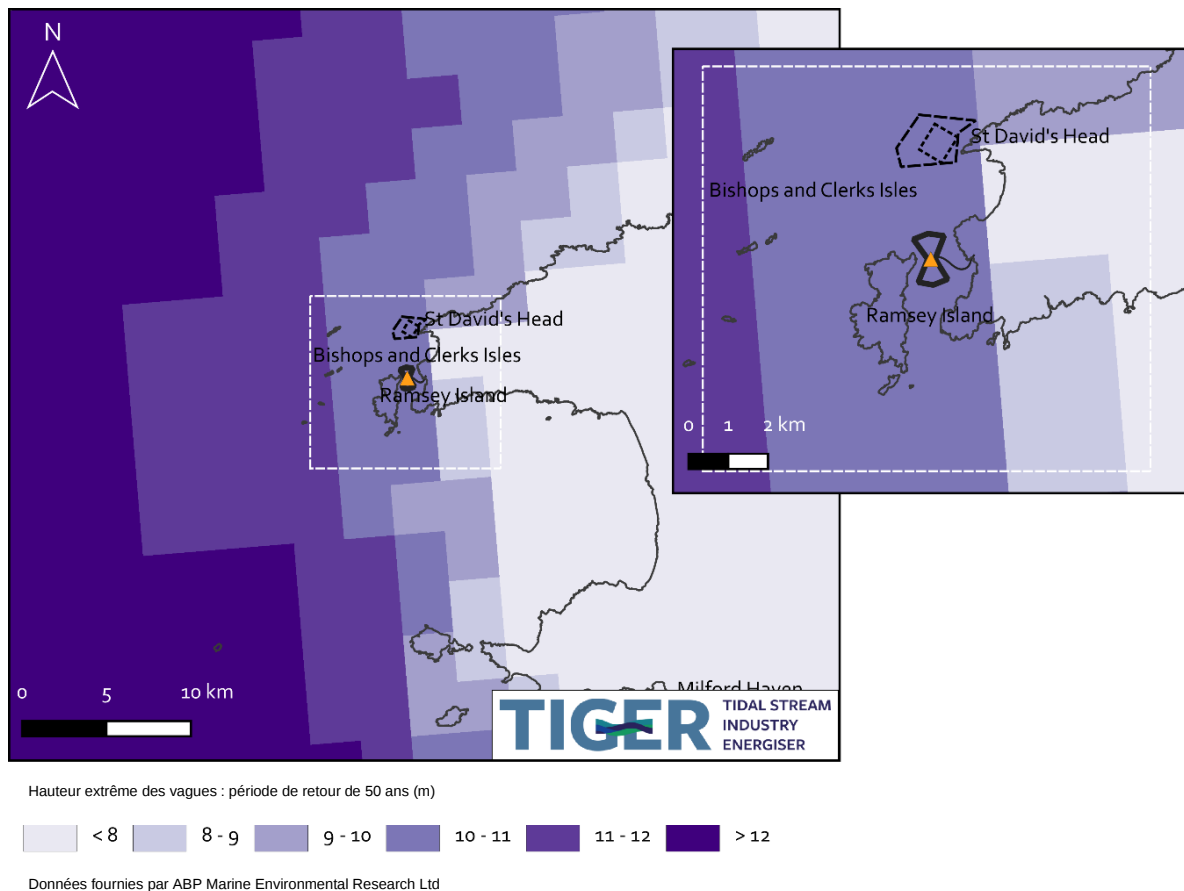


Figure 14 - Hauteur extrême des vagues significatives (période de retour de 50 ans) dans la région de Ramsey Sound et sur la côte du Pembrokeshire.

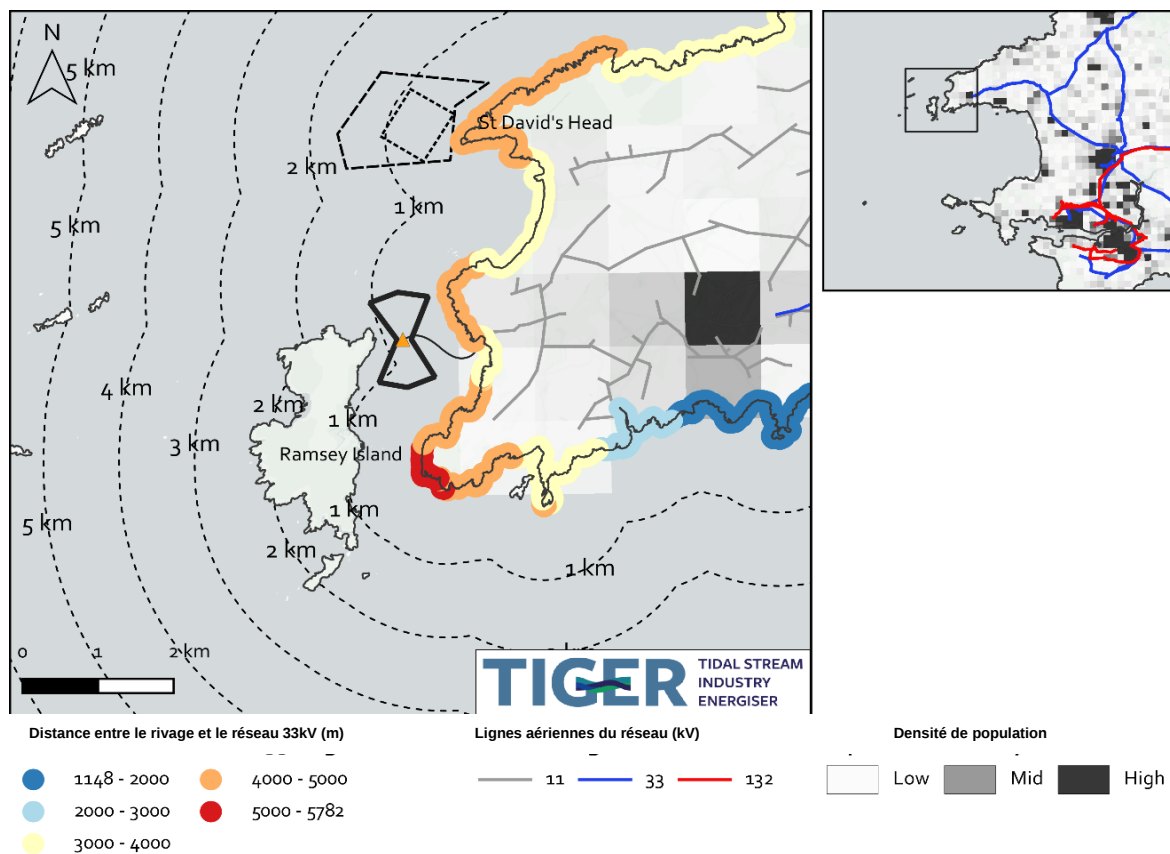
6.2.5 Hauteurs de vagues extrêmes

Figure 12 montre les hauteurs de vagues significatives extrêmes dans la région, c'est-à-dire les hauteurs extrêmes sur 50 ans. Cet ensemble de données a été fourni par ABPmer, qui l'a généré à l'aide de son modèle SEASTATES North West European Shelf Wave Hindcast Model. Les estimations sont considérées comme réalistes, avec des modèles de variance semblables à ceux d'autres sources de données, mais elles ne sont pas validées localement et sont donc considérées comme des estimations indicatives. Les données sont interpolées sur une grille de 3 km². Le modèle SEASTATES est principalement un modèle d'eau profonde et, par conséquent, ne représente pas de manière adéquate les effets des eaux peu profondes (par exemple, le shoaling, la réfraction, le déferlement des vagues).

En gardant ces réserves à l'esprit, la carte indique que les vagues extrêmes d'une année sur 50 sont de l'ordre de 8 à 12 m dans la zone d'analyse. Les turbines hydroliennes devraient être conçues dans cette optique pour garantir leur survie.

6.2.6 Distance par rapport au rivage et au réseau

Figure 13 (en haut) montre les contours de la distance jusqu'au continent et la distance du littoral jusqu'à la ligne électrique de 33 kV allant à St-David's. Il s'agit de distance en ligne droite qui ne tiennent pas compte des problèmes spécifiques d'acheminement des câbles qui pourraient survenir (par exemple, si les câbles doivent contourner l'île de Ramsey ou l'infrastructure terrestre).



1 : Données de Western Power Distribution.

2 : Centre pour le réseau international d'information sur les sciences de la terre - CIESIN - Université de Columbia. 2018. Grille de la population mondiale, version 4 (GPWW4) : Population Density, Revision 11. Palisades, NY : Centre de données et d'applications socio-économiques de la NASA (SEDAC).

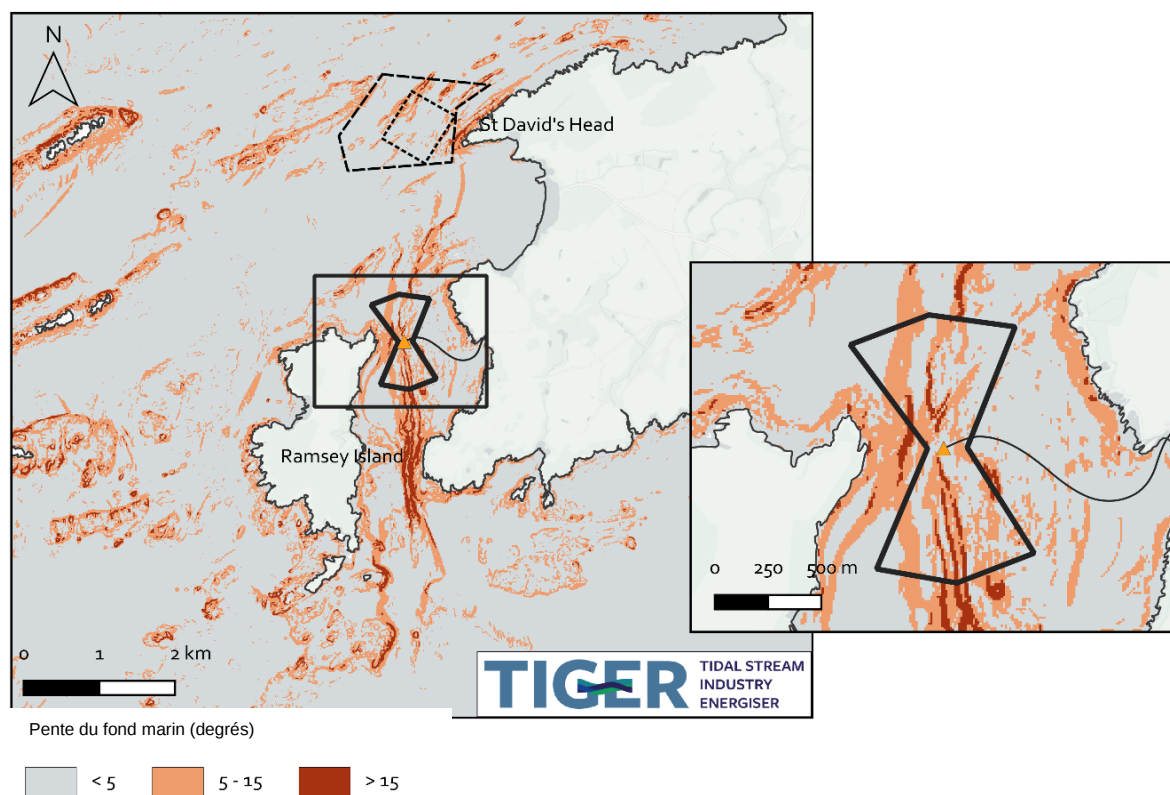


Figure 15 - Distance du rivage (contours) et distance de la sous-station 33kV (couleurs) (en haut) et pente du fond marin (en bas) dans la région de Ramsey Sound.

La grande majorité de la zone d'analyse se trouve à moins de 6 km du continent. Il s'agit d'une courte distance par rapport, par exemple, à l'éolien en mer (où les fermes se trouvent généralement à plus de 40 km du rivage). Pour les projets hydroliens plus petits et plus proches du rivage, il pourrait être économique de renoncer à l'utilisation d'un concentrateur sous-marin et d'apporter chaque turbine jusqu'au rivage avec son propre câble. Bien que les coûts de câblage soient plus élevés, la redondance du système serait améliorée et l'on économiserait de l'argent sur la fourniture et l'entretien du concentrateur sous-marin.

Ramsey Sound étant une zone de protection spéciale, il n'est pas certain que des câbles puissent être posés sur l'île et acheminés vers le continent, cette question devra être examinée pour tout projet développé à l'ouest de l'île.

Les distances entre le littoral et le réseau de 33 kV sont inférieures à 6 km, la plus grande distance en ligne droite se situant au sud-ouest du continent. Bien qu'il existe des points de connexion potentiels à 11 kV plus près de la côte, ceux-ci ne seraient possibles que pour des réseaux de démonstration plus petits. Il est aussi probable que la connexion devrait être faite à la sous-station de 33 kV pour un projet à l'échelle commerciale (10 MW+).

À l'exception de la ville de St-David's, la zone est généralement peu peuplée. Elle se compose principalement de champ, de petits hameaux et d'un nombre important de site de vacances (campings et caravanes). Ceci, combiné à la distance relativement courte du réseau 33 kV, signifie que le raccordement serait probablement simple, bien qu'il faille discuter avec le DNO Western Power Distribution pour comprendre la capacité du réseau disponible.

6.2.7 Pente des fonds marins

Figure 13 (en bas) montre la pente du fond marin dans la région. Elle a été dérivée des données bathymétriques, rééchantillonnées à une résolution de 10 m (considérée comme une échelle de longueur appropriée pour un dispositif de marée).

À l'intérieur du détroit de Ramsey, les fonds marins varient considérablement, avec des pentes abruptes de plus de 15 degrés. À l'extérieur du détroit, il existe de grandes zones plus plates, avec quelques pentes plus raides à l'ouest et près de St-David's Head. En général, les fondations par gravité conviennent pour les pentes inférieures à 5 degrés, et les fondations sur pieux sont nécessaires pour les pentes plus raides. Pour une zone comme Ramsey Sound, une fondation sur pieux serait probablement plus judicieuse.

La conception détaillée des fondations nécessiterait une analyse plus poussée, y compris une analyse de la configuration du réseau. Il est possible d'estimer que les turbines et les fondations sont conçues pour atténuer la variation de la pente pour cette étude de haut niveau. Nous ne considérons donc pas qu'il s'agisse d'une exclusion catégorique pour une ferme hydrolienne.

6.3 Cartes : contraintes strictes

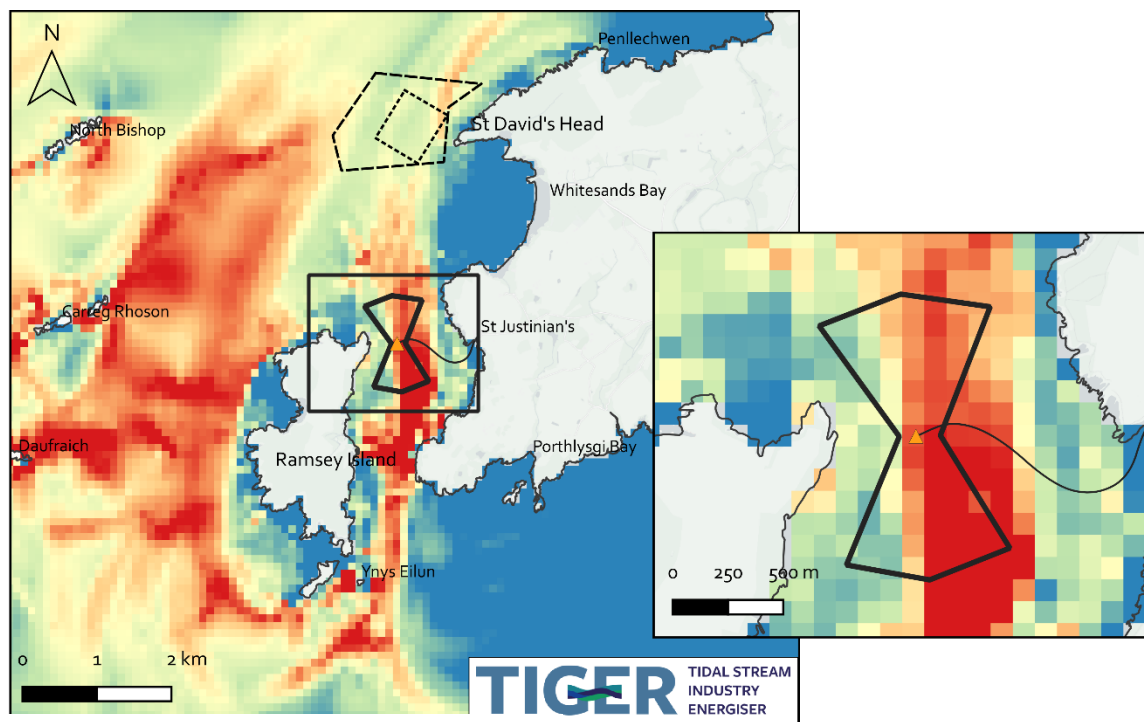
6.3.1 Vitesse d'écoulement

Figure 14 (en haut) montre les vitesses maximales de la marée de printemps dans la zone d'analyse du détroit de Ramsey. Comme prévu, la ressource est très élevée dans le Ramsey Sound lui-même, l'eau canalisée entre l'île de Ramsey et le continent. La ressource sur le site de St-David's Head est assez faible en comparaison, le principal avantage étant la proximité du rivage et une variation moins extrême du fond marin.

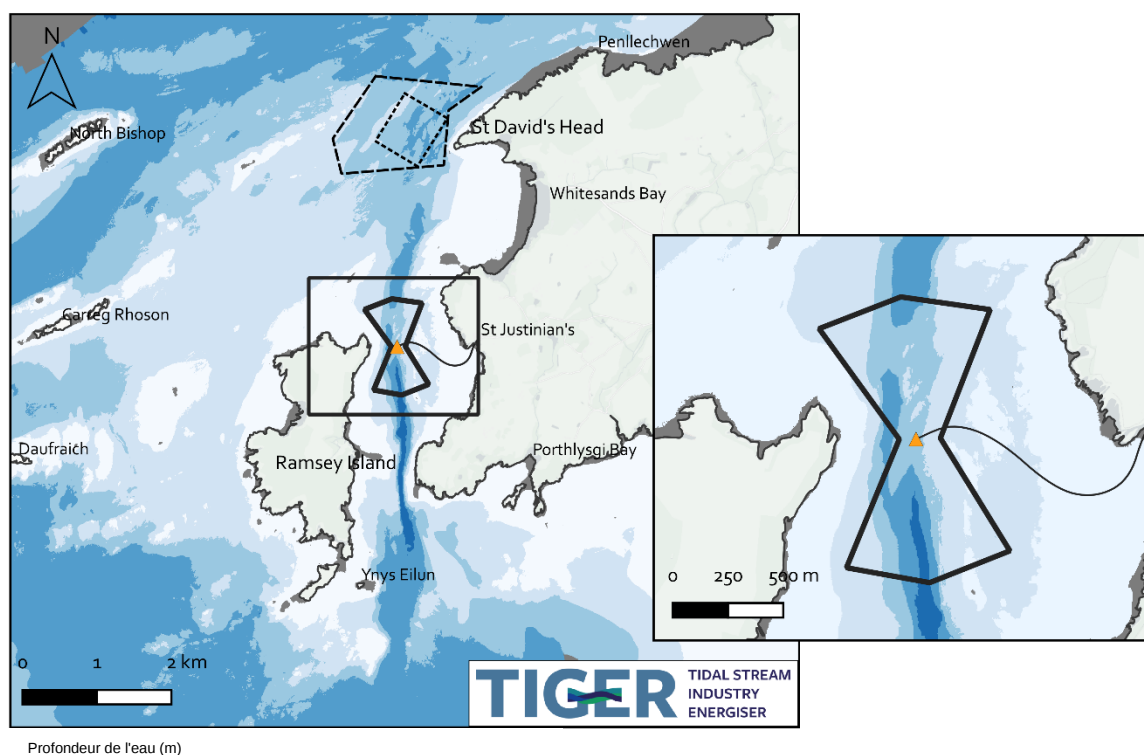
À l'ouest de l'île de Ramsey, il y a également un flux de marée important, en particulier autour des affleurements de Carreg Rhoson et de Daufraich.

6.3.2 Bathymétrie

Figure 14 (en bas) montre la bathymétrie de la région. La profondeur à l'intérieur du détroit de Ramsey atteint environ 80 m dans la fosse centrale qui traverse le milieu du détroit. Comme indiqué précédemment, le fond marin est également assez irrégulier, ce qui explique les flux assez turbulents mentionnés dans plusieurs études.



F Données sur la vitesse d'écoulement fournies par l'Université de Plymouth. Générées à l'aide du solveur d'écoulement côtier Thetis.



Les données de bathymétrie proviennent des sources suivantes :
 Portail de données de l'Amirauté, mis à disposition par le Bureau hydrographique du Royaume-Uni.
 Portail IMARDIS, construit et géré par l'Université de Bangor et soutenu par le Fonds de développement régional de l'Union européenne.
 Projet SMMNR, mis à disposition par le gouvernement gallois.

Figure 16 - Courant maximal de printemps (en haut) et bathymétrie (en bas) dans la région de Ramsey Sound.

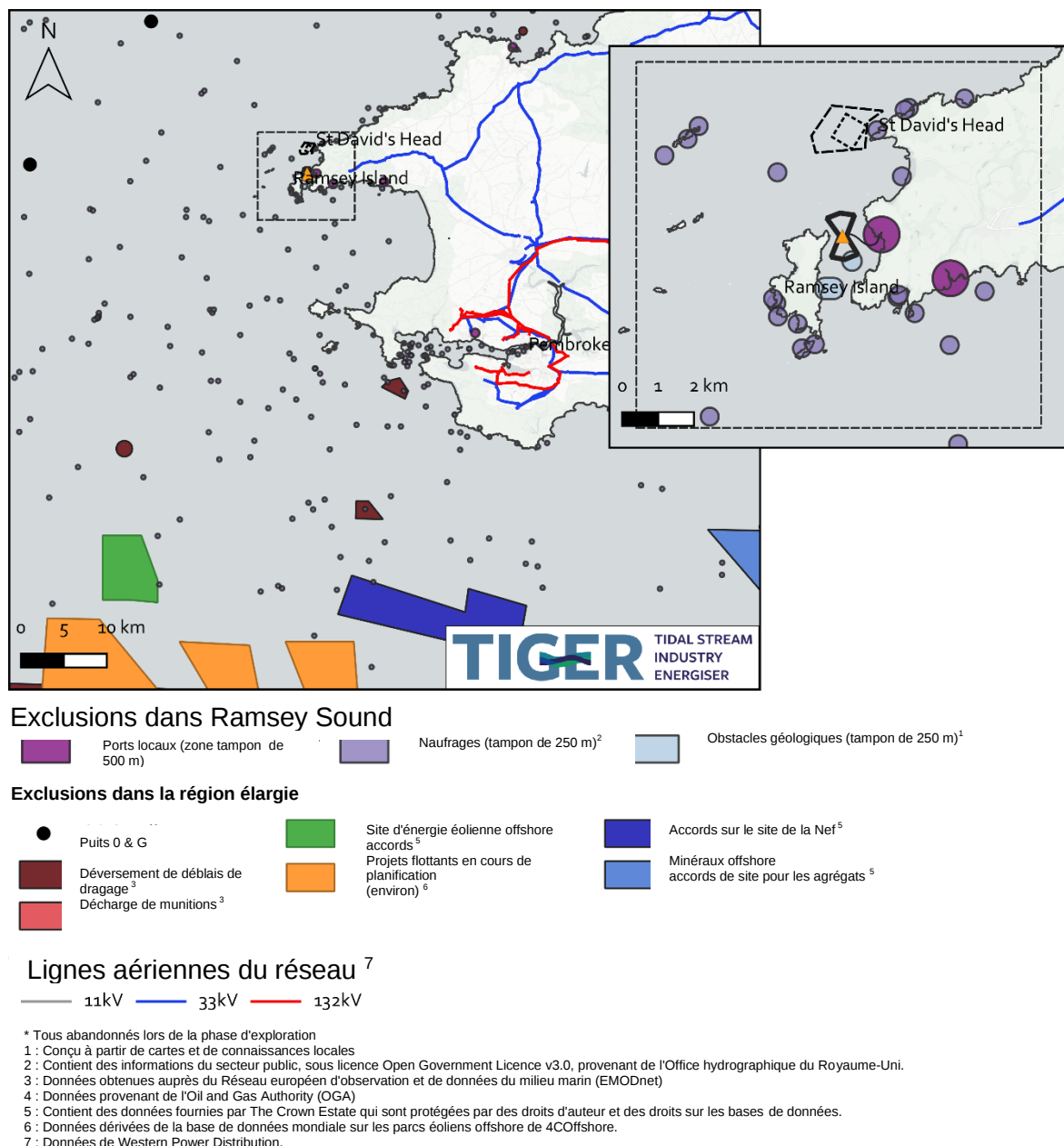


Figure 17 - Contraintes dures et zones d'exclusion dans la région de Ramsey Sound et sur la côte du Pembrokeshire.

La zone située à l'ouest de l'île Ramsey est assez peu profonde, avec un grand plateau dont la profondeur est inférieure à 30 m. Cette zone ne conviendrait qu'à des dispositifs à rotor de petite taille. Les eaux profondes sont limitées dans la région, ce qui réduit le potentiel des dispositifs à rotor de plus grande taille (25 m et plus). Zones d'exclusion et grille.

Figure 15 montre les exclusions et la grille dans les mers du Pembrokeshire. La carte est agrandie par rapport à la précédente afin de mettre en évidence les puits de pétrole et de gaz (abandonnés pendant la phase d'exploration), l'éolien offshore (parc éolien flottant Erebus) et l'extraction d'agrégats au sud. Comme on peut le constater, aucune de ces grandes zones d'exclusion dure ne se trouve dans la région analysée.

Il y a quelques épaves dans la zone d'analyse, mais aucune dans le détroit de Ramsey lui-même. Il y a deux petits ports locaux, comme mentionné dans 3.2.2. Nous avons appliqué des exclusions de 500 m autour de ces ports. Cependant, il faudrait travailler davantage avec les parties prenantes locales pour déterminer l'importance de ces ports dans la réalité. Des zones tampons ont également été appliquées autour de deux caractéristiques

géologiques : Horse Rock et The Bitches, qui représentent des risques pour la navigation des navires de service.

Les lignes à 33 kV et 132 kV sont aussi représentées. De plus, il existe une ligne de 33 kV à St-David's Head, qui pourrait être utilisée pour connecter des réseaux de dizaines de MW (comme le prévoyait TEL pour son projet de St-David's Head). La ligne de 132 kV est reliée à la centrale électrique de Milford Haven. À son point le plus proche, elle est située à 25 km du détroit de Ramsey (environ 15 km de la côte et 7 km à terre de la ligne de 132 kV). Bien que plus éloignée que la sous-station de 33 kV, cette distance est très proche par rapport à l'éolien en mer, où les parcs sont généralement situés à 40 km ou plus du rivage (et souvent bien plus loin, par exemple, Dogger Bank A et B seront à approximativement 131 km du rivage au point le plus proche, avec des longueurs de câble d'exportation de 172 à 191 km) [64]).

6.4 Régimes des appareils

Figure 16 montre les zones viables pour les quatre classes d'appareils représentatives.

- Le dispositif fixe à petite échelle a un potentiel dans le détroit de Ramsey, en particulier au nord, ainsi qu'à l'ouest de l'île de Ramsey.
- Le dispositif fixe à l'échelle de l'utilité nécessite des eaux plus profondes et, par conséquent, a beaucoup moins de potentiel dans et autour de Ramsey Sound. Cette catégorie de dispositif s'améliorerait adaptée au sud-ouest de l'île de Ramsey. Bien que les vitesses d'écoulement y soient plus faibles, la profondeur de l'eau est suffisante pour un rotor de 20 m et la modélisation indique des points chauds. Les effets de blocage dans cette zone devraient être considérés si des fermes d'appareils plus petits étaient déployées plus au nord.
- Avec un profil de profondeur similaire, le dispositif flottant a une tendance semblable à celle du dispositif fixe, mais avec une couverture plus importante dans Ramsey Sound. Comme mentionné précédemment, le chenal a une pente très variable et nécessiterait donc probablement des ancrages sur pieux. Un dispositif flottant plus grand pourrait causer une obstruction pour les activités récréatives dans la région, ce qui devrait être considéré. En dehors de Ramsey Sound, il n'y a pas beaucoup d'eaux profondes dans la zone d'analyse considérée, mais les réseaux flottants pourraient être une alternative aux dispositifs fixes. Les eaux occidentales exposées pourraient poser des problèmes liés à la charge des vagues.
- L'appareil de nouvelle génération, plus grand, dispose d'une zone plus restreinte, car il ne peut pas être déployé dans les zones moins profondes les plus prometteuses. Des points chauds existent à l'ouest de l'île North Bishop, au sud-ouest de l'île Ramsey et dans des zones limitées du détroit de Ramsey.

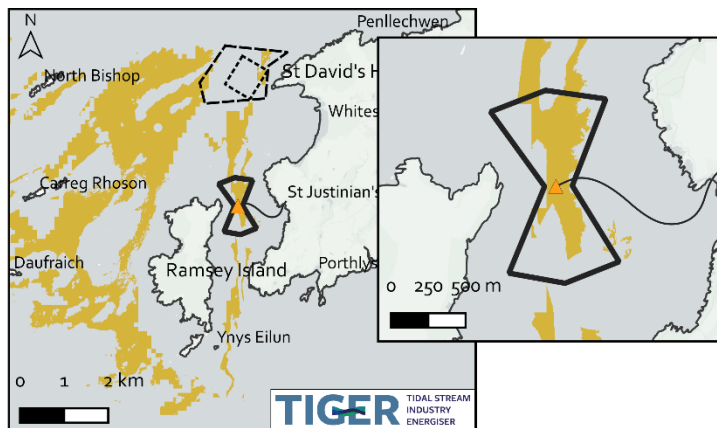
En général, sur la base de ces cartes, nous pensons qu'une technologie à petite échelle est la plus prometteuse pour le site de Ramsey Sound. Ainsi, il possède la plus grande zone viable des quatre technologies et n'aurait pas les problèmes de navigation associés à une technologie flottante. La zone située à l'ouest de l'île Ramsey semble également prometteuse pour une technologie de même envergure, mais les options de câblage devront être étudiées.

Les trois autres technologies à l'échelle des services publics indiquent toutes des points chauds à l'est de l'île Bishop et au sud-ouest de l'île Ramsey. Ces zones méritent un examen plus approfondi dans le cadre d'études futures. Les vitesses d'écoulement ne sont pas aussi bonnes qu'à Ramsey Sound, et elles pourraient donc être mieux adaptées à des dispositifs conçus pour des débits plus faibles ou comme sites futurs pour des dispositifs de

la prochaine génération, lorsque les chaînes d'approvisionnement régionales seront plus développées et que le LCOE sera plus bas.

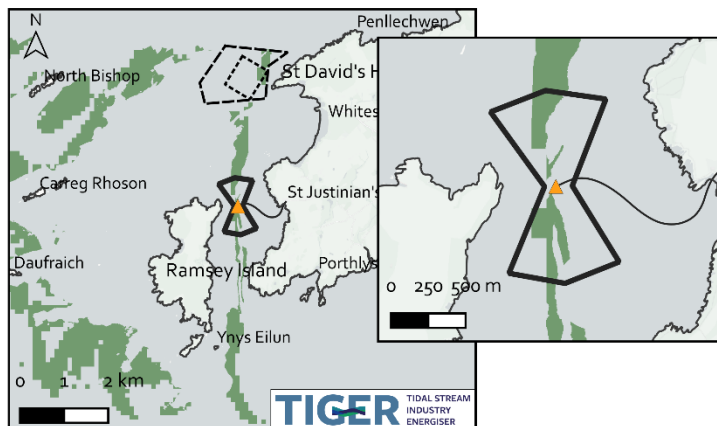
A. Petite échelle fixe

Vitesse d'écoulement : >3,5 m/s
Profondeur de l'eau : 25-40 m (15 m diamètre du rotor)



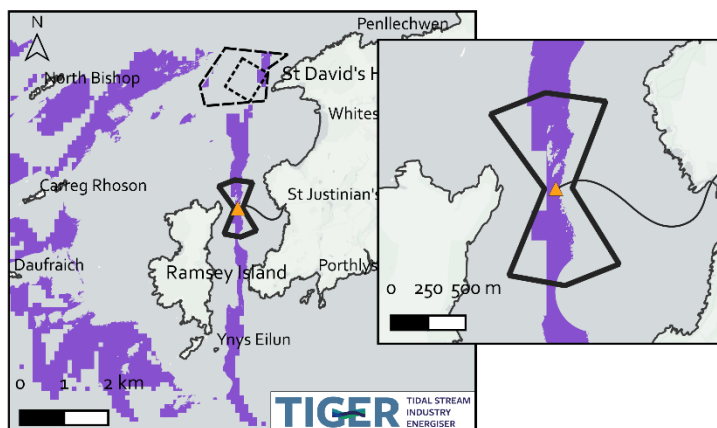
B. Échelle d'utilité publique fixe

Vitesse d'écoulement : >3,5 m/s
Profondeur de l'eau : 35-50 m (20 m diamètre du rotor)



C. Flottante à l'échelle de l'utilité publique

Vitesse d'écoulement : >3,5 m/s
Profondeur de l'eau : 30-80 m (20 m diamètre du rotor)



D. Prochaine émission fixe

Vitesse d'écoulement : >3,5 m/s
Profondeur de l'eau : 40-55 m (25 m diamètre du rotor)

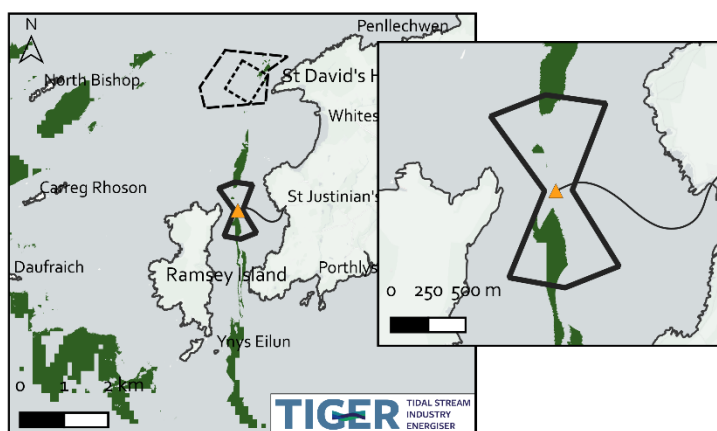


Figure 18 - Zones de déploiement viables pour les quatre technologies de référence.

6.5 Résumé

Cette analyse géospatiale a rassemblé plus de 50 ensembles de données différents afin d'évaluer la région de Ramsey Sound et de déterminer quelles zones pourraient être viables pour des projets de TSE. Les résultats peuvent être résumés comme suit :

- La région de Ramsey Sound elle-même est largement épargnée par les autres usagers de la mer (pêche, activités commerciales). La seule activité significative est celle des excursions régulières en bateau de plaisance autour de l'île de Ramsey, sans aucune navigation commerciale à travers ou à proximité du détroit.
- Toute la région se trouve dans une ZSC et l'île de Ramsey est désignée comme SSSI et appartient à la RSPB. Ces éléments n'ont pas empêché l'octroi de baux pour les projets de TEL à Ramsey Sound et à St-David's Head (ce dernier étant un projet de 10 MW), mais des travaux supplémentaires seraient nécessaires pour établir la faisabilité de réseaux commerciaux plus importants.
- Les sédiments du fond marin et les hauteurs de vagues extrêmes sont considérés comme acceptables pour un projet de TSE. Ces deux ensembles de données sont de faible résolution et de nature indicative. Des enquêtes seraient nécessaires pour une étude de faisabilité détaillée du projet (par exemple, enquête géophysique/géotechnique, mesures par bouées à vagues).
- Il n'y a pas d'exclusions dures significatives qui devraient être considérées. Dans le détroit de Ramsey, il existe des caractéristiques géologiques (The Bitches et Horse Rock) qui pourraient s'avérer dangereuses pour la navigation si l'on n'y prenait pas garde. Le poste de sauvetage de St Justinian devrait également être considéré dans la planification du projet.
- La majeure partie du littoral se trouve à moins de 5 km d'un point de raccordement au réseau à St-David. Les sites en mer se trouvent généralement à moins de 5 km du rivage, sans tenir compte de l'acheminement potentiel des câbles autour de l'île de Ramsey pour les sites situés à l'ouest. Cet aspect devra être étudié pour chacun de ces sites potentiels.
- Les vitesses d'écoulement dans le détroit de Ramsey sont convenables (la modélisation indique des courants printaniers maximaux supérieurs à 5 m/s). Il existe aussi des zones prometteuses à l'ouest de l'île de Ramsey, bien que cette zone soit peu profonde et ne puisse convenir qu'à des turbines plus petites.
- Une caractéristique notable et connue de Ramsey Sound est sa bathymétrie irrégulière. comme on peut le voir en même temps dans la pente du fond marin (Figure 13) et de la bathymétrie (Figure 14). Il en résulte un écoulement quelque peu turbulent dans le détroit (comme mentionné dans la section 4.1.2). Pour une ferme plus importante, cela a aussi des implications sur le choix des fondations et la disposition des réseaux, rendant probablement les fondations sur pieux plus appropriées.
- Dans toute la région, il existe des sites adaptés à une myriade de dispositifs différents, de forme et de tailles diverses. Les sites associés à des dispositifs de plus grande envergure (fixes et flottants) se trouvent généralement dans les zones à faible débit et conviendraient donc mieux aux futures générations de dispositifs optimisés pour améliorer le rendement dans ces conditions. Dans le Ramsey Sound, un dispositif à petite échelle est plus approprié, car l'eau est généralement moins profonde que 40 m.

7 Évaluation technico-économique

Dans cette section, le potentiel économique du site de Ramsey Sound est étudié. Cela comprend la capacité potentielle disponible, le LCOE et le soutien financier nécessaire pour permettre d'autres développements au-delà du projet TIGER.

7.1 Méthodologie

L'analyse s'est déroulée en quatre étapes :

1. Estimer le nombre de turbines qui pourraient être déployées à proximité du site TIGER, pour une échelle technologique appropriée.
2. Exécuter des modèles d'écoulement hydrodynamique pour confirmer le nombre de turbines et estimer le PEA brut.
3. Introduire le PEA et les spécifications de la turbine dans le modèle technico-économique pour calculer le LCOE
4. Identifier un CfD approprié pour le site TIGER, sur la base d'un calendrier de déploiement approprié et du TRI du projet.

Sur le principe de l'analyse SIG, comme indiqué dans la section précédente, nous avons décidé qu'une technologie à petite échelle était la plus appropriée. Des études antérieures ont indiqué qu'un diamètre de rotor de 15 m est approprié pour le site de Ramsey Sound [65], en accord avec les plans de TEL, nous avons donc pris comme point de départ un dispositif de 500 kW, avec un diamètre de rotor de 15 m.

Dans le SIG, nous avons créé une grille régulière de points pour représenter l'emplacement des turbines. Nous avons espacé ces points de 2,5 x 10 diamètres de rotor (37,5 x 150 m), conformément aux conseils des partenaires du projet TIGER (EMEC et développeurs de technologies). Nous avons trouvé les points qui recoupaient le régime de déploiement des dispositifs à petite échelle (ce régime est illustré à la Figure 16A).

Nous avons dessiné une forme autour des turbines sélectionnées (bordure orange), car la zone du fond marin calculée était trop détaillée pour le logiciel de modélisation de l'écoulement. Cette forme de ferme a été donnée à l'Université de Plymouth qui a modélisé l'écoulement dans Thetis. De plus, ils ont appliqué un coefficient de traînée uniforme à la zone de la ferme pour simuler l'impact des turbines sur l'écoulement. De plus, ils ont comparé ce coefficient à l'écoulement ambiant pour déterminer l'énergie extraite de l'écoulement par la ferme hypothétique. De plus, ils ont examiné différentes densités de fermes en modélisant différents nombres de turbines (et donc de coefficients de traînée) afin d'étudier l'impact sur la production effective d'énergie par turbine.

La densité de l'exploitation avec la plus grande moyenne de PEA par turbine a été utilisée pour l'analyse technico-économique. Nous avons élaboré des coûts représentatifs pour la technologie en utilisant les données des partenaires du projet TIGER et avons calculé le LCOE en utilisant les hypothèses standard de l'industrie à une date de mise en service appropriée. Nous avons produit une trajectoire de LCOE montrant comment les coûts de la technologie déployée sur le site pourraient évoluer dans le temps, en fonction des taux d'apprentissage anticipés dans l'ensemble du secteur. Pour une ferme déployée en 2025, 2030 et au-delà, nous avons calculé un prix d'exercice du CfD approprié en analysant les revenus et les coûts sur la durée de vie et en comparant le prix d'exercice au TRI du projet. Nous avons ensuite calculé le soutien aux revenus du CfD nécessaire pour atteindre différents niveaux de TRI du projet (hors financement de la dette) afin de déterminer un prix d'exercice approprié. Nous avons calculé les métriques LCOE et IRR pour trois scénarios : Baseline, Optimistic et Pessimistic, modélisés avec différentes hypothèses d'entrée, pour indiquer l'incertitude.

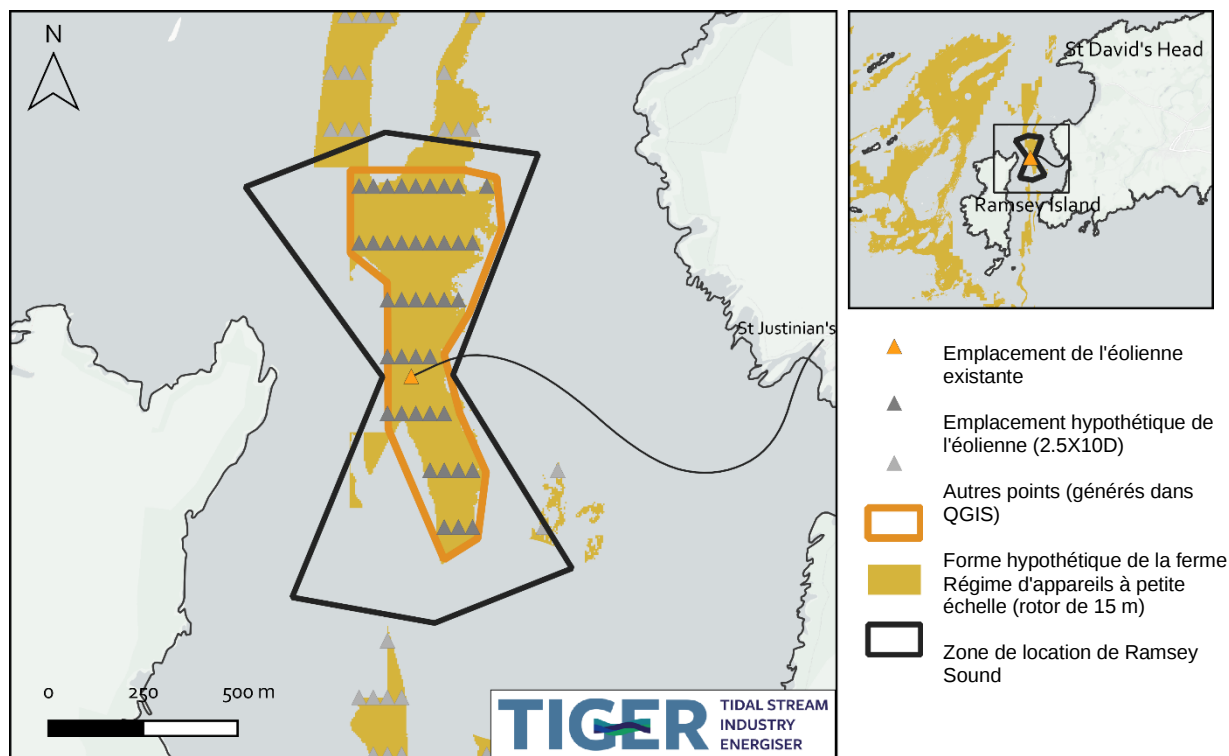


Figure 19 - Positions hypothétiques des turbines et taille des exploitations considérées pour l'analyse technico-économique du site.

7.2 Forme hypothétique de l'exploitation et évaluation de l'AEP

Figure 17 montre la ferme hypothétique qui a été prise en compte pour l'analyse technico-économique. Nous avons compté 40 emplacements d'éoliennes à proximité du dispositif TEL existant, ce qui indique le nombre d'éoliennes qui pourraient être déployées techniquement. Cela équivaldrait à une ferme de 20 MW. La zone de concession de COSW est de 0,6 km², ce qui équivaut à une densité de 33,3 MW/km². Nous avons exclu les emplacements potentiels au nord, au sud et à l'est (les "autres points" en gris clair) car ils se trouvaient en dehors de la zone de concession.

7.2.1 Évaluation AEP

Pour les 40 rotors, l'université de Plymouth a calculé un facteur de capacité moyen de 40 % pour le réseau. Les facteurs de disposition dans la région varient de 24 à 48 %, pour que les performances et l'économie du réseau pourraient être améliorées en supprimant les turbines les moins performantes.

Tableau 5 présente les résultats pour les différentes densités de réseaux examinées. Au fur et à mesure que la taille de l'exploitation augmente, l'effet de blocage augmente également, ce qui se traduit par un facteur de disposition de l'exploitation plus faible. Bien que les grandes fermes puissent réduire les coûts grâce aux économies d'échelle, cette réduction serait contrebalancée par le rendement plus faible par MW installé et le LCOE ne serait donc pas nécessairement meilleur. C'est pourquoi nous avons décidé de nous en tenir à la ferme de 40 appareils avec un facteur de capacité brut de 36 % pour l'évaluation technico-économique.

Tableau 5 - Rendement énergétique calculé pour les quatre densités d'exploitation.

Nombre de turbines	Densité du réseau (MW/km) ²	Rayon AEP (GWh/an)	Facteur de capacité (%)
20	16.7	34.8	40%
40 (cas de base)	33.3	63.3	36%
60	50.0	87.4	33%
80	66.6	103.6	30%

7.3 Évaluation technico-économique

7.3.1 Hypothèses de modélisation

Tableau 6 présente les hypothèses de projet retenues pour l'analyse. Nous avons supposé une date de mise en service en 2030 qui coïnciderait avec un cycle d'attribution de CfD en 2025-2027. Comme indiqué précédemment, nous avons considéré un dispositif de 500 kW, avec un diamètre de rotor de 15 m, et quatre dispositifs connectés à un concentrateur sous-marin pour l'exportation vers la terre. Ces hypothèses ont été fixées pour tous les scénarios examinés.

Tableau 6 - Hypothèses relatives aux appareils et aux exploitations agricoles utilisées pour l'analyse technico-économique.

Propriété	Unité	Valeur
Année de mise en service	-	2030
Puissance nominale de l'appareil	MW	0.5
Diamètre du rotor de l'appareil	m	15
Type de fondation	-	Monopile
Taille de l'exploitation	MW	20
Nombre de dispositifs	unités	40
Nombre de nœuds sous-marins	unités	10

Tableau 7 présente les hypothèses de marché et les hypothèses financières prises en compte. Pour modéliser la date de mise en service de 2030, nous avons d'abord dérivé le scénario actuel de 2022. Les sources de données comprenaient les nomenclatures des partenaires TIGER, les données des modèles de coûts d'ORE Catapult et une connaissance plus large de l'industrie. Les prévisions de marché s'alignent sur les projections

d'organisation telles que la MEC et la Commission européenne ⁽²⁾ et tiennent compte de la construction probable sur la base des sites actuels dont la capacité a été approuvée.

Les dépenses liées aux turbines proviennent en grande partie des partenaires de TIGER et ont été ajustées pour représenter le dispositif de 0,5 MW et de 15 m de diamètre de rotor envisagé. Les coûts des fondations monopieu ont été calculés en supposant des tailles de pieux et des coûts de matériaux appropriés (« c'est-à-dire le "coût par tonne ») et en les comparant aux coûts de l'éolien en mer. Les coûts de transmission ont été déterminés à l'aide des ensembles de données d'ORE Catapult utilisés pour l'éolien en mer, en les modifiant pour tenir compte de la taille plus petite des parcs. Le développement (DEVEX), l'assurance, les imprévus et le démantèlement (DECEX) ont été modélisés comme pourcentages du CAPEX total, conformément aux estimations des secteurs des EST et de l'éolien en mer.

L'installation, l'O&M planifiée et l'O&M non planifiée ont été calculées à l'aide d'un modèle spécialement conçu à cet effet. Ce modèle a été créé dans Microsoft Excel. Il utilise une approche basée sur la fréquence, calculant les coûts des opérations maritimes en calculant les délais des opérations et en les multipliant par le taux d'affrètement d'un navire approprié. Le modèle inclut également les coûts de mobilisation et de démobilisation des navires, les pièces de rechange et prend en compte la distance que les navires doivent parcourir jusqu'à l'exploitation et à l'intérieur de celle-ci. Pour l'O&M non planifiée, le modèle suppose un taux de défaillance fixe (et donc un nombre d'interventions) par an. Le modèle peut choisir de mobiliser un navire à chaque fois ou de conserver un navire permanent dans le cadre d'un contrat d'affrètement à long terme, en choisissant l'option la moins chère.

Les coûts des navires ont été obtenus à partir des modèles ORE Catapult et vérifiés avec les partenaires TIGER. Nous avons supposé qu'un navire MPSV avec une capacité DP2 conviendrait pour l'installation et les dispositifs et pour les réparations majeures, comme celui utilisé par Sabella pour ses opérations de dispositifs. Comme les dispositifs sont petits, nous avons supposé qu'un multicat avec un support plongeur/ROV pourrait être utilisé pour l'inspection et les réparations mineures sur site.

Les réductions des dépenses d'investissement et d'exploitation ont été modélisées en appliquant une réduction établie sur le taux d'apprentissage. Pour le scénario de base, ce taux a été fixé à 13 %, ce qui reflète le taux d'apprentissage à long terme tel qu'il a été observé historiquement pour d'autres énergies renouvelables [66]. La réduction de l'apprentissage n'a pas été appliquée aux frais de transmission, ce qui explique pourquoi le taux d'apprentissage effectif des OPEX est de 12 %. Pour les scénarios optimistes et pessimiste, ces taux ont été fixés à 17 % et 9 % respectivement, afin d'englober la gamme typique des taux d'apprentissage [66].

Les pertes ont été appliquées au facteur de capacité brute de 36 % fourni par l'université de Plymouth. Il s'agit de l'indisponibilité (temps d'arrêt), des pertes de sillage et des pertes électriques. La perte combinée était de 14,8 %. Bien que ce chiffre paraisse élevé, Voiciun réseau à un stade précoce. Nous avons appliqué un "taux d'apprentissage" négatif de 2 % pour simuler les efficacités technologiques et opérationnelles qui amélioreraient le rendement et de réduire les temps d'arrêt à l'avenir.

Tableau 7 - Hypothèses commerciales et financières utilisées pour l'analyse technico-économique.

² La MEC souhaite que le gouvernement britannique adopte un objectif de 1GW d'énergie marine (houlomotrice et hydrolienne) d'ici 2035. La Commission européenne a fixé un objectif de déploiement de 100 MW d'énergie houlomotrice et hydrolienne d'ici 2025 et de 1GW d'ici 2030 [75].

Propriété	Unité	Valeur de 2022	Valeur 2030 (année de mise en service)	Taux d'apprentissage effectif
Déploiement cumulé de l'industrie hydrolienne (ensemble du marché britannique)	MW	10	470	-
WACC	%	7.5%	5.6%	5.0%
Durée de vie du projet	années	25	25	0.0%
CAPEX	£k/MW	8,412	3,881	13.0%
OPEX (y compris les frais de transmission)	£k/MW/an	388	191	12.0%
Facteur de capacité net	%	30%	33%	-2.0%

7.3.2 Évaluation technico-économique à la date de mise en service

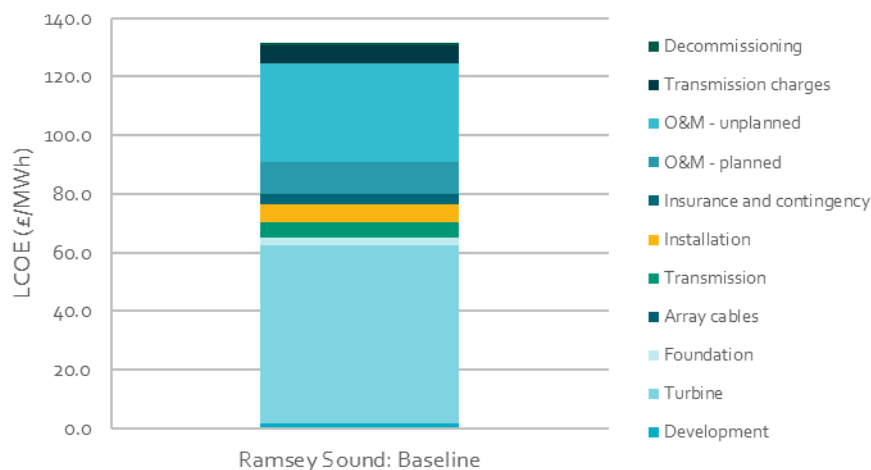


Figure 20 - Ventilation des LCOE pour le scénario de base. Il convient de noter que ces chiffres sont exprimés en termes de 2012, afin de correspondre à l'année de référence pour les prix d'exercice.

Figure 18 montre la répartition du LCOE calculé en 2030 pour le scénario de base. Le LCOE total, qui s'élève à 134 £/MWh en 2021 (165 £/MWh en monnaie de 2021), se compose essentiellement des coûts des dispositifs et des coûts d'exploitation et d'entretien non planifiés. Le coût du dispositif est assez élevé pour la taille de l'éolienne en raison du grand rotor par rapport à la puissance nominale de l'éolienne. Un développeur de projet pourrait optimiser la puissance nominale et le diamètre du rotor pour le site réel afin de réduire le LCOE, c'est pourquoi nous pensons que ce coût est prudent. Le coût des pales représente environ 25 % du CAPEX de l'appareil, et l'on pourrait donc faire valoir la nécessité de les

réduire et de se contenter d'un PEA plus faible si cela permettait de réduire le LCOE sur la durée de vie du projet.

Les coûts O & M non planifiés représentent 26 % du LCOE total. La mobilisation/démobilisation des navires contribue de manière significative à ces coûts, car le modèle suppose qu'un navire doit être mobilisé dès qu'une défaillance se produit. En réalité, le développeur du projet peut choisir d'optimiser l'utilisation du navire en attendant plusieurs pannes simultanées avant de le réparer, afin de minimiser le coût du navire, bien que cela entraîne un temps d'arrêt plus important de la ferme. En outre, comme ces turbines sont petites, un développeur de projet plus important possède sûrement son propre navire pour effectuer certaines de ces opérations, ce qui réduirait considérablement les coûts et les fluctuations du marché associé au marché des navires.

Figure 19 montre le prix d'exercice du CfD nécessaire pour atteindre différents niveaux de TRI du projet (hors effets fiscaux). Un TRI de 10 % nécessiterait un prix d'exercice du CfD de plus de 200 £/MWh. Pour situer le contexte, le prix d'exercice administratif annoncé pour l'AR4 était de 211 £/MWh pour les projets devant être installés en 2026/27. Cela montre que le site est assez cher et qu'il faudrait une subvention généreuse pour attirer un développeur de projet. Il convient toutefois de noter que des changements subtils dans les hypothèses d'entrée peuvent modifier ce tableau. Des aspects tels qu'un taux d'apprentissage plus élevé, une technologie moins coûteuse ou une ferme plus grande pourraient rendre ce site plus attrayant et l'aligner sur des sites mieux considérés tels que Meygen et PTEC. En outre, l'énergie hydrolienne apporte d'autres avantages qui pourraient justifier une prime de prix (par exemple, la création d'emplois locaux dans la région et une production d'énergie stable et fiable).

L'incertitude de cette analyse est abordée dans la section suivante où les trajectoires sont présentées.

7.3.3 Trajectoire des LCOE et du prix d'exercice du CfD

Figure 20 montre la trajectoire calculée du LCOE pour le projet Ramsey Sound de 40 turbines et 20 MW. La ligne jaune représente le scénario de base, comme indiqué pour 2030 dans la Figure 18. La bande bleue indique l'incertitude, la partie inférieure de la fourchette correspondant au scénario optimiste et la partie supérieure au scénario pessimiste.

La courbe montre que le LCOE de ce projet est estimé entre 283 et 412 £/MWh en 2021 (base de coûts 2012) avec une estimation centrale de 348 £/MWh. Ce chiffre est supérieur au LCOE d'environ 250 £/MWh qui a été estimé dans d'autres études (par ex. [66]), la raison principale étant qu'il s'agit d'une petite turbine (0,5 MW par rapport aux turbines de 2 MW actuellement disponibles sur le marché). Les vitesses d'écoulement sur le site sont

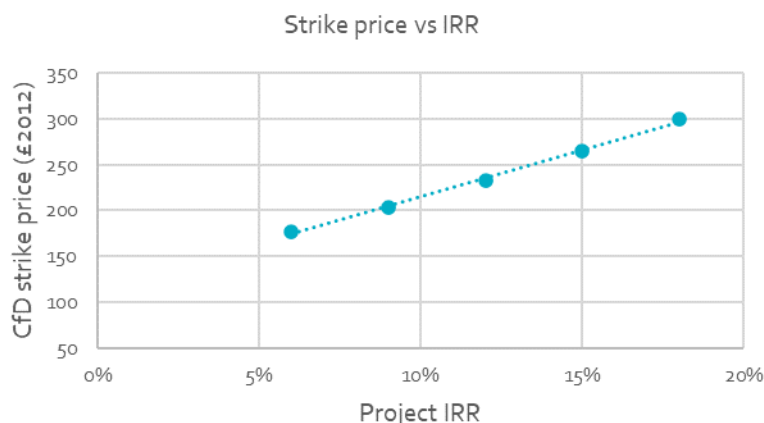


Figure 21 - Prix d'exercice du CfD nécessaire pour atteindre les différents TRI du projet

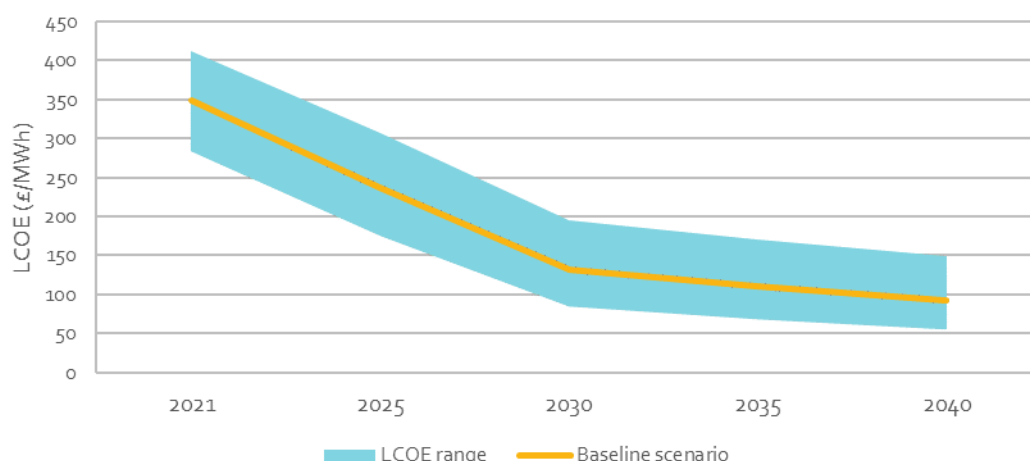


Figure 22 - Trajectoire du LCOE pour le projet Ramsey Sound de 40 turbines. Il convient de noter que ces données sont exprimées en termes de 2012 afin de correspondre à l'année de référence pour les prix de grève.

également inférieures à celles de sites plus populaires (comme mentionné dans la section 4.1.2), ce qui limite le potentiel AEP.

Nous prévoyons que les coûts de la technologie TSE continueront à baisser rapidement, avec des taux d'apprentissage équivalents à ceux observés dans d'autres industries. Le LCOE en 2030 est estimé à 85-195 £/MWh. Si un taux d'apprentissage de 17 % pouvait être atteint, avec des estimations de CAPEX et d'OPEX inférieures de 10 % à celles de notre scénario de référence, alors un LCOE situé dans la partie inférieure de notre trajectoire (85 £/MWh) pourrait être atteint. Cette valeur, obtenue pour un marché britannique de 470 MW (Tableau 7), s'aligne bien sûr la valeur de 100 £/MWh pour un déploiement cumulé de 500 MW prévue par la trajectoire industrielle ORE Catapult 2018 [67]. Vers la limite supérieure de notre estimation, il serait difficile pour le projet d'être compétitif lors d'une vente aux enchères de CfD sans que des changements importants soient apportés au projet (par exemple, grâce à des turbines plus grandes, en augmentant la taille du projet ou en obtenant, par exemple, des subventions du gouvernement gallois).

Figure 21 montre le prix d'exercice du CfD nécessaire pour obtenir un TRI de 5 à 15 % pour le scénario de base au fil du temps (bande orange). La ligne orange foncé montre le prix d'exercice à ce que nous pensons être un TRI approprié pour un développeur de projet. Ce TRI est représenté sur l'axe secondaire par la ligne noire en pointillés. Pour situer le contexte, le développeur de projets éoliens offshore Equinor a déclaré en 2021 viser un TRI de 4 à 8 % pour ses projets, le plus bas pour les marchés plus matures (par exemple, l'Europe occidentale) et le plus élevé pour les marchés émergents [68].

Si le projet était installé en 2021, nous pensons que le CfD devrait être supérieur à 500 £/MWh, ce qui est déraisonnablement élevé si l'on considère le prix d'exercice de 211 £/MWh offert pour le TSE. La principale raison de cette subvention élevée est que les turbines sont relativement petites et qu'un développeur solliciterait un rendement élevé pour réduire le risque de l'investissement.

En 2030, date de mise en service jugée appropriée pour le réseau de Ramsey Sound, un prix d'exercice de 169-265 £/MWh serait nécessaire pour un TRI de 5-15 %. Malgré le déploiement de 470 MW de TSE à cette date, la technologie aurait encore besoin d'un TRI élevé pour attirer les investisseurs, car elle serait encore moins éprouvée que des options telles que l'éolien en mer. Un TRI de 7,5 % nécessiterait un prix d'exercice de 191 £/MWh. Ce prix est inférieur de 9,7 % au prix d'exercice de 211 £/MWh du RE4.

Si le scénario LCOE optimiste est considéré à la place, le prix d'exercice pour atteindre un TRI de 7,5 % tombe à 120 £/MWh, soit 43 % de moins que le prix d'exercice de l'AR4. Une

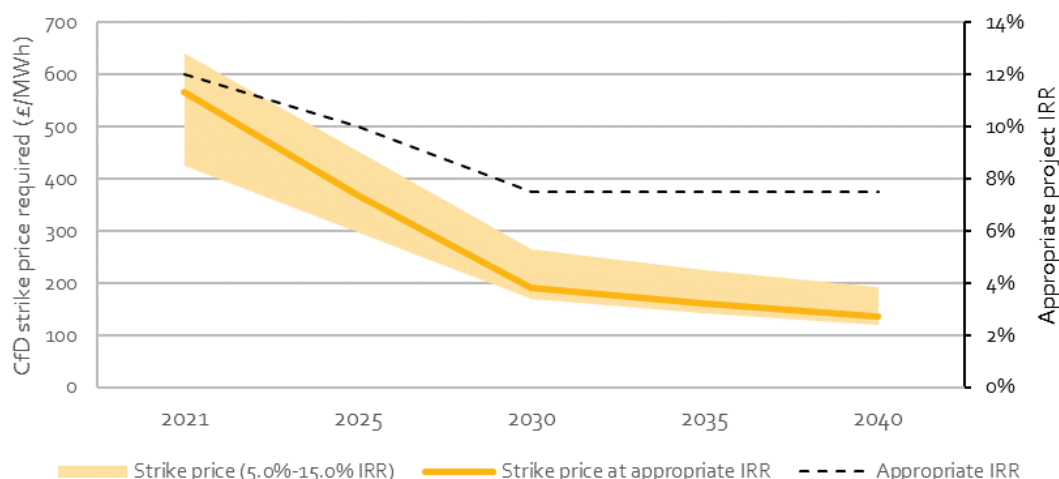


Figure 23 - Prix d'exercice du CfD au fil du temps pour le scénario de base afin d'atteindre un TRI de 5 à 15 %. La ligne orange montre le prix d'exercice pour ce que nous considérons comme un niveau de TRI approprié (indiqué sur l'axe secondaire).

date de mise en service en 2030 nécessiterait un CfD en 2025/26 environ pour être livré avec un FID en 2027/28 (équivalent à AR7/AR8 en supposant que les cycles annuels d'allocation de CfD soient maintenus).

Certains développeurs se contentent sûrement d'un TRI inférieur. Cela pourrait être le cas des développeurs de technologies hydroliennes, qui pourraient être plus intéressés par la possibilité de déployer leur technologie à grande échelle et de tirer des enseignements des résultats que de générer des rendements élevés.

7.3.4 Résumé

Nous avons analysé le LCOE et le IRR pour une ferme hypothétique de 40 turbines et 20 MW dans le Ramsey Sound, qui peuvent être résumés comme suit :

- En 2030, nous avons choisi des turbines de 0,5 MW, avec un diamètre de rotor de 15 m, et nous avons supposé une date de mise en service. Ce choix a été jugé approprié compte tenu des conditions environnementales et de l'état actuel du site.
- De plus, nous estimons que le LCOE du projet en 2030 est de 131 £/MWh, avec des limites supérieure et inférieure de 85-195 £/MWh. De plus, nous reconnaissons qu'il s'agit d'une fourchette d'incertitude assez large, en raison de la nature hypothétique du projet. Cependant, elle diminuera au fur et à mesure que l'industrie mûrira et que l'on acquerra davantage de connaissance, notamment concernant les taux d'apprentissage auxquels on peut accéder dans la réalité. Plus de certitude et de soutien de la part du gouvernement accélérerait le rythme de déploiement des turbines dans les eaux britanniques et d'accéder à la partie inférieure de l'estimation du LCOE.
- Un TRI du projet de 7,5 % nécessiterait un CfD de 191 £/MWh pour notre scénario de base. Ce chiffre est ramené à 120 £/MWh pour le scénario optimiste (en supposant un taux d'apprentissage plus élevé et des coûts initiaux plus faibles). En suivant les progrès de l'industrie au fil du temps, nous comprendrons mieux comment les coûts et les performances des appareils s'améliorent.
- Pour encourager l'investissement sur le site de Ramsey Sound en 2030, nous pensons qu'un CfD de l'ordre de 120-190 £/MWh devrait être accessible d'ici à 2025/26. Bien que cela soit inférieur au prix administratif de 211 £/MWh proposé par le gouvernement en 2022 (AR4), cela resterait probablement élevé par rapport à d'autres projets hydroliens

dans cette période (par exemple Meygen, PTEC, Morlais). Ce site pourrait nécessiter des flux de financement supplémentaires pour être pleinement compétitif (par exemple, des subventions régionales).

- Notre analyse porte sur un projet hypothétique et représentatif. Il est tout à fait plausible qu'un projet plus rentable puisse être déployé, par exemple, en augmentant la taille de l'éolienne ou la capacité de la ferme.

8 Résumé et recommandations

Dans cette étude, nous avons analysé le potentiel de TSE à Ramsey Sound dans le Pembrokeshire, au Pays de Galles. Nous avons examiné un certain nombre de questions différentes, notamment les antécédents, les ports d'intérêt, le résumé des conditions d'écoulement, l'analyse géospatiale de la zone disponible et la viabilité technico-économique. Dans cette section, nous résumons l'étude et formulons des recommandations sur les domaines à privilégier pour s'assurer que les avantages régionaux de l'EST sont bien exploités.

8.1 Résumé

Viabilité socio-économique

Le gouvernement gallois a indiqué qu'il soutenait fermement les énergies marines renouvelables. Ceci est mis en évidence par des programmes tels que le Welsh Government Coastal Communities Fund [11] SMARTCymru et les 100 millions de livres sterling alloués à l'énergie marine par les Fonds structurels européens. MEW est une organisation de premier plan au Pays de Galles qui se consacre à la promotion de l'énergie marine et qui dirige les sites d'essai META permettant aux développeurs de tester des modèles à l'échelle et des innovations.

Ensemble, le gouvernement gallois et le MEW font du Pays de Galles un lieu de prédilection pour les projets d'énergie marine. Le projet de Ramsey Sound aurait également des synergies potentielles avec les projets hydroliens en cours dans le nord du Pays de Galles (Morlais, Minesto's Holyhead Deep, Bardsey Sound) et un projet développé pourrait utiliser la même chaîne d'approvisionnement galloise. Cela pourrait toutefois constituer une concurrence pour le site de Ramsey Sound et rendre plus difficile l'accès aux aides financières. L'avantage de Ramsey Sound est qu'il débloquerait des bénéfices dans une partie complètement différente du Pays de Galles (les trois autres projets de TSE notables sont tous proches d'Anglesey), ce qui pourrait être intéressant pour les décideurs politiques qui cherchent à répartir les bénéfices sur l'ensemble du Pays de Galles.

Le port de Milford Haven se trouve à proximité du détroit de Ramsey et serait un port naturel à utiliser pour l'installation (et éventuellement l'exploitation et la maintenance). Ce pôle industriel développe ses offres en matière d'énergies renouvelables, comme en témoignent des projets tels que le programme marin de Pembroke Dock, d'une valeur de 60 millions de livres, et le projet Milford Haven Energy Kingdom, d'une valeur de 4,5 millions de livres. Bien que l'intérêt croissant pour les projets d'éoliennes flottantes en mer Celtique constitue une concurrence, il s'agit plus d'une opportunité que d'une menace. La chaîne d'approvisionnement en pleine expansion pourra proposer des opportunités à TSE (en particulier concernant l'assistance à la fabrication et les navires).

En 2020, le Pembrokeshire avait le taux de chômage le plus élevé de tout le pays de Galles et a connu un exode général des jeunes. Un projet d'énergie hydrolienne à Ramsey Sound pourrait revigorer la communauté, en apportant des emplois et des compétences à la population locale et en apportant un bénéfice net positif. Le détroit de Ramsey lui-même est assez inhospitalier, la seule activité importante étant les excursions en bateau autour de l'île de Ramsey. Un concept de marée submergé serait invisible et n'aurait donc pas d'impact

matériel sur la réputation de la région en tant que destination touristique populaire. La plus grande ville, St David's, est relativement petite (1 600 habitants). Bien qu'il soit nécessaire d'effectuer des travaux de génie civil pour raccorder un réseau d'énergie hydrolienne à la sous-station de 11 kV, les perturbations seraient faibles.

Viabilité environnementale

L'ensemble du site de Ramsey Sound se trouve dans une ZSC, l'île de Ramsey et le littoral de St David's Head étant désignés comme une SSSI. Des études universitaires ont indiqué que des réseaux plus importants (>10MW) à Ramsey Sound nécessiteraient une évaluation plus poussée pour garantir que les impacts environnementaux, notamment l'impact sur le transport des sédiments, restent faibles [42]. [42].

L'île de Ramsey, propriété de la RSPB, devrait également être Zones viables de l'appareil et développement de projet ; tout projet devrait réduire au minimum l'impact sur les oiseaux plongeurs. Ceci, combiné aux impacts potentiels sur le tourisme et la navigation de plaisance dans le détroit de Ramsey, signifie que les dispositifs à fond fixe seraient les plus appropriés.

Le développeur d'installations hydroliennes TEL a pu obtenir des baux à Ramsey Sound et à St-David's Head (pour ce dernier, il s'agit d'une installation de 10 MW). Cela signifie que les problèmes environnementaux potentiels pourraient être atténués grâce à une conception minutieuse du projet. Pour un tel projet, bien sûr, l'engagement avec la communauté et les parties prenantes locales telles que la RSPB serait primordial pour la réussite du projet. Une mise en place progressive du projet, plutôt que le déploiement d'une ferme de plus de 10 MW en une seule fois, obtiendrait l'adhésion de la communauté et d'acquérir les connaissances nécessaires pour que le projet puisse être installé en harmonie avec l'environnement.

Viabilité géospatiale

L'analyse du SIG a révélé plusieurs zones prometteuses pour le déploiement du TSE. Celles-ci sont résumées dans la [Figure](#) . Bien que la région soit plus adaptée à un dispositif plus petit (diamètre du rotor <15 m), il existe des zones au nord-ouest et au sud-ouest qui pourraient convenir à des dispositifs plus importants à l'échelle du service public et qui méritent d'être étudiées de manière plus approfondie. Cela se fera probablement après le développement des chaînes d'approvisionnement locales et le développement des sites britanniques à plus haut débit.

Les principaux facteurs limitant le déploiement sont la bathymétrie irrégulière, en particulier à l'intérieur de Ramsey Sound, et les conditions de débit. Il n'y a pas d'activité commerciale

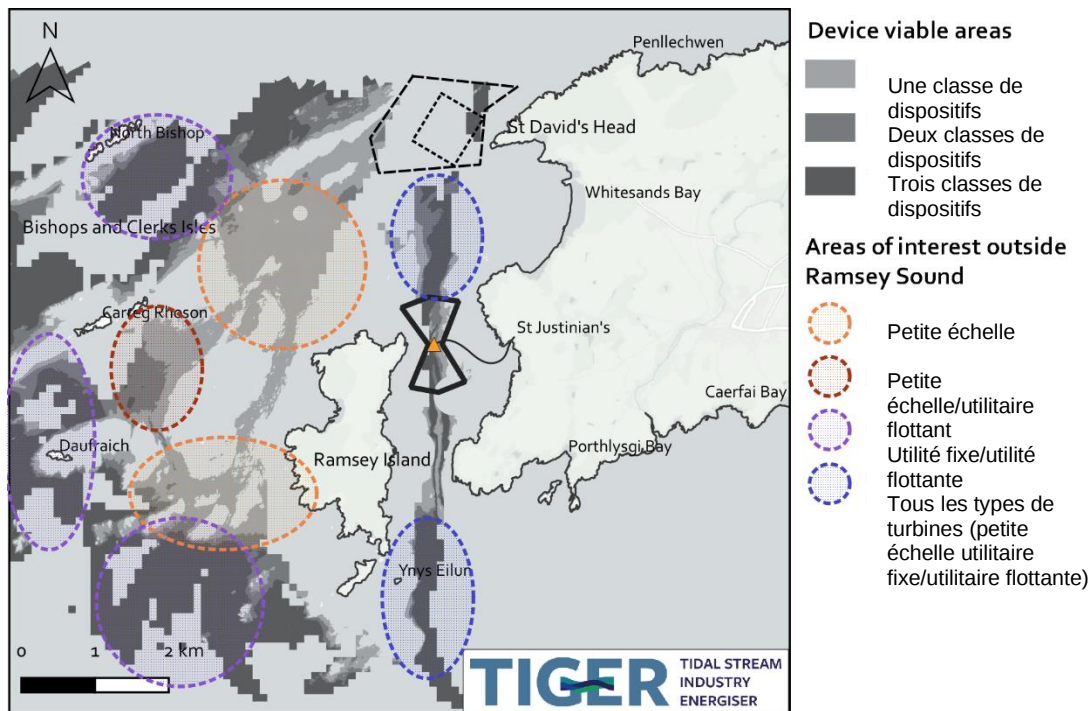


Figure 22 - Zones prometteuses en dehors de Ramsey Sound, telles qu'identifiées par l'analyse SIG. Les classes de dispositifs se réfèrent aux quatre dispositifs de référence décrits dans le tableau 4 (les zones viables pour chacun d'entre eux sont indiqués dans la Figure 16).

significative () ni de présence d'autres utilisateurs de la mer qui pourraient poser des problèmes pour un projet de TSE, comme le montrent les cartes de la section 6.

Ramsey Sound se caractérise par une bathymétrie irrégulière, avec notamment une fosse profonde de plus de 75 mètres et les récifs Horse Rock et The Bitches qui percent la surface. Cela a un impact sur le flux, qui est généralement considéré comme turbulent, mais suffisant pour l'extraction de l'énergie hydrolienne. C'est pourquoi il est essentiel de choisir un site dans le détroit de Gibraltar. Les pentes importantes signifient qu'une fondation sur pilotis est probablement la meilleure solution. Nous pensons que l'intérêt pour ce site augmentera avec le développement d'autres sites hydroliens commerciaux (par exemple Meygen, Morlais) et à mesure que les fondations sur pieux et la technologie des turbines plus petites deviendront plus économiques.

Viabilité technico-économique

À l'heure actuelle, nous pensons que le LCOE serait élevé pour un grand projet commercial. D'ici à 2030, la technologie se sera améliorée et les coûts seront réduits grâce au déploiement et aux améliorations technologiques. Nous estimons donc que cette date est raisonnable pour la mise en service d'un réseau commercial à Ramsey Sound.

D'ici à 2030, notre modèle indique qu'une ferme de 20 MW (40 turbines de 0,5 MW) pourrait être déployée à un LCOE de 85 à 195 £/MWh, avec une estimation centrale de 131 £/MWh (sur la base des coûts de 2012). Avec cette estimation centrale, nous pensons que £191/MWh serait un niveau suffisant pour un CfD. Cela garantirait un TRI de 7,5 % pour le projet et offrirait donc une perspective raisonnable pour les flux de financement privés. Pour un déploiement en 2030, un tel projet devrait obtenir un CfD d'ici à 2026. Bien que ce niveau semble relativement élevé par rapport au prix d'exercice de 211 £/MWh proposé par le gouvernement en 2022, il existe d'autres avantages régionaux pour le Pays de Galles et le Pembrokeshire qui pourraient motiver une majoration du prix (par exemple, l'emploi local, l'amélioration de la stabilité du réseau et la prévisibilité de l'énergie).

En outre, notre étude ne porte que sur un exemple de ferme hypothétique. Il existe de nombreuses options de projet qui pourraient débloquer des niveaux plus importants de

réduction des coûts, ramenant le LCOE à notre estimation optimiste de 106 £/MWh. Il pourrait s'agir, entre autres, d'économies d'échelle plus importantes grâce à des fermes plus grandes, d'une optimisation technico-économique du diamètre du rotor et de la puissance nominale de la turbine, ainsi que d'une meilleure stratégie d'exploitation et de maintenance.

Résumé général

D'après notre analyse, nous pensons que Ramsey Sound est un site qui a le potentiel de fournir des quantités significatives d'énergie prévisible à faible teneur en carbone. Le succès du site pourrait dépendre de la trajectoire des coûts des petites turbines de moins de 1 MW. Les perspectives commerciales de ce site s'amélioreront une fois que le TSE sera déployé à plus grande échelle. Il sera aussi probablement un site d'intérêt d'ici à 2030, à mesure que d'autres sites commerciaux seront développés et que des leçons seront tirées. L'emplacement unique de ce site lui confère des avantages économiques régionaux, et la proximité de Milford Haven et de Pembroke Dock pourrait permettre de réaliser d'importantes économies en termes de coûts de fabrication et d'exploitation. Le soutien du gouvernement gallois et de MEW sera utile pour aider le site à réaliser son plein potentiel, qui pourrait atteindre 50 à 100 MW si l'on considère les zones voisines à l'extérieur du détroit de Ramsey.

8.2 Recommandations

Cette étude nous permet de recommander les mesures suivantes pour l'avenir :

- **S'engager avec les fournisseurs de turbines et les universités** : dans le cadre du projet TIGER, nous avons constaté une collaboration efficace entre Cambrian Offshore et l'université de Plymouth dans l'évaluation du site de Ramsey Sound. L'histoire du TEL sur le site est bien documentée et il est important d'impliquer les fournisseurs de turbines pour s'assurer que l'intérêt pour le site est maintenu et amélioré.

Plusieurs entreprises testent la technologie à une échelle appropriée pour le site, notamment Sabella, SIMEC Atlantis, Verdant Power et Nova Innovation. En maintenant de bonnes lignes de communication avec ces fournisseurs, on s'assurera d'une concurrence suffisante, ce qui permettra de réduire les coûts des turbines à long terme.

- **Établir la viabilité du réseau** : WPD dirige le réseau de distribution au niveau régional. Les données de leur portail en ligne indiquent qu'il existe une capacité potentiellement limitée au point de connexion de la sous-station 33 kV de St-David. Des projets à plus grande échelle sont nécessaires pour atteindre les niveaux économiques, et WPD doit donc être impliqué dans les discussions pour s'assurer que la disposition du réseau est suffisante pour les projets.
- **Développer les liens avec le port de Milford Haven** : Comme nous l'avons mentionné, Milford Haven et Pembroke Dock sont un centre d'activité industrielle et représentent une opportunité impressionnante pour un projet à Ramsey Sound. Il sera nécessaire de sécuriser les postes d'amarrage et l'espace à quai pour un futur projet commercial, en particulier compte tenu du niveau élevé d'intérêt pour les projets d'éoliennes flottantes de la mer Celtique. Au fur et à mesure que les opportunités commerciales se multiplient, les développeurs de projets de TSE devront s'assurer qu'ils ont étudié la meilleure façon d'exploiter la chaîne d'approvisionnement dans les environs du port.

Le port de Milford Haven serait idéal pour la fabrication et les opérations, mais il pourrait être trop éloigné pour servir de base d'opérations. Nous recommandons d'analyser les options portuaires plus locales pour voir s'il existe des solutions locales plus viables, ce qui pourrait particulièrement être le cas pour les petits appareils.

- **Établir la faisabilité des sites voisins :** Ramsey Sound et St-David's Head sont bien connus comme étant des cibles commerciales antérieures de TEL. Cette analyse a révélé d'autres sites intéressants (Figure), en particulier pour des dispositifs plus importants à l'échelle du service public. Bien que les vitesses d'écoulement soient inférieures à celles d'autres sites commerciaux (par exemple, Meygen), ils pourraient convenir comme sites de deuxième génération, particulièrement si l'on considère les synergies et les enseignements tirés d'un projet plus petit dans le Ramsey Sound. Nous recommandons que ces sites soient analysés plus en détail d'un point de vue technico-économique afin de comprendre quel serait le rendement et les principaux facteurs de coût. La modélisation des flux sera également cruciale pour comprendre comment les effets de sillage et de blocage des fermes individuelles se répercuteraient sur les zones voisines.
- **Susciter l'adhésion de la communauté locale :** la région est une destination touristique populaire et une ferme hydrolienne améliorerait l'emploi local et de diversifier l'économie locale. La communauté sera consciente des problèmes liés au déploiement du TEL et pourrait se montrer réticente à l'égard de futurs projets de TSE. Nous recommandons d'engager le dialogue avec la communauté dès le début afin de comprendre ses opinions et d'encourager son soutien. Un modèle de propriété communautaire, dans lequel la communauté a un intérêt dans un projet marémoteur et peut financièrement en bénéficier, pourrait être un moyen d'accroître le soutien et la sensibilisation.

Références

- [1] PEMBROKESHIRE COAST NATIONAL PARK, "Supplementary Planning Guidance : Seascape Character Assessment : Ramsey Island coastal waters : S," 2013.
- [2] PMSS au nom de l'Agence galloise de développement, "Wales Marine Energy Site Selection", 2006.
- [3] TIDAL ENERGY Limited, "DeltaStream Demonstration : Ramsey Sound, Pembrokeshire", 2008.
- [4] E.ON, "E.ON and Lunar Energy announce proposal to build one of the world's largest tidal stream power stations off the Welsh coast", 25 octobre 2007. [en ligne]. Disponible : <https://www.eonenergy.com/about-eon/media-centre/eon-and-lunar-energy-announce-proposal-to-build-one-of-the-worlds-largest-tidal-stream-power-stations-off-the-welsh-coast/>. [consulté le 6 juillet 2021].
- [5] Regeneris Consulting, "The Economic Impact of the Development of Marine Energy in Wales", 2013.
- [6] BBC, "Failed Ramsey Sound tidal energy scheme 'faulty for months'", 12 décembre 2016. [En ligne]. Disponible : <https://www.bbc.co.uk/news/uk-wales-politics-38236014>. [consulté le 6 juillet 2021].
- [7] Tidal Energy Ltd, "DeltaStream Demonstrator Project : Non-technical summary," 2009.
- [8] Tidal Energy Ltd, "Tidal Stream Energy Demonstration Array St David's Head, Pembrokeshire : Environmental Scoping Report," 2012.
- [9] Cadw, "Pan-Wales heritage interpretation plan : Wales - the first industrial nation," 2011.
- [10] T. M. a. L. Kitson, "The End of Coal Mining in South Wales : Lessons learned from industrial transformation", Institut international du développement durable, 2017.
- [11] The National Lottery Community Fund, "The Welsh Government Coastal Communities Fund", The National Lottery Community Fund, [En ligne]. Disponible : <https://www.tnlcommunityfund.org.uk/funding/programmes/coastal-communities-fund>. [consulté le 8 juillet 2021].
- [12] Gouvernement gallois, "Small Scale Coastal Infrastructure Scheme", gouvernement gallois, 2021.
- [13] Energy Wales Marine Energy Task and Finish Group, "Marine Energy Plan for Wales - Unlocking the Energy in Our Seas", 2015.
- [14] Marine Energy Wales, "State of the Sector 2020 : Economic Benefit for Wales", Marine Energy Wales, 2020.
- [15] Gouvernement de l'Assemblée galloise, "Marine Renewable Energy Strategic Framework : Approche du développement durable", 2011.

- [16] Gouvernement gallois, *Kery Facts : SMARTCymru*, 2017.
- [17] Business Wales, "SMART Cymru soutient Bombora dans le développement de mWave, un générateur d'énergie houlomotrice à membrane" [en ligne]. Disponible : <https://businesswales.gov.wales/expertisewales/product/bombora-wave-power-europe-limited/smart-cymru-supports-bombora-develop-mwave-membrane>. [consulté le 8 juillet 2021].
- [18] Swansea-Based Company Raises GBP 1 Mln for Wave Device Development, "OffshoreWIND.biz", 8 juillet 2014. [en ligne]. Disponible : <https://www.offshorewind.biz/2014/07/08/swansea-based-company-raises-gbp-1-mln-for-wave-device-development/>. [consulté le 8 juillet 2021].
- [19] Bloomberg, "Welsh Government Awards €14.9 Million of EU Funding to Leading Marine Energy Developer Minesto," 31 mai 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.bloomberg.com/press-releases/2019-05-31/welsh-government-awards-14-9-million-of-eu-funding-to-leading-marine-energy-developer-minesto>. [consulté le 8 juillet 2021].
- [20] Marine Energy Wales, "WEST ANGLESEY TIDAL DEMONSTRATION ZONE", [En ligne]. Disponible : <https://www.marineenergywales.co.uk/marine-energy-in-wales/demonstration-zones/anglesey-demonstration-zone/>. [consulté le 8 juillet 2021].
- [21] Morlais Energy, "Partners", [En ligne]. Disponible : <https://www.morlaisenergy.com/partners/>. [consulté le 8 juillet 2021].
- [22] Minesto, "Deep Green Holyhead Deep Project Phase 1 (0.5MW) : Non-technical Summary", 2016.
- [23] Minesto, "Holyhead Deep - the world's first low-flow tidal stream project", [En ligne]. Disponible : <https://minesto.com/projects/holyhead-deep>. [consulté le 8 juillet 2021].
- [24] PACEC, "Profil économique du Pembrokeshire : Final Report from PACEC," Pembrokeshire County Council, 2015.
- [25] Gouvernement gallois, "Summary statistics for South West Wales region", 2020.
- [26] Cambrian Offshore South West Ltd, "Ramsey Sound site description", non publié, 2020.
- [27] Marine Energy Wales, "Marine Energy Test Area secures Marine Licence", 25 janvier 2021. [en ligne]. Disponible : <https://www.meta.wales/news/marine-energy-test-area-secures-marine-license/>. [consulté le 7 juillet 2021].
- [28] A. Ajdin, "EMEC renforce son alliance avec META", Offshore Energy, 6 mai 2020. [en ligne]. Disponible : <https://www.offshore-energy.biz/emec-strengthens-alliance-with-meta/>. [consulté le 7 juillet 2021].
- [29] A. Garanovic, "META tidal stream resources up for assessment", Offshore Energy, 15 JUIN 2021. [en ligne]. Disponible : <https://www.offshore-energy.biz/meta-tidal-stream-resources-up-for-assessment/>. [consulté le 7 juillet 2021].

- [30] Wave Hub Ltd, "Pembrokeshire Demonstration Zone : Advancing Offshore Renewable Energy", Wave Hub Ltd,.
- [31] Port de Milford Haven, "Oil & Gas", [En ligne]. Disponible : <https://www.mhpa.co.uk/oil-and-gas/>. [consulté le 9 juillet 2021].
- [32] Carbon Trust, "Future Potential for Offshore Wind in Wales", gouvernement gallois, 2018.
- [33] Université de Cardiff, "An analysis of economic activity dependent on the Milford Haven Waterway", Milford Haven Port Authority, 2012.
- [34] Port de Milford Haven, "PEMBROKE PORT DEVELOPMENTS", [En ligne]. Disponible : <https://www.mhpa.co.uk/pembroke-port-developments/>. [consulté le 9 juillet 2021].
- [35] Pembroke Port, "PORT SUBMITS PLANNING APPLICATION TO PREPARE SITE FOR MAJOR £60M MARINE RENEWABLE ENERGY DEVELOPMENT", 18 décembre 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.pembrokeport.com/news/port-submits-planning-application-to-prepare-site-for-major-60m-marine-renewable-energy-development/>. [consulté le 9 juillet 2021].
- [36] Offshore Renewable Energy Catapult, "Benefits of floating offshore wind to Wales and the South West", 2020.
- [37] M. Dolman, W. Nock et S. King, "Hydrogen development in Wales", Element Energy, Cambridge, 2020.
- [38] Centre européen de l'énergie marine (EMEC), "HYDROGEN R&D FACILITIES", [En ligne]. Disponible : <http://www.emec.org.uk/facilities/hydrogen/>. [consulté le 12 juillet 2021].
- [39] R. Flynn, "EMEC's Hydrogen Journey", 2019.
- [40] Business Live, "Stena Line cancels Fishguard-Rosslare sailings for a week", 12 février 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.business-live.co.uk/ports-logistics/stena-line-cancels-fishguard-rosslare-19825963>. [consulté le 13 juillet 2021].
- [41] RWE, "RWE launches its Pembroke Net Zero Centre to help drive decarbonisation in South Wales", 26 mai 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.rwe.com/en/press/rwe-generation/2021-05-26-rwe-launches-its-pembroke-net-zero-centre>. [consulté le 13 juillet 2021].
- [42] D. Haverson, J. Bacon, H. C. Smith, V. Venugopal et Q. Xiao, "Modelling the hydrodynamic and morphological impacts of a tidal stream development in Ramsey Sound," *Renewable Energy*, vol. 126, pp. 876-887, 2018.
- [43] M. Harrold, P. Ouro et T. O'Doherty, "Performance assessment of a tidal turbine using two flow references," *Renewable Energy*, vol. 153, pp. 624-633, 2020.
- [44] Tidal Energy Ltd, "DeltaStream Demonstration : Scoping report", 2008.

- [45] P. Evans, S. Armstrong, C. Wilson, I. Fairley, C. Wooldridge et I. Masters, "Characterisation of a highly energetic tidal energy site with specific reference to hydrodynamics and bathymetry," in *EWTEC*, Aalborg, 2013.
- [46] M. Harrold et P. Ouro, "Rotor loading characteristics of a full-scale tidal turbine", *Energies*, vol. 12, p. 1035, 2019.
- [47] E. Bell, "The recovery of seabird populations on Ramsey Island, Pembrokeshire, Wales, following the 1999/2000 rat eradication," in *Island invasives : scaling up to meet the challenge*, Gland, Suisse, UICN, 2019, pp. 539-544.
- [48] P. A. Gillibrand, R. A. Walters et J. McIlvenny, "Numerical simulations of the effects of a tidal turbine array on near-bed velocity and local bed shear stress," *Energies*, vol. 9, p. 852, 2016.
- [49] Université de Strathclyde, "Methodology for a Decision Support Tool for a Tidal Stream Device", 2014. [en ligne]. Disponible : http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/13-14/Tidal/site.html. [consulté le 15 juillet 2021].
- [50] M. Togneri et I. Masters, "Micrositing variability and mean flow scaling for marine turbulence in the Ramsay Sound", *J. Ocean Eng. Mar. Energy*, vol. 2, pp. 35-46, 2016.
- [51] ABPmer, "Sustainable management of marine natural resources - Mapping natural resources", gouvernement gallois, 2020.
- [52] PEMBROKESHIRE COAST NATIONAL PARK, "Pembrokeshire Coast National Park Seascape Character Assessment : St David's Head", 2019.
- [53] S. L. Ward, M. R. Hashema et S. P. Neill, "Characterising the tidal energy resource of Pembrokeshire," in *4th Oxford Tidal Energy Workshop*, Oxford, 2015.
- [54] IRENA, "FUTURE OF WIND : Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects", Agence internationale pour les énergies renouvelables, Abu Dhabi, 2019.
- [55] T. Karna, S. C. Kramer, L. Mitchell, D. A. Ham, M. D. Piggott et A. M. Baptista, "Thetis coastal ocean model : discontinuous Galerkin discretization for the three-dimensional hydrostatic equations," *Geoscientific Model Development*, vol. 11, p. 4359-4382, 2018.
- [56] F. Rathgeber, D. A. Ham, L. Mitchell, M. Lange, F. Luporini, A. T. McRae, G. T. Bercea, G. R. Markall et P. H. Kelly, "Firedrake : Automating the finite element method by composing abstractions," *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol. 43, 2016.
- [57] A. Avdis, A. S. Candy, J. Hill, S. C. Kramer et M. D. Piggott, "Efficient unstructured mesh generation for marine renewable energy applications", *Renewable Energy*, vol. 116, p. 842-856, 2018.
- [58] Université de Bangor, "UKHO Tide Gauge Data Network", 2017.
- [59] Seazone Solutions Ltd, "Edina Digimpa Service. Hydrospatial one. Gridded bathymetry," 2014.

- [60] L.Mackie, P.S.Evans, M.J.Harrold, T.O'Doherty, M.D.Piggott et A.Angeloudis, "Modelling an energetic tidal strait : investigating implications of common numerical configuration choices," *Applied Ocean Research*, 2021.
- [61] Voyages de découverte, "Ramsey Island Voyage", 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.ramseyisland.co.uk/boat-trips/ramsey-island-voyage/>. [consulté le 26 5 2022].
- [62] Parc national de la côte du Pembrokeshire, "Seascape Character Area Descriptio : St Brides Bay", 2013.
- [63] ICF Incorporated, L.L.C., "Comparison of environmental effects from different offshore wind turbine foundation," U.S. Department of the Interior Bureau of Ocean Energy Management (BOEM), Fairfax, VA, USA, 2021.
- [64] Parc éolien offshore du Dogger Bank, "Parc éolien offshore du Dogger Bank : Decommissioning Programme", 2020.
- [65] D. S. Coles, M. Lucas, D. White et J. Miles, "Cost modelling and design optimisation of tidal stream turbines," in *European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC)*, Plymouth, UK, 2021.
- [66] D. Coles et al, "A review of the UK and British Channel Islands practical tidal stream energy resource," *Proc. R. Soc. A*, vol. 477, no. 20210469, 2021.
- [67] Offshore Renewable Energy Catapult, "TIDAL STREAM AND WAVE ENERGY COST REDUCTION AND INDUSTRIAL BENEFIT", Glasgow, 2018.
- [68] O. K. Helgesen, "Equinor and Orsted see green energy ambitions hit profitability headwinds," *Upstream*, 17 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.upstreamonline.com/energy-transition/equinor-and-orsted-see-green-energy-ambitions-hit-profitability-headwinds/2-1-1031016>. [consulté le 27 6 2022].
- [69] SEENEOH, "Tidal site development guidelines : Site Selection Methodology (deliverable WP T1.1.3)," projet TIGER, 2021.
- [70] A. Iyer, S. Couch, G. Harrison et A. Wallace, "Variability and phasing of tidal current energy around the United Kingdom," *Renewable Energy*, vol. 51, pp. 343-357, 2013.
- [71] NATIONAL GEOSPATIAL-INTELLIGENCE AGENCY, "WORLD PORT INDEX : TWENTY-SEVENTH EDITION," THE UNITED STATES GOVERNMENT, Springfield, Virginia, 2009.
- [72] Marine Scotland, "ectoral marine plan for offshore wind energy : social and economic impact assessment scoping report", gouvernement écossais, 2018.
- [73] The Offshore renewable Energy Catapult, "Floating offshore wind constraint mapping in the Celtic Sea", 2020.
- [74] M. Glarou, M. Zrust et J. C. Svendsen, "Using Artificial-Reef Knowledge to Enhance the Ecological Function of Offshore Wind Turbine Foundations : Implications for Fish Abundance and Diversity," *J. Mar. Sci. Eng.* vol. 8, p. 332, 2020.

[75] Rémi Collombet et Donagh Cagney, "Last stop to 2025 : a 2022 action plan to deliver on the Offshore Strategy's Ocean Energy Target", Ocean Energy Europe, 2022.

Appendix A. Contraintes

Tableau A1. 1 - Contraintes considérées pour estimer le potentiel technique et économique de la région. Les éléments en orange sont des contraintes fortes, les éléments en jaune sont des contraintes faibles qui ont été considérées de manière plus qualitative.

Ensemble de données	Source(s) de données	Raison d'être	Contrainte prise en compte
Vitesse de la marée	Université de Plymouth (modèle THETIS)	L'énergie cinétique du flux de marée est proportionnelle au cube de la vitesse de la marée. Cela signifie que le flux de marée est sans doute le facteur le plus important lors de l'implantation d'un projet, afin de s'assurer qu'il peut produire beaucoup d'électricité. La vitesse maximale moyenne de la marée de printemps est la vitesse maximale de la marée observée lors d'une marée de printemps moyenne. Il s'agit d'un indicateur de la ressource globale sur le site, qui peut être utilisé comme une mesure de sélection de haut niveau. Pour les appareils typiques, le niveau minimum pour une extraction économique de la puissance est recommandé à 2,5 m/s [69]. Parfois, le courant de ressort maximal métrique est considéré à la place, dans la fourchette de 2 m/s [49] à 2,5 m/s [70].	Vitesse de pointe moyenne du ressort
Bathymétrie	Portail IMARDIS Portail de données de l'Amirauté	On considère généralement que la profondeur d'eau appropriée pour les dispositifs de première génération se situe de 20 à 60 m [70] [69]. Le déploiement est limité dans les eaux peu profondes car pour des raisons de sécurité, un espace libre suffisant est nécessaire au-dessus des pales du rotor. Le déploiement en eaux plus profondes augmentera les coûts et la complexité de l'installation et de la récupération des dispositifs (en particulier ceux qui sont fixés au fond de la mer). Par conséquent, ces sites en eaux profondes ne seraient pas prioritaires par rapport aux zones moins profondes et plus faciles d'accès.	Eaux peu profondes
			Eaux profondes

Ensemble de données	Source(s) de données	Raison d'être	Contrainte prise en compte
		Comme la région examinée de Ramsey Sound est relativement peu profonde, avec des profondeurs d'eau maximales de 80 m, aucune contrainte relative aux eaux profondes n'a pas été appliquée.	
Pente des fonds marins	Calculé dans le SIG à partir des données bathymétriques	La pente du fond marin peut avoir un impact sur le type de fondation qui convient. Les fondations à base gravitaire, historiquement plus courantes pour les dispositifs de courant de marée, nécessitent un fond marin plat. Les monopieux peuvent être déployés dans des conditions de pente plus extrêmes. Cela dépendra des spécificités de la conception et des conditions du fond marin et nécessitera une analyse technique détaillée pour le déterminer. Une valeur représentative de 15° a été utilisée sur la base de l'expertise de l'OREC.	Gradients extrêmes
Zones de concessions pour les énergies renouvelables en mer	Le Domaine de la Couronne	Il s'agit notamment des zones maritimes autorisées à accueillir des projets éoliens et houlomoteurs en mer.	Proche des zones de concession d'énergies renouvelables en mer
Ports	Index mondial des ports [71]	Les turbines hydroliennes peuvent constituer un danger pour la navigation. C'est particulièrement le cas pour les réseaux de dispositifs flottants, bien que cela puisse également s'appliquer aux dispositifs fixes, en fonction de la profondeur de l'eau, car un espace libre approprié est nécessaire au-dessus des rotors. Le trafic de pêche étant plus important autour des ports, une zone tampon de 1 km a été appliquée au concept de dispositif flottant. Les restrictions imposées aux dispositifs fixes sont considérées par la bathymétrie et ne sont donc pas incluses ici.	Près des ports

Ensemble de données	Source(s) de données	Raison d'être	Contrainte prise en compte
		Les emplacements des ports proviennent de l'Index mondial des ports et sont complétés par des ports locaux et des jetées plus petits, identifiés à l'aide de cartes et d'images satellites.	
Extraction de granulats	Le Domaine de la Couronne	Il s'agit de zones où des agrégats sont extraits pour l'industrie de la construction. Les zones font l'objet d'une licence délivrée par The Crown Estate.	Dans les zones d'extraction de granulats
Déversement de boues de dragage	EMODnet	Il s'agit de zones où sont déversés les sédiments de dragage. Ces matériaux sont produits lors du dragage des ports, périodiquement nécessaire pour garantir que le chenal portuaire est d'une profondeur appropriée pour les navires. En réalité, le développement d'une ferme hydrolienne dans ces zones nécessiterait une étude socio-économique complète, sans qu'aucune loi ne l'interdise explicitement (par exemple [72]). Ces zones sont toutefois considérées comme des exclusions dures aux fins de la présente étude, car elles ajouteraient des complications et des considérations supplémentaires.	Dans les zones de dépôt de boues de dragage
Zones d'élimination des munitions	EMODnet	Il s'agit des endroits où des munitions ont été immergées en mer. Il s'agit de munitions conventionnelles et chimiques.	Dans les zones d'élimination des munitions
Infrastructures pétrolières et gazières	Autorité du pétrole et du gaz (OGA)	Inclut les puits de pétrole et de gaz en activité, les câbles et les zones de concession.	Proche des infrastructures pétrolières et gazières
Accords sur les sites de gaz naturel et de CSC	Le Domaine de la Couronne	Certains projets disposent de licences de stockage de gaz naturel ou de dioxyde de carbone provenant du captage et du stockage du carbone (CSC). Aucun d'entre eux ne coïncide avec la zone du détroit	Dans les zones couvertes par l'accord

Ensemble de données	Source(s) de données	Raison d'être	Contrainte prise en compte
		de Ramsey considérée, seuls trois sites ayant fait l'objet de tels accords en Angleterre, au Pays de Galles et en Irlande du Nord.	
Trafic maritime	IMO	Le plan de séparation du trafic de l'OMI et les zones à éviter recommandées ont été inclus comme contraintes.	Dans les zones désignées et les plans de séparation
	EMODnet	Les couches de densité des navires, dérivées des données AIS, ont également été utilisées comme contrainte souple.	Là où le trafic maritime est important
Naufrages	Portail de données de l'Amirauté	Les épaves peuvent avoir une importance historique et être potentiellement dangereuses pour les opérations. Une zone tampon de 500 m autour des épaves est envisagée, conformément à des études similaires (par exemple [73]).	Près des épaves
Distance par rapport au rivage	Calculé dans le SIG	La distance par rapport à la côte peut être considérée comme un indicateur de la longueur du câble d'exportation. Si le câble d'exportation vers la côte est trop long, les projets ne seront pas rentables, car trop d'énergie sera perdue dans les câbles. Les dispositifs de marée flottants pourraient être considérés comme un handicap visuel, ayant un impact négatif sur les communautés locales et le tourisme. Ce facteur n'a pas été considéré dans les projets hydroliens précédents et ne deviendrait probablement un problème que pour les grandes exploitations situées à proximité de zones plus peuplées, et n'est donc pas considéré comme un facteur.	Près du rivage
			Loin du rivage
Type de fond marin	Société géologique britannique	La géologie du fond marin influencera le choix des fondations. En général, les bases gravitaires conviennent mieux aux types de fondations rocheuses et plus dures, où le fond marin nécessite moins	Dans les zones présentant certains types de sédiments marins

Ensemble de données	Source(s) de données	Raison d'être	Contrainte prise en compte
		de préparation. Elles conviennent moins bien aux sédiments très mous. [63]. À l'inverse, les monopieux conviennent mieux aux fondations plus souples, où il est plus facile d'enfoncer les pieux dans le fond marin. Si le substratum rocheux est peu profond, il faut procéder à un forage préalable, ce qui prend du temps, coûte de l'argent et nécessite un équipement plus spécialisé. Les graviers grossiers peuvent rendre les monopieux plus difficiles à empiler [63].	
Zones protégées	EMODnet	La région du Pembrokeshire coïncide avec plusieurs zones protégées : SPA SAC SSSI La majorité des zones de marée prometteuses se trouvent dans une ou plusieurs de ces zones. Puisque les sites de Ramsey Sound et de St-David's Head ont obtenu des licences dans ces zones, on suppose qu'ils ne constituent pas un obstacle au déploiement des EST.	Dans les zones de protection de l'environnement
Activité de pêche	Observatoire mondial de la pêche	Les énergies renouvelables en mer et la pêche commerciale n'ont pas tendance à coïncider. Il existe des synergies qui font l'objet de recherches, par exemple l'économie bleue, les applications multi-usages où les fermes piscicoles pourraient être installées en même temps que les parcs éoliens en mer. C'est notamment le cas pour les pays disposant de petites ZEE, comme la Belgique. Les parcs éoliens	Dans les zones de forte activité de pêche

Ensemble de données	Source(s) de données	Raison d'être	Contrainte prise en compte
		offshore peuvent également servir de zones de frai ou d'alevinage. [74]avec des récifs se formant autour de l'infrastructure offshore. En général, les projets d'énergie renouvelable en mer sont considérés comme ayant des effets négatifs sur la pêche. Il s'agit par exemple du déplacement des populations de poissons indigènes en raison du bruit et des perturbations liées à la construction et aux activités d'exploitation et de maintenance, et de la présence de câbles sous-marins qui interdisent le chalutage. Comme le rotor mobile est immergé, les turbines hydroliennes sont sans doute plus problématiques pour la pêche. En raison de l'absence de fermes hydroliennes commerciales, on dispose de peu d'informations sur les activités de pêche qui pourraient être autorisées à l'intérieur des limites des fermes hydroliennes. Cette étude étant une étude de cadrage de haut niveau, la pêche est considérée comme une contrainte douce, les zones de pêche à haute densité étant évitées dans la mesure du possible.	
Distance par rapport au réseau	Calculé dans le SIG à partir des données du WPD	Si l'atterrissement du câble est trop éloigné d'une sous-station ou d'un câble approprié, des améliorations du réseau seront nécessaires, ce qui peut s'avérer très coûteux. Pour les premiers projets prévus à Ramsay Sound, on suppose qu'ils devront être proches du réseau pour être économiquement viables.	Loin du réseau (onshore)

