



# Interreg



## France ( Channel Manche ) England

**LIVRABLE D222 APPLICATION DES OUTILS  
D'ÉVALUATION DE L'ÉNERGIE MARÉMOTRICE ET DE  
L'ÉNERGIE DES VAGUES À L'ÎLE DE PORTLAND**

*MARS 2023*



## Rapport ICE T2.2.2 : Application de l'outil d'évaluation de l'énergie marémotrice et de l'énergie des vagues à l'île de Portland

---

Jon Miles, Juliette Jackson

Traduit de l'anglais à l'aide de Google Translate



BRETAGNE  
DÉVELOPPEMENT  
INNOVATION



TECHNOPÔLE  
BREST-TROISE

Technopole  
Quimper-Cornouaille



UNIVERSITY OF  
EXETER

PLYMOUTH  
UNIVERSITY

UEA  
University of East Angles

marine  
TECHNOLOGIES

### À propos de l'ICE

Porté par Interreg VA France (Manche) Angleterre, le projet Intelligent Community Energy (ICE), vise à concevoir et mettre en œuvre des solutions énergétiques intelligentes innovantes pour les territoires isolés de l'espace Manche. Les îles et les communautés isolées font face à des défis énergétiques uniques. De nombreuses îles ne sont pas connectées à des systèmes de distribution d'électricité plus larges et dépendent d'approvisionnements énergétiques importés, généralement alimentés par des combustibles fossiles. Les systèmes énergétiques dont dépendent les communautés isolées ont tendance à être moins fiables, plus chers et ont plus d'émissions de gaz à effet de serre (GES) que les systèmes de réseau du continent. En réponse à ces problèmes, le projet ICE considère l'ensemble du cycle énergétique, de la production à la consommation, et intègre des technologies nouvelles et établies afin de fournir des solutions de systèmes énergétiques innovantes. Le consortium ICE rassemble des chercheurs et des organisations de soutien aux entreprises en France et au Royaume-Uni, et l'engagement avec les PME soutiendra le déploiement du projet et favorisera la coopération européenne.



BRETAGNE  
DÉVELOPPEMENT  
INNOVATION



TECHNOPÔLE  
BREST-TROÏSE

Technopole  
Quimper-Cornouaille



UNIVERSITY OF  
EXETER

PLYMOUTH  
UNIVERSITY

UEA  
University of East Anglia

marine  
SOLUTIONS

## Partie 1 : Approvisionnement en énergie de l'île de Portland à l'aide de l'énergie marémotrice en cours d'eau .

Dr Jon Miles

Section	Numéro de page
Abstrait	3
Introduction	3
Courants de marée	4
Modélisation du flux de marée	6
Détail du calcul de la vitesse des marées	6
Amplitude de la vitesse des marées	7
Fréquences	8
Données de flux de marée générées pour Portland	9
Bill	
Turbine marémotrice	dix
Production d'électricité par les hydroliennes In-stream	11
Modélisation de puissance	11
Application en relation avec les besoins en puissance de Portland	12
Discussion	13
conclusion	14
Les références	15

## Partie 2 : Approvisionnement énergétique de l'île de Portland à l'aide de l'énergie des vagues.

Dr Juliette Jackson et Dr Jon Miles

Section	Numéro de page
Abstrait	16
Introduction	16
Données des bouées flottantes	19
Statistiques des vagues	21
Calcul de la puissance des vagues	25
Efficacité de conversion énergétique	28
Capacité houlomotrice dans le temps	29
Application en fonction des besoins en puissance de la zone d'intérêt	31
Les références	32

### Remerciements

Le soutien financier pour ce travail a été reçu par le biais du projet INTERREG France Channel England (FCE) de la Commission européenne Intelligent Community Energy (ICE).



## Approvisionnement en énergie de l'île de Portland à l'aide de l'énergie marémotrice en cours d'eau.

Dr Jon Miles

### Abstrait

Une option pour les communautés insulaires et isolées avec de forts courants de marée est de récolter l'énergie en utilisant des turbines marémotrices en cours d'eau. L'île de Portland (sud du Royaume-Uni) compte une petite communauté de 12 800 personnes. Il est connu pour avoir de forts courants de marée au large de la pointe sud de l'île, atteignant 7 nœuds. À l'aide des données cartographiques de l'Amirauté britannique du site, une méthode de génération de séries chronologiques de la vitesse d'écoulement sur le site est démontrée, en calculant les composantes de courant solaire (S2), lunaire (M2) bimensuelle et résiduelle. Les caractéristiques de production d'énergie d'un exemple d'hydrolienne (Sabella) sont utilisées pour générer une série temporelle de production d'énergie pour une seule turbine. La production annuelle d'énergie d'une seule turbine est calculée à 1 183 MWh sur le site. Avec des hypothèses de consommation individuelle d'électricité de 2 900 kWh par personne et par an (Ofgem, 2022), on estime qu'un parc de 32 turbines couvrirait les besoins de la population, mais des solutions telles que le stockage ou l'approvisionnement alternatif seraient nécessaires pour les périodes d'étales.

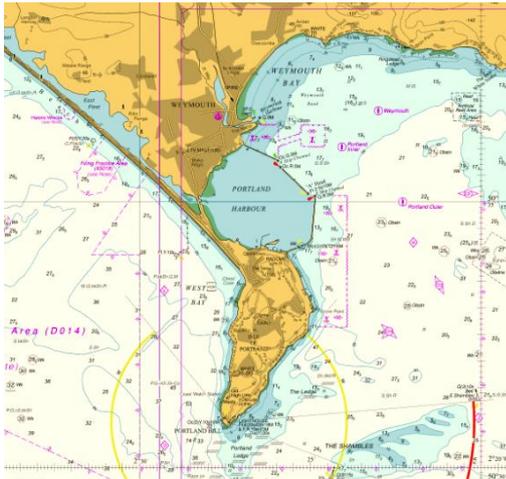
### Introduction

L'île de Portland est une île au large de la côte sud du Royaume-Uni, rattachée au continent par une courte flèche. L'île est connue pour avoir de forts courants de marée au large de Portland Bill, la pointe sud de l'île. Cet article étudie l'énergie marémotrice qui pourrait être obtenue à partir des courants au large de Portland Bill, et considère cela dans le contexte des besoins énergétiques des personnes vivant sur l'île. Pour ce faire, une indication de la force des courants de marée sur les sites est obtenue à partir des cartes de l'Amirauté britannique. Un exemple d'hydrolienne possible est considéré, de telle sorte que les caractéristiques de production d'énergie puissent être incorporées. Une série chronologique des vitesses d'écoulement sur les sites est modélisée à l'aide des principaux constituants lunaires et solaires. La puissance de sortie d'un appareil individuel est calculée. Le nombre d'éoliennes et la longueur d'une clôture d'éoliennes suffisantes pour alimenter toute l'île sont alors estimés.

### Courants de marée

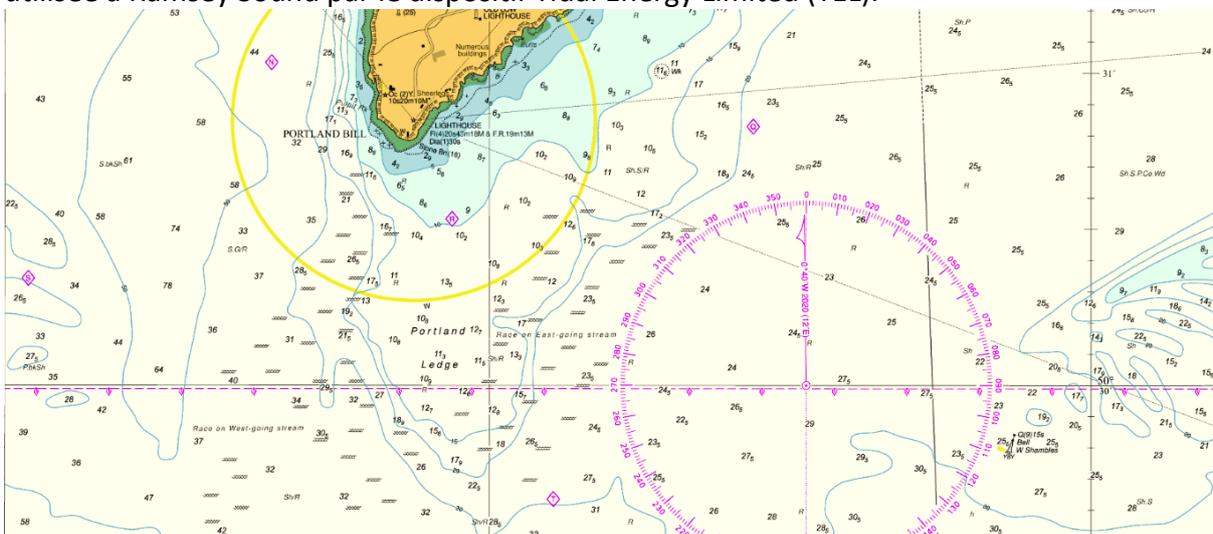
La forme générale de l'île de Portland est illustrée à la figure 1. Pour cet article, un site a été identifié à Portland Bill, à l'extrémité sud de l'île.





**Figure 1 :** Section recadrée de la carte 2615 de l'Amirauté britannique montrant l'île de Wight (pas pour la navigation). Reproduit à des fins de recherche à l'aide d'Edina Digimap .

La figure 2 montre la bathymétrie plus en détail, indiquant une course de marée sur le Portland Ledge relativement peu profond (~ 10 m de profondeur d'eau). Au sud de celle-ci, la profondeur de l'eau augmente. Un diamant de marée, où les vitesses des courants sont connues, est évident sur la carte à l'emplacement <T>, à environ 30 m de profondeur d'eau. La profondeur de 30 m offre un potentiel pour une turbine de 10 m de diamètre avec un dégagement de 10 m au-dessus et au-dessous, et est une profondeur similaire à celle utilisée à Ramsey Sound par le dispositif Tidal Energy Limited (TEL).



**Figure 2 :** La pointe sud de l'île de Portland, montrant le diamant de marée <T> au sud-est de Portland Ledge. Reproduit à des fins de recherche uniquement à l'aide d'Edina Digimap , basé sur la carte de l'Amirauté 2035 (pas pour la navigation).

Les cartes de l'Amirauté britannique indiquent une variété de diamants de marée dans la zone générale. À la position de ces diamants, des mesures ont été effectuées par l'Amirauté britannique de la vitesse d'écoulement pendant les marées de printemps et pendant les marées de Neap, par temps calme. Les données pour le diamant de marée <T> sont données à la figure 3. Les données de diamant de marée des cartes peuvent être utilisées



pour donner les débits maximaux aux marées de printemps et de morte-eau, à la fois pour la marée montante et descendante, ce qui permet une modélisation ultérieure du débit. séries temporelles de vitesse. Ces données ont été utilisées pour vérifier la performance des modèles à haute résolution de vitesse d'écoulement ( p. ex. Haverson et al., 2018). Les données clés pour Portland utilisées dans l'analyse ici sont présentées dans le tableau 1. Les débits maximaux des marées de printemps au diamant T sont de 7,0 nœuds, et les débits maximaux des marées Neap atteignent 3,5 nœuds. Bien qu'il existe d'autres diamants de marée dans la zone générale, l'analyse ici est limitée à <T> en premier lieu. Aux grandes marées, il y a une différence entre le débit maximal dirigé vers l'ouest (7,0 nœuds) et le débit maximal dirigé vers l'est (5,6 nœuds), suggérant un résiduel. Une différence de magnitude plus faible se produit aux morts-fonds, avec des forces de marée de 3,5 nœuds (Ouest) et 2,8 nœuds (Est). Une conversion de nœuds en m/s permet de considérer les débits en unités standard pour les calculs de puissance.

Hours	Geographical Position	50° 29' 6N 2° 26' 7W					
Before High Water	Directions of streams (degrees)	Rates at spring tides (knots)	Rates at neap tides (knots)	6	249	7.0	3.5
				5	240	7.0	3.5
				4	236	6.4	3.2
				3	228	4.8	2.4
				2	219	2.0	1.0
				1	112	0.9	0.5
After High Water				1	111	4.5	2.2
				2	102	5.6	2.8
				3	109	4.6	2.3
				4	119	3.8	1.9
				5	135	2.7	1.3
				6	209	2.2	1.1
				247	5.2	2.6	

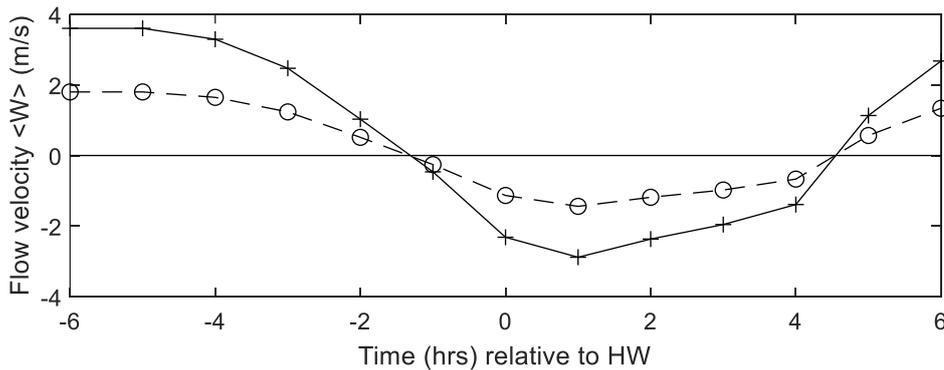
**Figure 3.** Données de diamant de marée au large de Portland Bill au diamant de marée <T>. Reproduit à des fins de recherche uniquement à l'aide d'Edina Digimap, basé sur la carte de l'Amirauté 2255 (pas pour la navigation). Les temps sont relatifs à HW Plymouth (Devonport).

**Tableau 1.** Vitesses sur le site à partir du diamant de marée. Le courant circulant généralement vers l'ouest ou l'est est indiqué par W et E, respectivement.

	Noeuds	Heure par rapport à Plymouth (Devonport)	Sens du flux (degrés)	Direction générale (par rapport à la Manche)
Printemps W	7.0	6 heures avant HW	249	O
Ressort E	5.6	1 h après HW	102	E
Neap W	3.5	6 heures avant HW	240	O
Neap E	2.8	1 h après HW	102	E

La variation de la force du flux à travers la marée, comme indiqué par le losange de marée pour Portland Bill, est illustrée à la figure 4. Pour illustrer la variation directionnelle, les flux se voient attribuer une valeur positive ou négative, les flux se dirigeant généralement vers l'ouest comme positifs, et ceux généralement à l'Est comme négatifs. La forme générale de la variabilité des vitesses est approximativement sinusoïdale, cependant les flux dirigés généralement vers l'Est sont généralement plus importants que les flux vers l'Ouest. Les flux de marée morte sont par nature plus lents que les flux de marée de printemps.





**Figure 4.** Tracé des vitesses d'écoulement, converties en m/s, à l'emplacement de Tidal Diamond T à Portland Bill. Les marées mortes sont représentées par les lignes pointillées, les grandes marées par les lignes pleines. Généralement, les débits dirigés vers l'ouest se voient attribuer des valeurs positives. Les temps sont relatifs à HW Portsmouth.

### Modélisation du flux de marée

Une prédiction des conditions de débit sur les sites peut être faite en utilisant les observations de débit aux Tidal Diamonds. Pour ce faire, les contributions lunaires (M2), solaires (S2), bimensuelles (f14) et résiduelles (R) à la vitesse doivent être calculées à la position des diamants, en utilisant les données des diamants de marée.

### Détail du calcul de la vitesse des marées

Les variations de marée peuvent être décomposées à partir des vitesses d'écoulement observées données au niveau du losange de marée en utilisant les vitesses de courant de source et de creux pour les débits de crue et de reflux maximaux. La méthode suppose que les écoulements sont approximativement rectilignes ; c'est-à-dire que le maximum dans la direction de l'inondation est dans la direction opposée au reflux maximum. Aux fins de cette illustration, la plus grande des deux est supposée être l'inondation.

Si la seule variation du courant de marée est due aux composantes lunaires (M2) et solaires (S2), il est possible de résoudre les amplitudes des composantes de vitesse. Lorsque des marées de vive-eau maximales se produisent, le courant dû au soleil et à la lune peut être considéré comme s'additionnant. L'amplitude de la composante de vive-eau peut être considérée comme :

$$u_{spring} = u_{M2} + u_{S2}$$

Lors des mortes-eaux, les courants dus au soleil et à la lune peuvent être considérés comme agissant l'un contre l'autre :

$$u_{neap} = u_{M2} - u_{S2}$$

L'ajout des équations pour  $u_{spring}$  et  $u_{neap}$  donne :

$$u_{M2} = \frac{u_{spring} + u_{neap}}{2}$$

Soustraire les rendements :



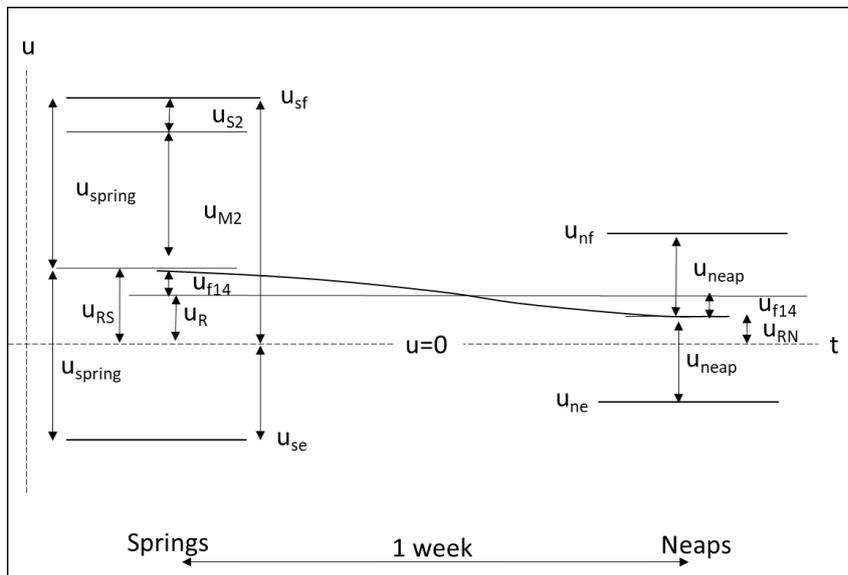
$$u_{S2} = \frac{u_{spring} - u_{neap}}{2}$$

Cependant, en pratique, les données du diamant de marée indiquent qu'il existe un courant moyen résiduel (non nul) et que celui-ci varie d'une source à l'autre. En supposant que les composantes M2 et S2 oscillent par rapport à un courant résiduel constant et à une variation bimensuelle de ce résiduel, il est possible de prédire la série temporelle de vitesse à partir des données de diamant de marée.

### Amplitude de la vitesse des marées

Il est d'abord nécessaire d'identifier le maximum de la source dans le sens du flot ( $u_{sf}$ ) et le débit maximum dans le sens du jusant ( $u_{se}$ ) à partir du losange de marée. Il est également nécessaire d'identifier le maximum de morte-eau dans le sens du flot ( $u_{nf}$ ) et le débit maximum de morte-eau dans le sens du jusant ( $u_{ne}$ ).

Un croquis de définition de la série de calculs nécessaires est donné à la figure 5.



**Figure 5.** Esquisse pour illustrer la position des différents composants contribuant à la vitesse des marées.

L'amplitude des oscillations de la vive-eau et de la morte-eau peut être déterminée comme suit :

$$u_{spring} = \frac{u_{sf} + u_{se}}{2}$$

$$u_{neap} = \frac{u_{nf} + u_{ne}}{2}$$

Le courant résiduel aux sources ( $u_{RS}$ ) et aux neaps ( $u_{RN}$ ) est donné par la différence des vitesses de crue et de reflux :

$$u_{RS} = \frac{u_{sf} - u_{se}}{2}$$

$$u_{RN} = \frac{u_{nf} - u_{ne}}{2}$$

En supposant que les variations sont entraînées principalement par les composantes lunaires et solaires, et que les oscillations ont lieu autour du résidu, les amplitudes  $M_2$  et  $S_2$  peuvent être calculées comme suit :

$$u_{M_2} = \frac{u_{spring} + u_{neap}}{2}$$

$$u_{S_2} = \frac{u_{spring} - u_{neap}}{2}$$

La variation du résidu entre ressorts et neaps est supposée sinusoidale, et l'amplitude de cette oscillation est donnée par :

$$u_{f_{14}} = \frac{u_{RS} - u_{RN}}{2}$$

Le résidu moyen pour le cycle de la chute printanière est supposé constant et est donné par :

$$u_R = \frac{u_{RS} + u_{RN}}{2}$$

## Fréquences

Le pas de temps dans la création de la série temporelle de vitesse est supposé être de 1 h. Il est possible de supposer que la période des constituants solaire et lunaire est respectivement de 12 et 12,42 heures et d'obtenir un résultat satisfaisant.

Alternativement, une estimation plus précise sur une année peut être incorporée en utilisant une table des marées du port standard (auquel la table des diamants des marées fait référence). Les observations à partir de la table des marées des grandes marées de vives-eaux qui sont séparées dans le temps sont nécessaires ( par exemple , à environ 1 an d'intervalle). Si la date et l'heure de la première de ces observations sont notées  $t_1$ , et la seconde est notée  $t_2$ , le temps (en heures) entre ces grandes marées peut être calculé. Le nombre de grandes marées ( $n$ ) doit être identifié dans ce laps de temps ( c'est-à-dire combien de cycles de 14 jours il y a). La période des grandes marées ( c'est- à-dire environ 14 jours) est donc identifiable à partir des tables des marées comme suit :

$$T_{spring} = \frac{t_2 - t_1}{n}$$

La fréquence des grandes marées est donnée par :

$$f_{spring} = \frac{1}{T_{spring}}$$

La période de la composante solaire ( $T_{S_2}$ ) est de 12 heures, donc la fréquence est donnée par :

$$f_{S_2} = \frac{1}{T_{S_2}}$$

La fréquence de la composante lunaire ( $f_{M_2}$ ) est donnée par :

$$f_{M_2} = f_{S_2} - f_{spring}$$

La période de la composante lunaire est :

$$T_{M_2} = \frac{1}{f_{M_2}}$$



La composante bimensuelle qui quantifie l'oscillation de la moyenne autour du résidu a une période qui est la même que les ressorts :

$$T_{f14} = T_{spring}$$

Les fréquences radiales ( $\omega$ ) nécessaires pour recréer la série temporelle des marées sont données par :

$$\omega_{S2} = \frac{2\pi}{T_{S2}}$$

$$\omega_{M2} = \frac{2\pi}{T_{M2}}$$

$$\omega_{f14} = \frac{2\pi}{T_{f14}}$$

Les composants sont supposés osciller de manière sinusoïdale. Lors de la recréation de la série chronologique, si la série chronologique commence par l'ajout des composantes M2 et S2, la série chronologique commence par les marées vives. La variation bimensuelle du résidu est maximale aux grandes marées, et est donc décrite par un cosinus. Cela garantit que le pic de la composante f14 est en phase avec les grandes marées.

L'équation de la vitesse ( $u$ ) en fonction du temps ( $t$ ) est donnée par :

$$u(t) = u_{M2} \sin(\omega_{M2}t) + u_{S2} \sin(\omega_{S2}t) + u_{f14} \cos(\omega_{f14}t) + u_R$$

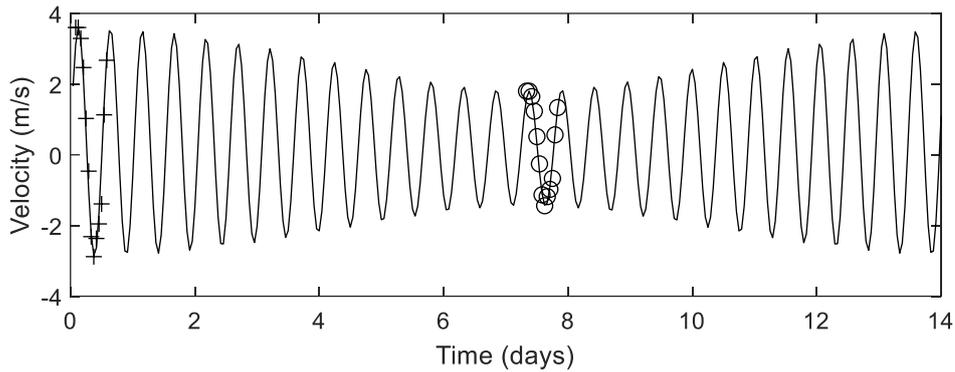
M2 indique la principale composante lunaire avec une période d'environ 12,42 heures, S2 indique la principale composante solaire avec une période de 12 heures, f14 indique une variation bimensuelle et R indique une valeur constante résiduelle.  $\omega$  indique la fréquence angulaire ( $\omega = 2\pi/f$ ),  $f$  est la fréquence ( $f=1/T$ ) et  $T$  est la période d'oscillation. Un pas de temps de 1 h est utilisé ici, mais des pas de temps de résolution plus fins dans la génération de séries temporelles de vitesse seraient possibles.

### Données de flux de marée générées pour Portland Bill

L'analyse ci-dessus appliquée aux données T de diamant de marée de Portland Bill donne une amplitude M2  $u_{M2}$  de 3,1 nœuds, une amplitude S2  $u_{S2}$  de 1,05 nœuds, une moyenne résiduelle  $u_R$  de 0,2 nœuds et une oscillation résiduelle  $u_{f14}$  de 0,05 nœuds. Un examen des tables des marées pour le port voisin de Plymouth indique 23 marées de vive-eau en 338,967 jours, ce qui donne une période de marée de vive-eau ( $T_{printemps}$ ) de 353,705 heures. La période solaire ( $T_{S2}$ ) est de 12 heures, et la période lunaire ( $T_{M2}$ ) est donc de 12,4214 heures.

Un tracé de la série chronologique générée pour Portland Bill au diamant de marée T est illustré à la figure 6. Les données des diamants de marée sont superposées.



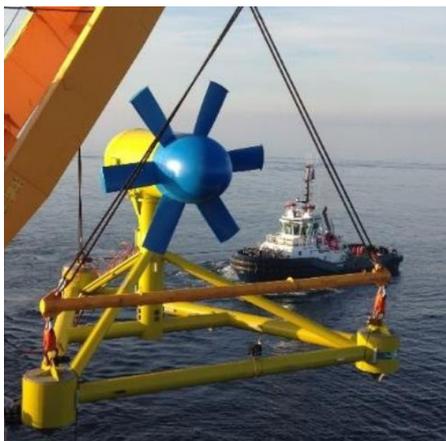


**Illustration 6 .** Série chronologique des vitesses d'écoulement (m/s) variant avec le temps (jours) à Portland Bill prédit à l'aide de Tidal Diamond <T> de l'Admiralty Chart 2255. Sont également marquées les données de diamant de marée du Tidal Diamond pour les marées de printemps (+) et Neap marées (x), converties en m/s.

La série temporelle de vitesse permet de calculer une série temporelle de production d'énergie par une hydrolienne.

### Turbine marémotrice

Les hydroliennes en cours d'eau sont essentiellement des équivalents immergés des éoliennes, mais placées soit sur le fond marin, soit positionnées sous un navire flottant. La figure 7 montre le Sabella D10, qui est considéré conceptuellement dans l'analyse ci-dessous (Sabella, nd). La Sabella D-10 est une turbine de 10 mètres de diamètre qui tourne à 5 à 20 tours par minute, avec une puissance maximale de 1 MW dans 4 m/s de débit. (Sabella, sans date ; Lewis et al., 2021). La structure mesure 17 m de haut, pèse 450 tonnes et a une empreinte au sol de 20 mx 20 m. Le dispositif a été déployé avec succès au large des îles d'Ouessant en Bretagne (France). Sabella a ensuite développé le D-15, qui est une version de 15 m de diamètre avec une puissance de sortie accrue de 2,3 MW.



**Figure 7.** Turbine Sabella D-10 In-stream marémotrice.

## Production d'électricité par les hydroliennes In-stream

L'utilisation des séries temporelles prédites de données de vitesse permet une estimation de la puissance des marées sur le site. La puissance disponible à partir du courant de marée est donnée par Lewis et al (2021) et de nombreux auteurs précédemment comme :

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A u^3$$

où  $P$  a des unités de Watts,  $\rho$  est la densité de l'eau de mer (prise ici comme  $1025 \text{ kg/m}^3$ ).  $C_p$  est un coefficient de turbine qui identifie l'efficacité de la turbine,  $A$  est la surface balayée de la turbine et  $u$  est la vitesse d'écoulement (unités de m/s).

La surface balayée dépend du diamètre ( $D$ ) de la turbine comme :

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Si l'on considère uniquement l'énergie hydraulique, il serait possible d'utiliser une valeur de  $C_p = 1$ . Cependant, les turbines ne sont pas capables de convertir toute l'énergie hydraulique en énergie électrique, donc une valeur de  $C_p < 1$  est requise. Une approche standardisée pour identifier le coefficient de turbine, basée sur une gamme de turbines opérationnelles, a été proposée par Lewis et al (2021).

Les turbines ont une « puissance nominale » ( $P_r$ ), qui est la puissance maximale qu'elles généreront, quelle que soit l'augmentation du débit. Lorsque la puissance nominale est atteinte à la vitesse la plus faible possible, celle-ci est définie comme la vitesse nominale ( $u_r$ ). Les turbines ont aussi généralement une vitesse « d'enclenchement », qui identifie la vitesse d'écoulement à laquelle elles commencent à produire de l'électricité ( $u_s$ ). Cela peut être exprimé comme une proportion de la vitesse nominale, c'est-à-dire

$$u_c = k u_r$$

Pour une éolienne "moyenne" générale, Lewis et al. (2021) ont donné  $k = 0,3$ , ce qui donne une réduction moyenne de la vitesse lorsque  $u_s = 0,3 u_r$ . Une valeur moyenne de  $C_p$  a été déterminée pour une gamme de turbines à  $0,37$ . Des valeurs spécifiques à certaines des différentes éoliennes sont données par Lewis et al (2021).

La production d'énergie, à débits progressivement croissants, est définie comme suit :  
quand  $u < u_c$

$$P = 0$$

quand  $u_c < u < u_r$

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A u^3$$

quand  $u > u_r$

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A u_r^3$$

Les valeurs pour les deux turbines Sabella et un ensemble de valeurs "moyennes" sont données dans le tableau 2. D'autres exemples sont donnés dans Lewis et al (2021).



**Tableau 2** : Valeurs caractéristiques des turbines d'exemple et moyennes (adapté de Lewis et al., 2021)

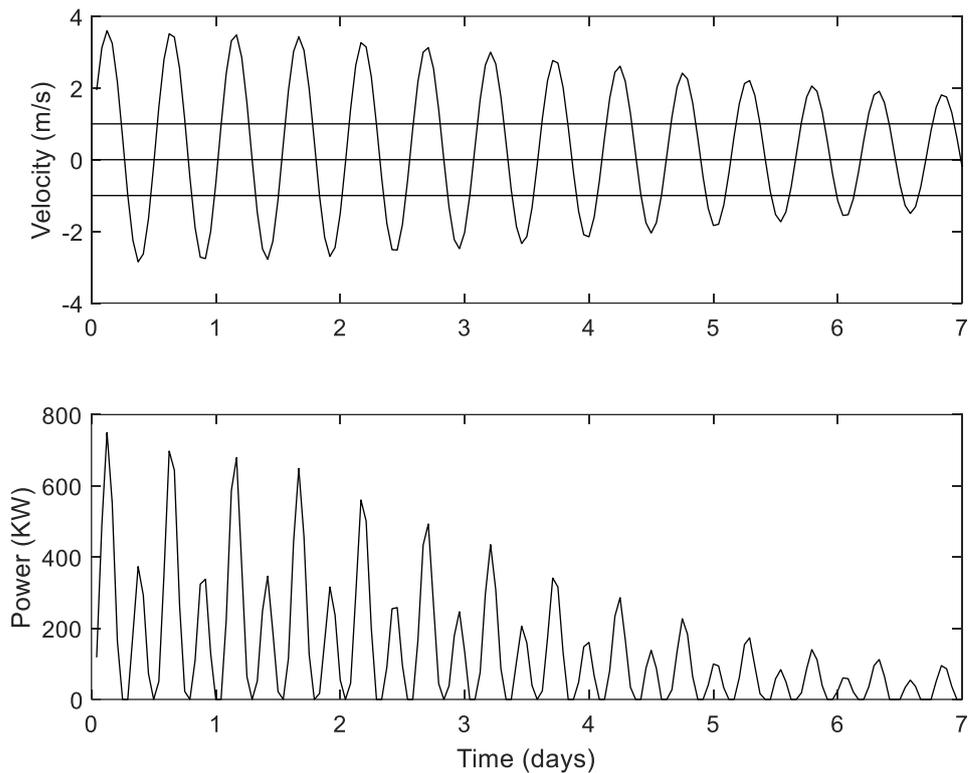
	D (m)	$P_r$ (kW)	$u_r$ (m/s)	$u_{c,r}$ (m/s)	$k (= u_r / u_{c,r})$	$C_p$	Source
Sabella D-15	15	2300	4	1	0,25	0,4	Site Web Sabella : Sabella a publié les caractéristiques des turbines. <a href="https://www.sabella.bzh/fr">https://www.sabella.bzh/fr</a> , 2019
Sabella D-10	dix	1000	4	1	0,25	0,4	Site Web Sabella : Sabella a publié les caractéristiques des turbines. <a href="https://www.sabella.bzh/fr">https://www.sabella.bzh/fr</a> , 2019
Moyenne de 14 turbines différentes	13	816	2,91	0,88	0,30	0,37	Lewis et al (2021)

### Modélisation de puissance

En partant de la série chronologique des courants de marée, la puissance marémotrice peut être calculée à l'aide d'une turbine représentative (Sabella D-10). La figure 8 montre la vitesse du courant de marée et l'énergie marémotrice générée pendant une période d'une semaine à Portland, menant de Springs à Neaps. Les lignes horizontales du graphique du haut indiquent la réduction de vitesse utilisée dans l'analyse. La puissance générée est indiquée dans le graphique inférieur.

La production est de 0 kW lorsque la marée tourne ou lorsque le débit est inférieur à la vitesse de coupure de la turbine. La production d'électricité de pointe au débit de source maximal avec une turbine est de 750 kW (0,75 MW). La production électrique moyenne, y compris les périodes sans génération, est de 135 kW. Avec 8 760 heures par an, la turbine donne une production annuelle d'environ 1 183 MWh.





**Figure 8.** Potentiel de production d'électricité à Portland à partir d'un seul appareil Sabella D10 sur une période de repos printanier d'une semaine.

### Application en relation avec les besoins en puissance de Portland

Afin d'augmenter la production d'électricité pour répondre aux demandes énergétiques de l'île, il est clair que plus d'une turbine serait nécessaire. Conceptuellement, une clôture de turbines à travers le flux est considérée ici, et la longueur de la clôture est calculée pour répondre à la demande annuelle. Il est supposé qu'un système de stockage d'énergie à terre ou un câble reliant le système de Portland à celui du Royaume-Uni continental serait en place pour faire face au problème de lissage des variations quotidiennes et hebdomadaires. Pour réduire autant que possible la longueur de la ligne de clôture, tout en minimisant les effets de sillage, les turbines sont conceptuellement considérées comme étant placées sur deux lignes parallèles, avec un espacement d'un diamètre entre les turbines de la première rangée, et d'autres turbines situées dans les espaces entre éoliennes, à une petite distance en aval. La valeur de longueur de clôture requise présentée est donc (approximativement) un multiple direct du nombre de turbines requises et du diamètre de la turbine.

Une façon de quantifier la contribution des marées requise consiste à considérer les besoins énergétiques de l'île pendant une année. La population de Portland est d'environ 12 797 personnes. Au Royaume-Uni, la consommation moyenne d'énergie électrique par personne et par an est d'environ 2 900 kWh an<sup>-1</sup>. L'île de Portland aurait donc besoin actuellement de 37 111 300 kWh, soit 37 111 MWh par an.



Compte tenu de la puissance de sortie annuelle de la turbine pour une seule turbine, il est possible de calculer la longueur d'une clôture de turbines qui serait nécessaire pour générer suffisamment de puissance pour l'île. Pour que Portland Bill produise les 37 111 MWh à l'aide de turbines générant chacune 1 183 MWh, il faut 32 turbines. La ligne d'éoliennes devrait s'étendre sur une longueur de 320 m (tableau 3).

**Tableau 3** : Demande et production d'énergie par les hydroliennes

	Facture de Portland
Demande insulaire annuelle	37 111 MWh
Production annuelle d'énergie éolienne (turbine unique de 10 m de diamètre)	1 183 MWh
Nombre de turbines nécessaires pour répondre à la demande	32
Longueur de clôture	320 mètres

Bien que l'approche par réseau puisse inclure deux rangées de turbines, d'autres formes de réseau sont possibles, et l'optimisation peut être bénéfique pour minimiser les interactions de sillage avec les dispositifs en aval (Coles et al., 2020).

## Discussion

Les courants de marée au large des promontoires et dans les chenaux offrent une source fiable d'énergie marine. Dans une communauté insulaire, cette source d'énergie peut utilement contribuer au mix énergétique global, en aidant à fournir un complément régulier à un réseau local (Coles et al., 2020). Idéalement, la planification finale de l'installation d'appareils d'énergie marémotrice utiliserait les données du profileur de courant acoustique Doppler (ADCP) du site, combinées à une modélisation numérique détaillée, pour caractériser précisément la ressource et traiter les variations spatiales de la vitesse (par exemple, Haverson et al., 2018). L'une des difficultés de la planification initiale et de la modélisation conceptuelle est que les données ADCP peuvent ne pas être disponibles et qu'il est coûteux de rassembler ce type de données.

De plus, les modèles tridimensionnels détaillés sont longs à mettre en œuvre et difficiles à calibrer lorsqu'il n'y a pas de données du site. L'utilisation des diamants des marées des cartes de l'Amirauté ou des valeurs actuelles des données de l'atlas des marées aide à contourner ce problème pour ceux qui souhaitent examiner et quantifier les opportunités de la ressource. La méthode est applicable en première approximation et convient particulièrement bien à ceux qui ont des capacités techniques avec des programmes tels qu'Excel et Matlab, mais qui n'ont pas nécessairement d'expérience en modélisation océanographique détaillée à l'aide de packages tels que Delft3D, Mike21 ou Telemac.



La méthode inclut les constituants M2 et S2, et la variation bimensuelle du résiduel. La méthode suppose une série temporelle sinusoïdale et n'inclut pas l'asymétrie ou l'asymétrie dans la série temporelle de vitesse. Cela peut être possible dans une certaine mesure en utilisant les données des diamants de marée, mais nécessite une analyse plus approfondie au-delà de celle proposée ici. La méthode n'inclut pas la variation mensuelle des sources et des mortes-eaux ( c'est-à-dire qu'une morte-eau ou une grande marée est généralement plus grande que la suivante). Il n'inclut pas non plus les variations saisonnières des printemps et des Neaps, qui conduisent aux plus grands courants de marée à l'équinoxe. Ces oscillations plus longues ne sont pas incluses dans les données des diamants de marée, et pour inclure ces éléments, il faudrait une analyse approfondie de longues séries chronologiques de données ADCP. Cependant, les constituants M2 et S2 sont connus pour être les deux principaux composants et les moteurs fondamentaux des courants de marée. D'autres effets tels que le vent et les vagues peuvent également affecter la force du courant un jour particulier ( p. ex. Hardwick et al., 2021).

Cette étude offre une vision conceptuelle de l'utilisation des courants de marée pour alimenter les besoins en électricité de l'île de Portland. Il ne tient pas compte de questions telles que le coût des déploiements, les questions de consentement, la faune, la navigation, ou l'histoire ou la politique de l'énergie marémotrice sur les sites, ou la source d'énergie alternative. Cependant, les valeurs de production d'électricité peuvent intéresser les développeurs qui envisagent d'utiliser le site.

Une modélisation plus détaillée de l'écoulement de la zone est possible, pour examiner différents sites et les variations locales de la vitesse d'écoulement loin des diamants de marée. Différentes turbines sont possibles, et celles-ci peuvent produire des puissances différentes, en fonction de leur vitesse de coupure et de leur puissance. Il est clair que ceux-ci seraient optimisés pour un tel déploiement. Bien que la longueur de clôture des turbines identifiées réponde globalement aux besoins énergétiques de l'île, la production d'électricité varie avec le temps et s'annule lorsque le courant est faible. Les hydroliennes devraient donc être équilibrées par une méthode de stockage d'énergie appropriée, une alimentation à partir d'une source différente ou un câble vers le réseau continental.

La turbine choisie dans cette étude (Sabella) n'est qu'un exemple de turbine, mais d'autres turbines sont possibles. Le diamètre du rotor dans cet exemple était de 10 m, et d'autres turbines ont des diamètres différents. Une profondeur suffisante est nécessaire au-dessus et au-dessous de la turbine pour que la vie marine passe et que les navires passent. L'effet des vagues sur les turbines n'est pas pris en compte ici, et les impacts des tempêtes extrêmes, des surtensions, ou leur impact sur les câbles ou le déploiement et la maintenance ne sont pas pris en compte.

Malgré ces lacunes, l'approche donne une bonne indication que les besoins énergétiques de l'île de Portland peuvent être satisfaits en utilisant les courants de marée, en tant que partie importante du mix énergétique.



## Conclusion

L'île de Portland (sud du Royaume-Uni) compte une petite communauté de 12 800 personnes et connaît de forts courants de marée au large de la pointe sud de l'île, atteignant 7 nœuds. À l'aide des données cartographiques de l'Amirauté britannique du site, une méthode de génération de séries chronologiques de la vitesse d'écoulement sur le site a été démontrée, et les composantes de courant solaire (S2), lunaire (M2) bimensuelle et résiduelle ont été calculées. Les caractéristiques de production d'électricité d'un exemple d'hydrolienne (Sabella) ont été utilisées pour générer une série temporelle de production d'électricité pour une seule turbine. La production annuelle d'énergie d'une seule turbine a été calculée à 1 183 MWh sur le site. En supposant une consommation électrique individuelle de 2 900 kWh par personne et par an, un réseau de 32 turbines s'est avéré couvrir les besoins de la population, mais des solutions telles que le stockage ou l'approvisionnement alternatif seraient nécessaires pour les périodes d'étalement.

## Les références.

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

Coles, D., Blunden, L., Bahaj, A., 2017. Assessment of the energy extraction potential at tidal sites around the Channel Islands. *Energy* 124, 171–186. (doi:10.1016/j.energy.2017.02.023)

Coles, D.S., Blunden, L.S., Bahaj, A.S., 2020. The energy yield potential of a large tidal stream turbine array in the Alderney Race: energy yield estimate for Alderney Race. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378, 20190502. (doi:10.1098/rsta.2019.0502)

Hardwick, J., Mackay, E.B.L., Ashton, I.G.C., Smith, H.C.M., Thies, P.R., 2021. Quantifying the Effects of Wave—Current Interactions on Tidal Energy Resource at Sites in the English Channel Using Coupled Numerical Simulations. *Energies*, 14, 3625. <https://doi.org/10.3390/en14123625>

Haverson, D., Bacon, J., Smith, H.C., Venugopal, V., Xiao, Q., 2018. Modelling the hydrodynamic and morphological impacts of a tidal stream development in Ramsey Sound. *Renew. Energy* 126, 876–887. (doi:10.1016/j.renene.2018.03.084)

Lewis, M., O'Hara Murray, R., Fredriksson, S., Maskell, J., de Fockert, A., Neill, S., Robins, P., 2021. A standardised tidal-stream power curve, optimised for the global resource, *Renewable Energy*, vol. 170, pp. 1308-1323. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.032>

Sabella website: Sabella published turbine characteristics. <https://www.sabella.bzh/en>, 2019

Sabella. Ushant showcase of tidal energy worldwide. Sabella document. [https://www.sabella.bzh/sites/default/files/upload/plaquettes/leaflet\\_d10 - 12\\_pages.pdf](https://www.sabella.bzh/sites/default/files/upload/plaquettes/leaflet_d10 - 12_pages.pdf)



## Approvisionnement en énergie de l'île de Portland grâce à l'énergie des vagues

Dr Juliette Jackson et Dr Jon Miles

### Abstrait

Cette étude de cas vise à éclairer une évaluation et une stratégie plus larges sur la manière dont l'énergie des vagues peut être utilisée parallèlement à de multiples sources d'énergie renouvelable, telles que l'éolien, le solaire et l'énergie marémotrice, pour aider les communautés isolées et/ou insulaires à établir des solutions énergétiques optimales et à devenir indépendantes de l'énergie. . Un calcul de démonstration est présenté pour l'île de Portland sur la côte sud du Royaume-Uni à l'aide d'une source de données locales accessibles sur l'énergie des vagues à utiliser dans des calculs simples de puissance des vagues, enregistrés par une bouée à vagues située à proximité de la plage de Chesil. Cette étude intègre une année complète d'analyse et une comparaison de l'énergie disponible en hiver (janvier) et en été (juin) en utilisant les données de cinq années consécutives . Des suggestions hypothétiques sont présentées, basées sur un exemple de spécification de dispositif et sur les résultats d'essais de dispositifs énergétiques à grande échelle. Les caractéristiques de production d'énergie d'une colonne d'eau oscillante montée sur caisson sont utilisées pour déterminer la taille de l'usine de vagues qui serait nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques de Portland compte tenu de la puissance potentielle des vagues du site. L'utilisation par la communauté locale permet un calcul indicatif de l'ampleur de la configuration théorique nécessaire pour fournir une puissance adéquate . Pour répondre à la demande énergétique de l'île de Portland avec l'énergie des vagues, une structure d'environ 2400 m de longueur serait nécessaire.

### Introduction

Des progrès constants sont réalisés dans les développements technologiques dans le secteur des énergies renouvelables marines à travers le monde, et l'enthousiasme et la nécessité récents sont susceptibles d'entraîner un taux de progrès accru dans les années à venir à mesure que l'urgence climatique se concrétise, que des objectifs d'émissions de carbone sont fixés et que des efforts sont déployés pour deviennent de plus en plus durables sont faites.

Une étude de cas est présentée ici, suivant la méthodologie du projet ICE Tool for Rapid Assessment of Wave Energy at Isolated Community Sites, et présentant des calculs de démonstration basés sur l'île de Portland sur la côte sud du Royaume-Uni. Les calculs ont utilisé les données sur les vagues du Réseau national des programmes régionaux de surveillance côtière ( NNRCMP, 2022) , incorporant une année complète d'analyse et une comparaison de l'énergie disponible en hiver (janvier) et en été (juin) en utilisant les données de cinq années consécutives pour faire des estimations rudimentaires de l'ampleur du développement des dispositifs à ondes nécessaires pour fournir une puissance adéquate à la communauté locale. Les informations sur les caractéristiques de production d'électricité



d'un exemple d'éolienne et la consommation d'énergie par la communauté locale sont introduites dans l'évaluation.

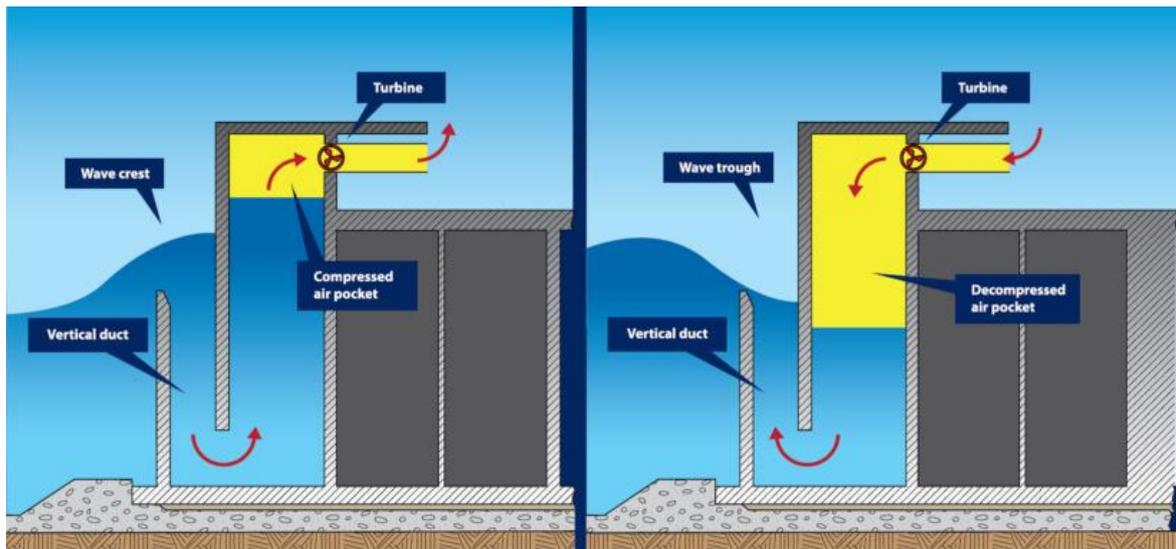
Portland est une petite péninsule de 6 km de long sur 2,7 km de large qui s'étend de la côte du Dorset à la Manche. Reliée par le continent uniquement par une mince bande de terre (Chesil Beach), la zone est fréquemment soumise à l'action des vagues et la direction des vents dominants vient du sud-ouest .

Une variété de dispositifs d'énergie houlomotrice utilisant différents principes fondamentaux ont été développés au cours des dernières années. Pour cette étude de cas, une colonne d'eau oscillante (OWC) basée sur un caisson a été sélectionnée comme dispositif représentatif de l'île de Portland, en utilisant l'installation de Mutriku dans le nord de l'Espagne comme modèle (Power Technology, 2021). L'OWC à base de caissons présente plusieurs avantages pratiques pour le déploiement de l'île. Premièrement, la construction de caissons en béton pour les brise-lames est bien pratiquée dans les environnements portuaires et d'ingénierie portuaire.

Deuxièmement, il a été démontré que les OWC à caissons fonctionnent à grande échelle, à la fois à Mutriku et en Écosse (Limpet, Boake et al., 2002). Troisièmement, la possibilité d'accéder aux turbines et de les entretenir, ainsi que la possibilité de câbler l'alimentation des appareils, évitent toutes les opérations maritimes difficiles avec ces appareils. Comparé à d'autres dispositifs, l'OWC dans des caissons modulaires à base de béton est une option peu coûteuse, résistante à la corrosion et nécessitant peu d'entretien ( Falcão, 2010) .

Un convertisseur d'onde oscillante (OWC) est composé d'une chambre contenant une colonne d'eau dans sa partie inférieure avec un orifice immergé, et une poche d'air dans sa partie supérieure. La poche d'air est reliée à l'atmosphère par un petit conduit abritant une turbine auto-rectificatrice. Les performances du dispositif sont améliorées lorsqu'une entrée en forme de U est incorporée dans l'orifice. Le principe de fonctionnement du système est qu'avec l'action des vagues incidentes, l'eau à l'intérieur du conduit en forme de U est soumise à un mouvement alternatif (Figure 1). Ce mouvement induit alternativement une compression et une expansion de la poche d'air, ce qui génère un flux d'air dans le conduit d'air. Une turbine couplé à un générateur électrique, installé dans le conduit d'air, est ainsi entraîné pour produire de l'énergie électrique ( Wavenergy.It , 2014).





**Figure 1** : Schéma du concept de colonne d'eau oscillante. ( Wavenergy.It , 2014)

À Mutriku , un brise-lames détaché en tas de gravats de 440 m de long a été proposé pour arrêter les dommages causés par la tempête au port, à ses jetées et fournir un mouillage sûr pour les bateaux. En tant que fonction secondaire à la protection côtière, plusieurs conceptions de convertisseurs d'énergie des vagues (WEC) ont été envisagées pour être incluses dans le projet de construction (Power-technologie, 2021). La centrale houlomotrice de Mutriku a été mise en service en juillet 2011, construite sur une section de 100 m de mur extérieur du nouveau brise-lames. Il y a 16 chambres à air, chacune d'une largeur de 4,5 m et d'une longueur de 3,1 m, positionnées à 9,7 m au-dessus des sources d'étiage moyen (MLWS) ( BiMEP ) . Dans chaque chambre à air se trouve une turbine Wells, une turbine à air basse pression qui tourne en continu dans une direction indépendante de la direction du flux d'air, avec des dimensions de 2,83 m de hauteur, 1,25 m de largeur et pesant 1200 kg. Les turbines n'ont pas de boîte de vitesses, d'hydraulique ou de pales de tangage. Les turbines sont reliées à un turbo-alternateur d'une capacité de 18,5 kW. La centrale de Mutriku génère une puissance de 295 kW, suffisante pour alimenter 250 foyers. (Le consommateur espagnol moyen utilise environ 10 500 kilowattheures (kWh) d'électricité par an (IDAE 2011). Cela équivaut à un taux moyen annuel de consommation d'énergie de 1,198 kW. En divisant la production générée de la centrale de Mutriku par le chiffre d'utilisation, on obtient le nombre de foyers alimentés :  $295/1.198 = 247$ ). Cela réduit les émissions de carbone de 600 t par an (Power-technology, 2021) .

Outre le développement de dispositifs et le déploiement et les essais à grande échelle, la recherche continue de progresser dans l'optimisation de la conception des centrales, l'augmentation de la récolte d'énergie et l'augmentation de la densité d'énergie des vagues. Par exemple, l'introduction d'une « lentille à plaque zonée » modifie la direction de propagation des ondes, de sorte que les ondes d'eau incidentes peuvent converger vers une certaine zone focale (Stamnes, 1986).

Un appareil aura une efficacité dans la génération d'énergie électrique à partir de l'énergie des vagues disponible. Cette efficacité dépend de la hauteur et de la période des vagues, et est définie par une matrice de puissance. Une estimation de la production d'électricité d'un



WEC dans un site spécifique peut être obtenue en associant les matrices de puissance de chaque WEC aux matrices qui donnent l'activité des vagues pour l'emplacement respectif dans un intervalle de temps déterminé (Silva et al., 2013). La matrice de puissance pour la centrale de Mutriku n'est pas accessible, c'est pourquoi la matrice de puissance pour l'huître est donnée car il s'agit d'un exemple représentatif de ce cas (Silva et al., 2013). L'Oyster est un convertisseur de surtension de vague oscillante qui est une progression de conception du LIMPET et adapté à l'environnement côtier ou proche du rivage (Folley et al., 2004).

**Tableau 1** : Un exemple de matrice de puissance pour le WEC, l'Oyster (Silva et al., 2013).

<b>Matrice de puissance Oyster (en kW)</b>									
<i>Te (s)</i>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>dix</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
<i>Hs (m)</i>									
0,5	0	0	0	0	0	0	1	3	3
1	20	30	38	42	44	44	43	47	45
1.5	80	85	92	97	102	103	104	100	104
2	140	147	152	158	155	155	160	161	156
2.5	192	197	208	202	203	209	211	201	204
3	241	237	237	241	243	230	236	231	235
3.5	0	271	272	269	268	267	270	260	260
4	0	291	290	290	280	287	276	278	277
4.5	0	291	290	290	280	287	276	278	277
5	0	0	290	290	280	287	276	278	277
5.5	0	0	290	290	280	287	276	278	277
6	0	0	290	290	280	287	276	278	277

La matrice de puissance indique la production d'énergie d'un appareil pour des périodes de vagues comprises entre 5 et 13 s (colonnes) et des hauteurs de vagues comprises entre 0,5 m et 6 m (lignes). Les unités d'énergie sont en kW. Les données ici sont pour l'appareil Oyster (Silva et al., 2013).

La largeur de capture périphérique ( $C_w$ ) de l'Oyster est de 18 m (Whittaker). La puissance par m de largeur d'appareil ( c'est-à-dire kW/m) peut être calculée à partir de :

$$P_{out} (kW/m) = \frac{P (kW)}{C_w}$$

Ceci est illustré pour Oyster dans le tableau 2.



**Tableau 2** : Puissance par m de front d'onde.

<b>Matrice de puissance Oyster (en kW/m)</b>									
<i>T<sub>e</sub> (s)</i> <i>H<sub>s</sub> (m)</i>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>dix</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,17	0,17
1	1.11	1,67	2.11	2.33	2.44	2.44	2.39	2.61	2,50
1.5	4.44	4.72	5.11	5.39	5,67	5.72	5,78	5.56	5,78
2	7,78	8.17	8.44	8,78	8.61	8.61	8,89	8,94	8,67
2.5	10.67	10.94	11.56	11.22	11.28	11.61	11.72	11.17	11h33
3	13h39	13.17	13.17	13h39	13h50	12.78	13.11	12.83	13.06
3.5	0,00	15.06	15.11	14,94	14,89	14.83	15h00	14h44	14h44
4	0,00	16.17	16.11	16.11	15.56	15,94	15h33	15h44	15h39
4.5	0,00	16.17	16.11	16.11	15.56	15,94	15h33	15h44	15h39
5	0,00	0,00	16.11	16.11	15.56	15,94	15h33	15h44	15h39
5.5	0,00	0,00	16.11	16.11	15.56	15,94	15h33	15h44	15h39
6	0,00	0,00	16.11	16.11	15.56	15,94	15h33	15h44	15h39

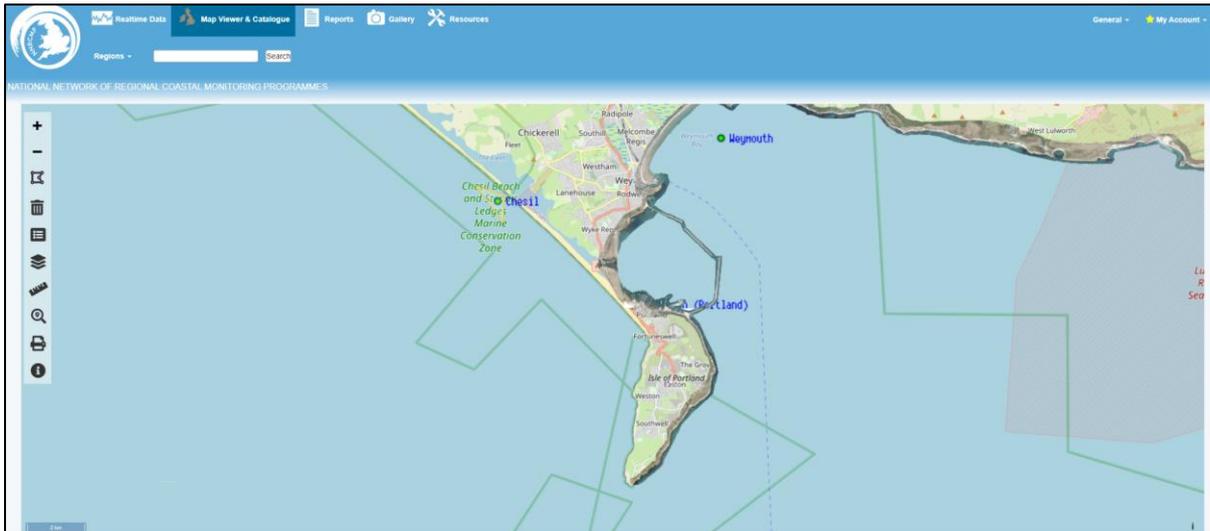
La production d'énergie de l'Oyster est maximale à des hauteurs de vagues supérieures à 3,5 m et avec des périodes de vagues de 6 s, avec une légère diminution de la production d'énergie à mesure que la période des vagues augmente.

### Données des bouées flottantes

Le site Web du réseau national des programmes régionaux de surveillance côtière (NNRCMP, 2022) d'Angleterre agit comme un référentiel unique pour les données de surveillance côtière collectées par 6 programmes régionaux et vise à soutenir l'ingénierie et la gestion côtières. Les données combinées sont librement accessibles à partir du référentiel via le site Web et peuvent être téléchargées par incréments annuels ou mensuels (NNRCMP, 2022). D'autres réseaux sont accessibles dans différentes régions et pays.

Le Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Urbanisme (CEREMA) est le principal organisme public français de valorisation et de valorisation de l'expertise publique, dont la transition énergétique. Le CEREMA gère le Centre d'Archivage National de Données de Houle InSitu (réseau CANDHIS) des stations de mesure des vagues le long de la côte française depuis 1972, bien que le site soit en maintenance au moment de la rédaction (CANDHIS, 2022).





**Figure 2** : Le réseau national du programme régional de surveillance côtière (NNRCMP) montrant l'emplacement de la bouée à vagues à la plage de Chesil au nord-ouest de Portland (NNRCMP, 2022) .

Bouées directionnelles Datawell Waverider déployées , ainsi que les données de 3 bouées de l'industrie fournies par RWE Innogy et Wave Hub Limited. Il y a 13 bouées directionnelles WaveRider autour de la côte sud-ouest, chacune située à environ 10-12 m de profondeur d'eau (Datum des cartes). Les données sont redirigées vers le site Web du Réseau national de surveillance côtière où elles peuvent être consultées en temps réel, ainsi que les données des bouées à vagues dans d'autres régions. La qualité des données en temps réel n'est pas vérifiée, mais la qualité des données archivées est contrôlée rétrospectivement et toute erreur de mesure directionnelle ou de hauteur de vague est signalée, ce qui permet de filtrer les données de vague et de supprimer les points de données erronés lors du traitement des données. Les bouées Waverider enregistrent la hauteur des vagues, la direction des vagues, le tangage et le roulis directs. Les données sont enregistrées à des intervalles de 30 minutes. Les bouées combinent un accéléromètre horizontal et une boussole, permettant d'enregistrer des données directionnelles précises et fiables sur les vagues. La résolution et la précision de la plage de pilonnement de l'appareil est de -20 m à +20 m, avec une résolution de 0,01 m. La précision est < 0,5 % de la valeur mesurée après étalonnage ou < 1,0 % de la valeur mesurée après trois ans. La plage de période d'onde mesurable est de : 1,6 s - 30 s<sup>5</sup> .



**Figure 3** : Bouée Waverider (NNRCMP, 2022).

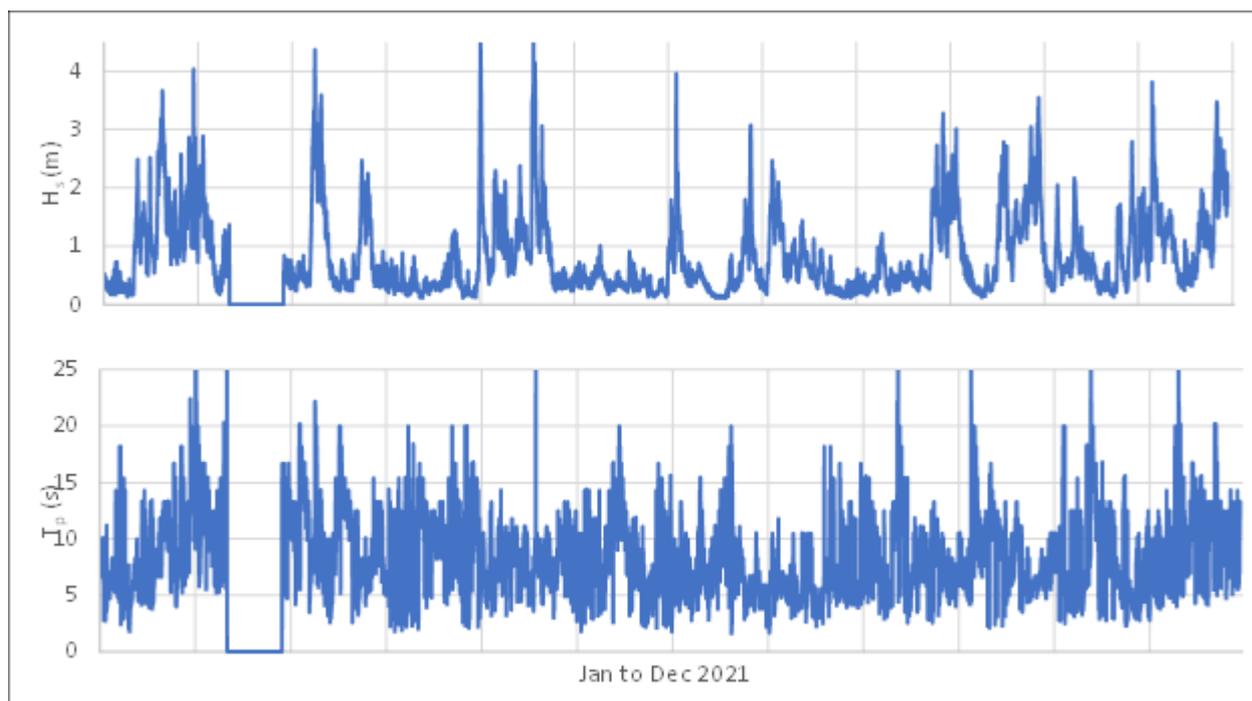
La bouée à vagues de Chesil, propriété du conseil de district de Teignbridge, a été déployée le 22 décembre 2006. Il s'agit d'une bouée directionnelle Waverider Mk111, située OS 363094 E 78173 N; WGS84 Latitude : 50° 36,13' N Longitude : 02° 31,37' O (Figure 2). Les données des bouées à vagues sont une source de données facilement accessibles à partir d'une variété de plateformes/sites Web différents. Chaque plate-forme traitera les données brutes selon ses propres spécifications et sera accessible à partir de, deux de ces sources sont décrites ici, le Réseau national des programmes régionaux de surveillance côtière (NNRCMP, 2022) et le Centre des sciences de l'environnement, de la pêche et de l'aquaculture (CEFAS, 2022).

### Statistiques des vagues

Pour calculer la puissance des vagues, les paramètres hauteur de vague significative ( $H_s$  ou  $H_{m0}$ ) et période de vague dominante (crête) ont été sélectionnés pour la période d'intérêt. Pour cette première étude sur la contribution de l'énergie des vagues à la matrice de production d'énergie de Portland, une année de données récentes (2021) a été sélectionnée, et les données de janvier et juin pour cinq années différentes ont été téléchargées pour une comparaison hiver-été.

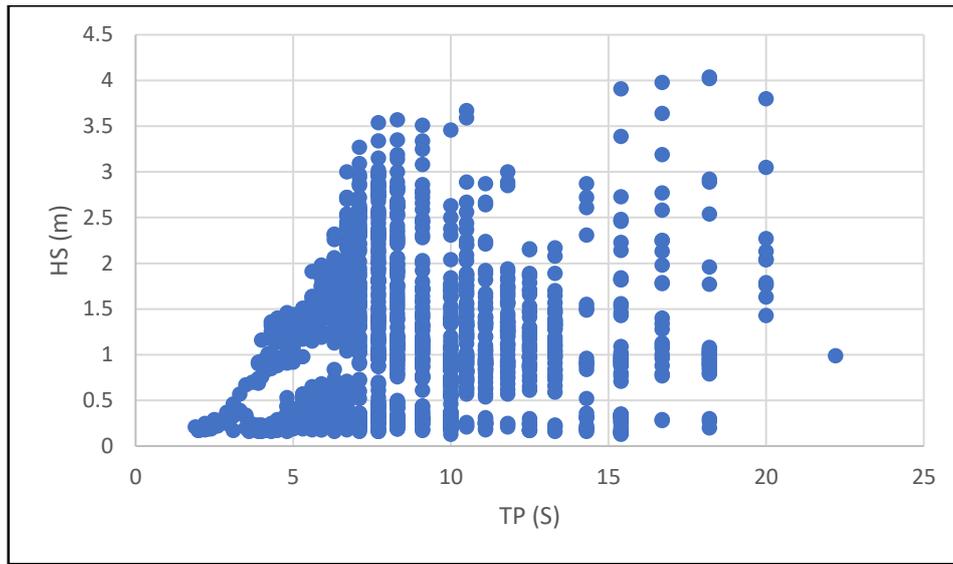
Les données importées dans Microsoft Excel ont été tracées pour révéler des informations de base sur les conditions de vagues d'un site. Les données sur la hauteur et la période des vagues pour la plage de Chesil (Portland) sont présentées à la figure 4. Cela montre qu'en 2021, il y a eu de multiples occurrences de hauteurs de vagues enregistrées supérieures à 4 m et des périodes de vagues allant jusqu'à 25 s. Cependant, la plupart du temps, la hauteur des vagues est de l'ordre de 0 à 1 m, avec des périodes de l'ordre de 4 à 15 s. La hauteur moyenne des vagues pour cette année était de 0,85 m et la période moyenne était d'un peu plus de 8 s.





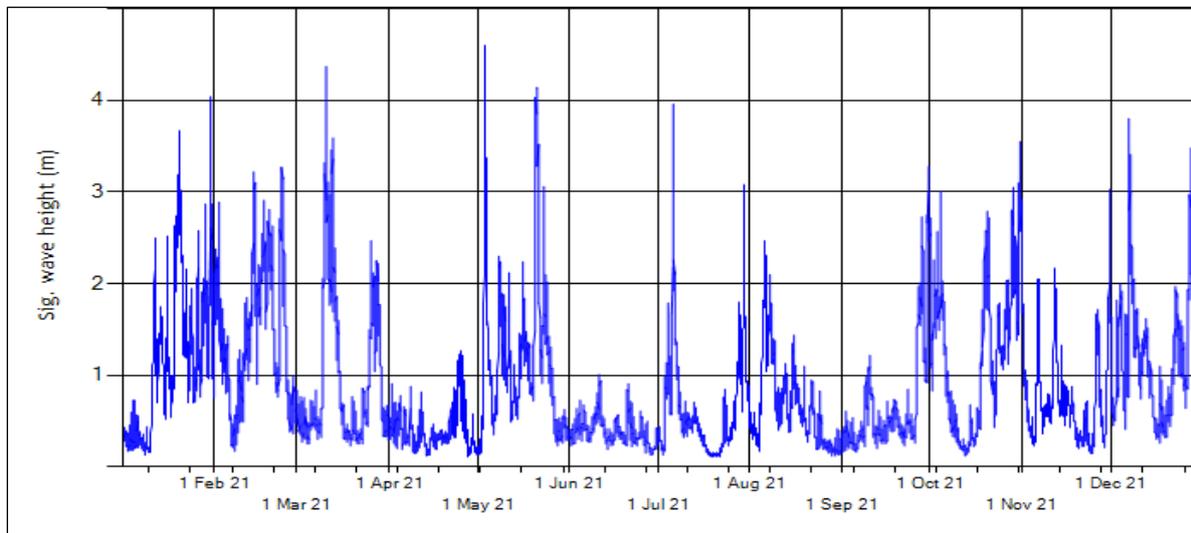
**Figure 4 :** Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ) et période de pointe des vagues ( $T_p$ ) à la bouée à vagues de Chesil, près de Portland, tout au long de 2021.

Le tracé de la hauteur significative des vagues par rapport à la période de pointe des vagues aide à indiquer les valeurs aberrantes (figure 5). Parmi les 1488 points de données représentés à la figure 5, les occurrences où la période d'onde est comprise entre 5 et 7 secondes sont les plus importantes, suivies des occurrences où la période d'onde est comprise entre 7 et 13 secondes. Peu de valeurs aberrantes apparaissent pour janvier, la plus distincte étant une hauteur de vague de 1 mètre à une période de 22 secondes et quatre occurrences de vagues d'environ 4 m de hauteur et espacées de 15 à 20 secondes.



**Figure 5** : Hauteur significative des vagues et période de pointe des vagues à la bouée à vagues de Chesil, près de Portland, tout au long de janvier 2021.

Il convient de noter que si des données manquent dans un référentiel, comme dans la figure 4 où certaines des données de février sont manquantes, il est possible qu'un référentiel de données alternatif pour la période requise puisse être trouvé, bien qu'il soit éventuellement enregistré à une sensibilité différente. . La même période de données a été consultée depuis le référentiel CEFAS (CEFAS, 2022, Figure 6) où toutes les données de février sont présentes.



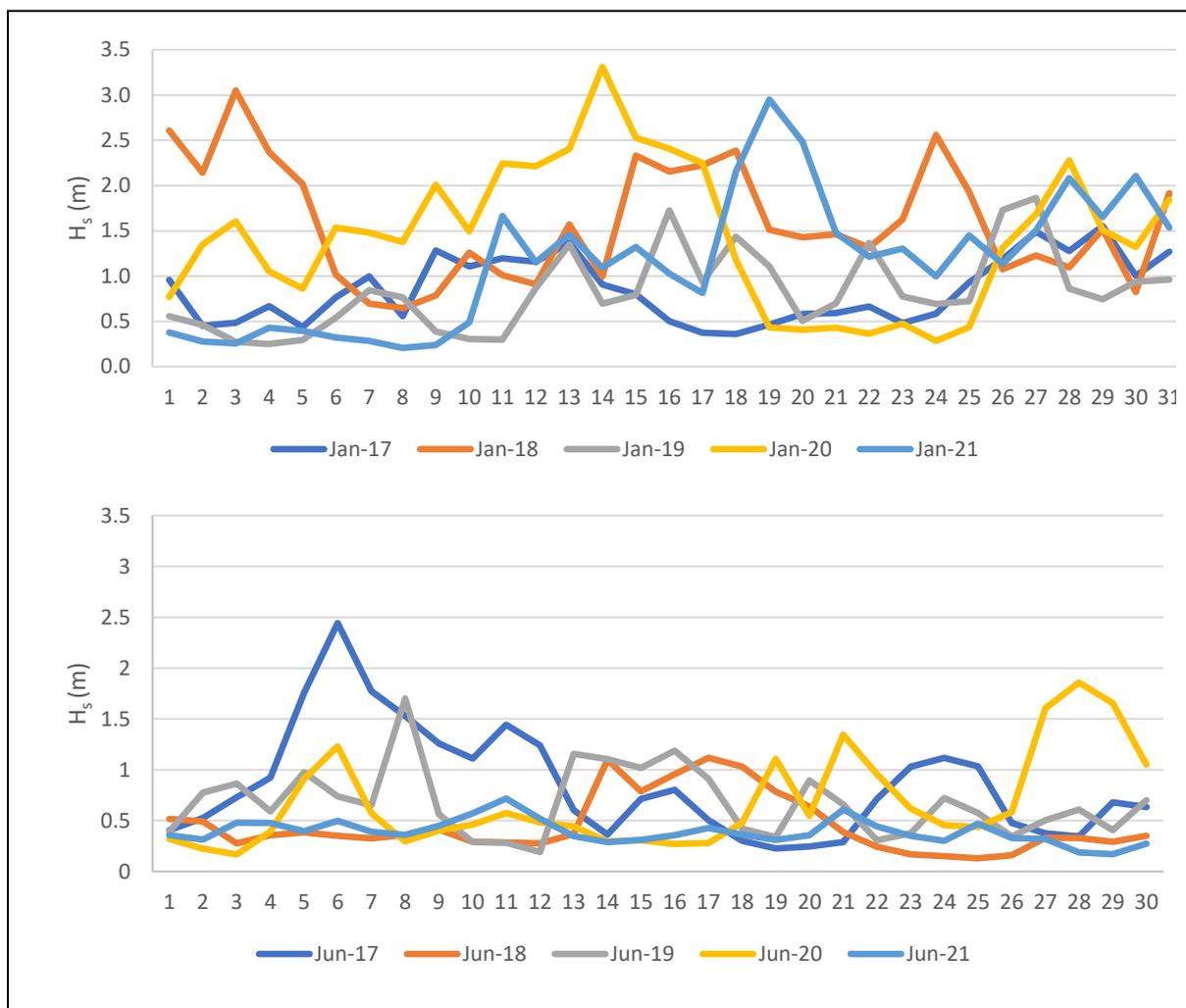
**Figure 6** : Hauteur significative des vagues ( $H_s$ ) à la bouée de Chesil, près de Portland tout au long de 2021 (CEFAS 2022).

Le calcul des moyennes des hauteurs des vagues sur une période appropriée, telles que les moyennes quotidiennes, réduit l'influence des conditions de tempête hivernale sur la série chronologique et donne une image de la variabilité saisonnière de la hauteur significative

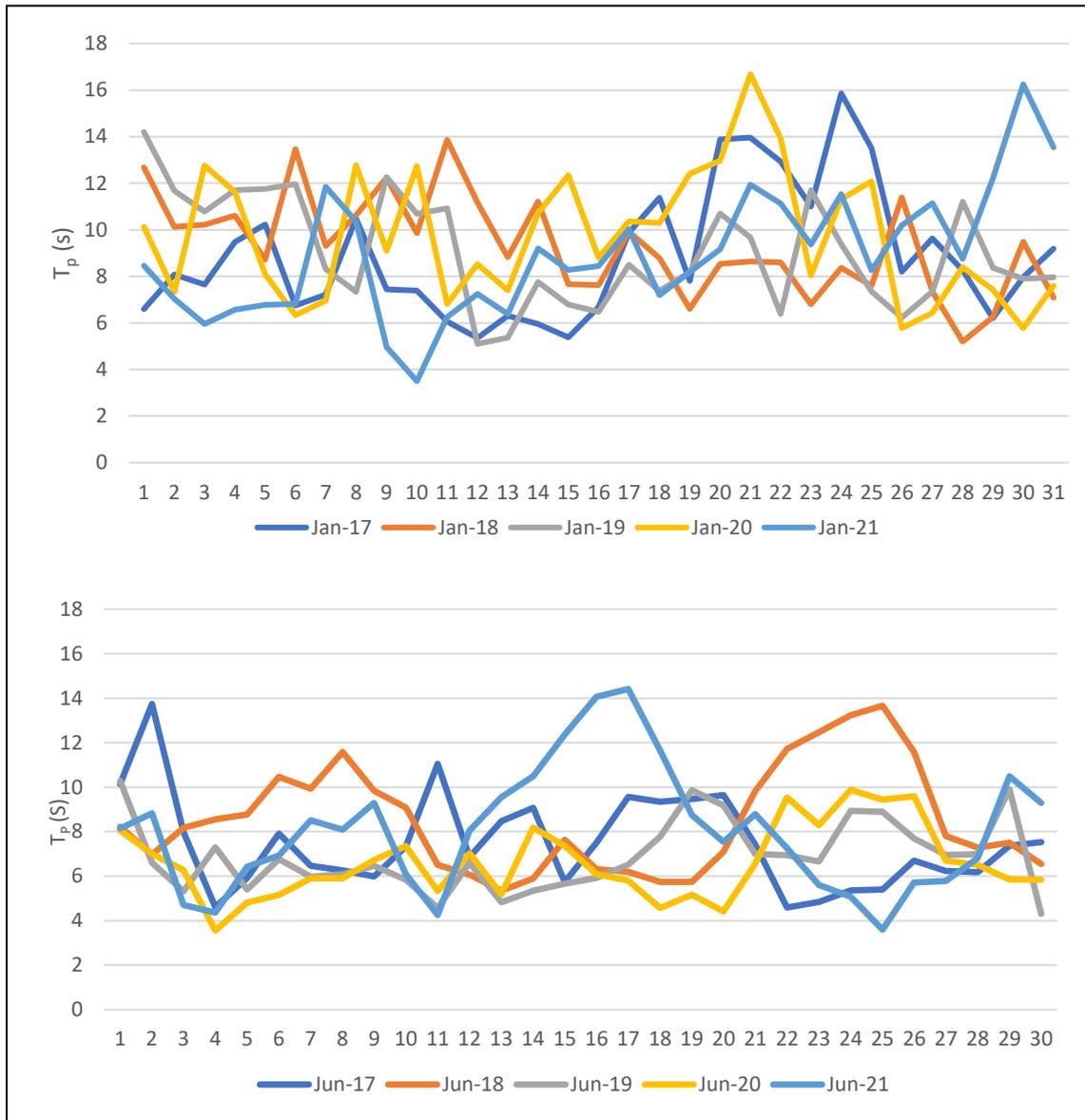
des vagues et de la période de pointe entre les mois d'hiver et d'été. La compréhension de cette variabilité sur plusieurs années joue un rôle important pour garantir que les évaluations de la production d'électricité sont réalistes et significatives.

Les analyses de 2021 ont suggéré que janvier représentait une période hivernale "orageuse" tandis que juin représentait une période estivale "plus calme". Ainsi, les données pour ces deux mois ont été analysées pour cinq années distinctes (Figure 7 et 8), ce qui était particulièrement visible en 2018 et 2020. Début juin 2017, il y a eu une période inhabituellement orageuse avec des hauteurs de vagues de près de 2,5 m. À la bouée de vagues de Chesil, en janvier, la hauteur significative moyenne (instantanée) des vagues est de 1,2 m, dépassant fréquemment 1 m tout au long de l'année et dépassant 2 m à plusieurs reprises. En juin, la hauteur significative moyenne des vagues est de 0,6 m et dépasse rarement 1 m (Figure 7). La hauteur moyenne quotidienne des vagues pour janvier est de 1,6 m, tandis que la hauteur moyenne quotidienne des vagues pour juin est de 0,6 m. La période de pointe quotidienne moyenne en janvier est de 9 secondes, dans une plage de 3,5 à 16,7 secondes, tandis que la période de pointe quotidienne moyenne pour juin est de 7,5 secondes et une plage de 3,5 à 16,2. Les données sur la période des vagues indiquent la contribution de la houle des tempêtes lointaines avec des périodes de vagues allant jusqu'à 15 secondes, ainsi que des mers de vent générées localement avec des périodes de 6 à 10 secondes (Figure 8). Les données estivales indiquent des périodes de très faible énergie des vagues. Cela donne lieu à certaines des faibles valeurs de la période des vagues en été.





**Figure 7 :** Hauteur moyenne quotidienne des vagues significatives ( $H_s$ ) en janvier (en haut) et en juin (en bas) de cinq années consécutives de 2017 à 2021 pour la plage de Chesil/la région de Portland, enregistrée à des intervalles de 30 minutes.



**Figure 8** : Période de pointe moyenne quotidienne ( $T_p$ ) de cinq années différentes de 2017 à 2021 pour la plage de Chesil/zone de Portland enregistrée à des intervalles de 30 minutes pour janvier (en haut) et juin (en bas).

### Calcul de la puissance des vagues

La puissance hydrodynamique des vagues ( c'est-à-dire la puissance disponible des vagues) est donnée par (Silva et al., 2013) comme :

$$P_W = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e,$$

où  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$  est la masse volumique de l'eau de mer ;  $g$  est l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s), et  $T_e$  est la période d'énergie . )

Waverider donnent généralement des valeurs de  $H_s$  et  $T_p$ , la période spectrale maximale. La période énergétique  $T_e$  est liée à la période spectrale crête  $T_p$  selon la forme du spectre. Les spectres JONSWAP généralement utilisés représentent un état de mer limité par fetch



typique de la mer du Nord dans lequel l'état de la mer n'est jamais complètement développé (Isherwood, 1987). Le spectre JONSWAP suit la relation :

$$T_e = \frac{T_p}{1.11},$$

Un spectre de Bretschneider représente un état de mer pleinement développé (Tucker, 1991). Le spectre de Bretschneider suit  $T_e = T_p / 1,17$  (Cahill et Lewis, 2014). Une valeur de 1,11 est supposée ici pour un cas JONSWAPP, en raison de considérations d'extraction similaires.

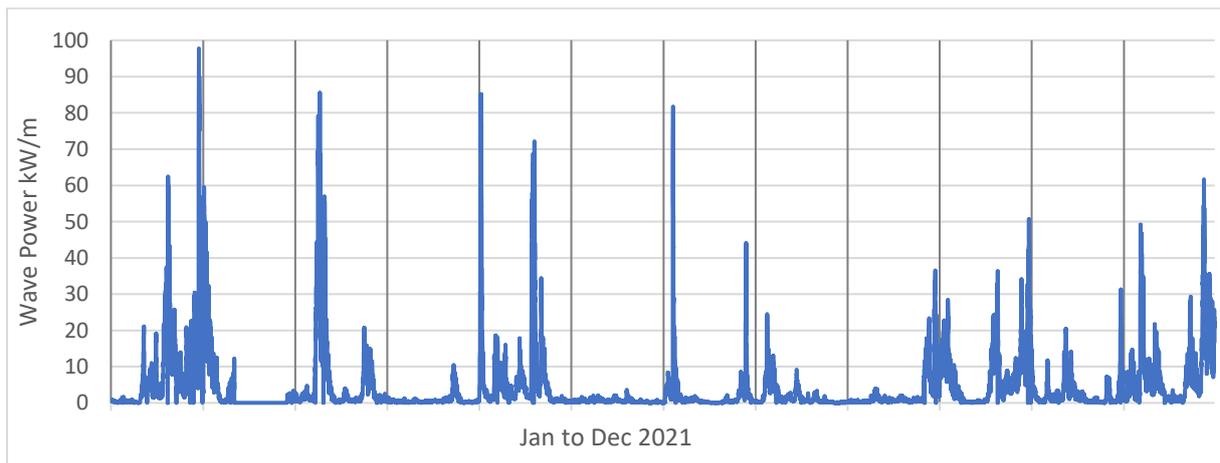
Les unités de l'équation  $P_w$  sont en W/m, donc une expression peut être obtenue pour donner une sortie de puissance en kW/m, avec des entrées de  $T_p$  et  $H_s$ . C'est:

$$P_W(kW/m) = \frac{\rho g^2}{1.11 \times 1000 \times 64 \pi} H_s^2 T_p$$

Cela peut être réécrit plus simplement en utilisant un coefficient remplaçant les constantes :

$$P_W(kW/m) = 0.44 H_s^2 T_p$$

La figure 9 donne la puissance des vagues calculée à partir des mesures des vagues enregistrées à la bouée des vagues de la plage de Chesil (Portland) à des intervalles de 30 minutes tout au long de 2021. Notez les pics tout au long de l'année, janvier enregistrant la plus grande puissance des vagues (en fréquence et en force) et Avril, juin et septembre ont le moins de puissance des vagues (en fréquence et en force). Alors que les pointes atteignent près de 100 kW/m fin janvier, il y a des périodes importantes avec très peu d'énergie. La production totale d'énergie des vagues sur l'année pour ces données est d'un peu moins de 73 000 kW/m, la puissance moyenne des vagues calculée avec les relevés de 30 minutes tout au long de 2021 est de 4,4 kW/m.



**Figure 9** : Puissance des vagues à la bouée à vagues de Chesil, près de Portland tout au long de 2021

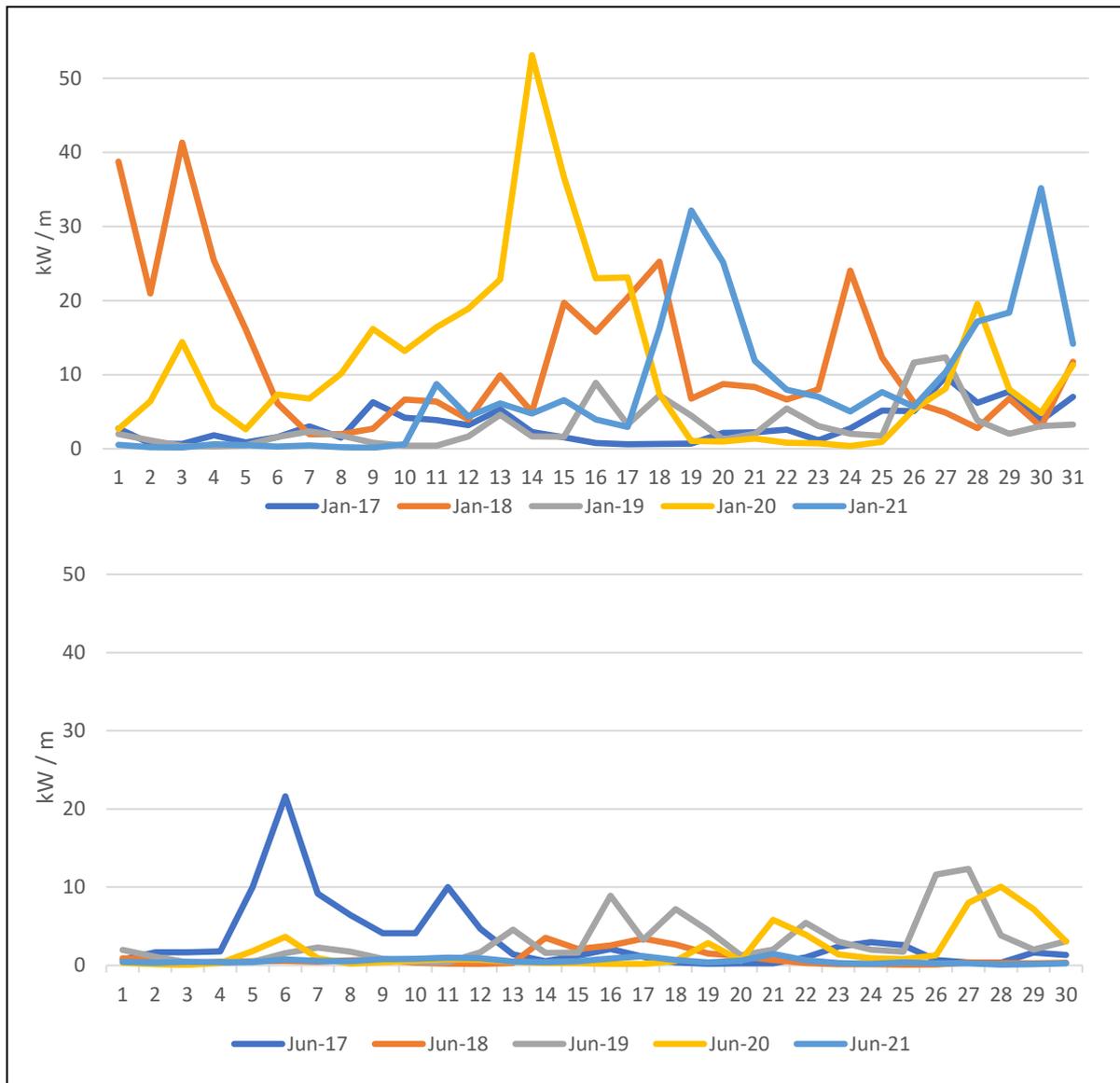
La moyenne des données sur l'énergie des vagues sur plusieurs années réduit l'influence des conditions de tempête hivernale sur la série chronologique et donne une image de la variabilité saisonnière de l'énergie des vagues entre les mois d'hiver et d'été.



Comme pour les calculs de la hauteur des vagues et de la période de pointe, les données d'une période orageuse représentative (janvier) ont été comparées à une période calme représentative (juin) (figures 7 et 8) pour explorer les différences de disponibilité énergétique hiver-été. À la bouée à vagues de Chesil, en janvier 2021, la puissance moyenne des vagues est de 8 kW/m, avec trois pointes dépassant 20 kW/m. En juin 2021, la puissance moyenne des vagues est de 2 kW/m, dépassant 4 kW/m à 6 reprises (Figure 10).

Les équations ci-dessus donnent l'énergie disponible des vagues et fournissent une forme fonctionnelle pratique pour analyser l'énergie disponible des vagues, à partir de la hauteur et de la période des vagues. En pratique, il y aura une perte d'énergie due à l'inefficacité de la conversion, et une perte parce que les turbines ne fonctionnent pas en dessous de hauteurs et de périodes de vagues spécifiques.





**Figure 10 :** Moyenne quotidienne de la puissance des vagues par mètre de crête de vague en janvier (en haut) et en juin (en bas) de cinq années consécutives. Calculé à l'aide de données sur la hauteur significative des vagues ( $H_s$ ) et la période de pointe ( $T_p$ ) enregistrées à des intervalles de 30 minutes sur la plage de Chesil/la région de Portland.

### Efficacité de conversion énergétique

L'efficacité de l'appareil est appelée coefficient de puissance et se calcule comme suit :

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_w}$$

Le coefficient de puissance de l'appareil varie en fonction de la hauteur et de la période des vagues. En utilisant les données d'Oyster et la puissance des vagues disponible, la matrice des coefficients de puissance est donnée dans le tableau 3.

**Tableau 3** : Coefficients de puissance pour Oyster

<b>Coefficients de puissance des huîtres</b>									
<i>T<sub>e</sub> (s) H<sub>s</sub> (m)</i>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>dix</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,13	0,12
1	0,50	0,63	0,68	0,66	0,61	0,55	0,49	0,49	0,44
1.5	0,89	0,79	0,73	0,68	0,63	0,58	0,53	0,47	0,45
2	0,88	0,77	0,68	0,62	0,54	0,49	0,46	0,42	0,38
2.5	0,77	0,66	0,60	0,51	0,45	0,42	0,39	0,34	0,32
3	0,67	0,55	0,47	0,42	0,38	0,32	0,30	0,27	0,25
3.5	0,00	0,46	0,40	0,35	0,31	0,27	0,25	0,22	0,21
4	0,00	0,38	0,33	0,28	0,24	0,23	0,20	0,18	0,17
4.5	0,00	0,30	0,26	0,23	0,19	0,18	0,16	0,14	0,13
5	0,00	0,00	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11
5.5	0,00	0,00	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,10	0,09
6	0,00	0,00	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07

Il est possible de calculer une efficacité moyenne du dispositif dans la région pertinente au climat des vagues. En pratique, la conception de l'appareil serait adaptée à l'environnement. Dans ce cas, des hauteurs de vagues allant jusqu'à (y compris) 1,5 m et sur toutes les périodes de vagues donnent une valeur moyenne du coefficient de puissance ( $C_p$ ) de 0,41 (d'autres hypothèses donneraient d'autres valeurs de  $C_p$ .)

Compte tenu des séries temporelles de hauteurs de vagues mesurées ( $H_s$ ) et des périodes de pointe des vagues ( $T_p$ ), l'équation suivante peut être utilisée pour calculer une série temporelle de puissance de sortie par m de crête de vague :

$$P_{out}(kW/m) = 0.44 C_p H_s^2 T_p,$$

À partir de cette série chronologique, les valeurs moyennes de la puissance des vagues et les valeurs totales de la puissance des vagues peuvent être déterminées.

La matrice de puissance hydrodynamique (tableau 4) montre la relation entre la hauteur des vagues et la période des vagues sur la puissance des vagues. La puissance des vagues augmente avec l'augmentation de la hauteur et de la période des vagues. Les valeurs d'une matrice d'efficacité de dispositif peuvent être calculées en divisant la puissance de sortie par la puissance hydrodynamique pour chaque paire de valeurs.



**Tableau 4** : Une matrice de puissance générée à l'aide de l'équation hydrodynamique de la puissance des vagues

<b>Matrice de puissance hydrodynamique (formule)</b>									
<i>Te (s)</i> <i>Hs (m)</i>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>dix</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
0,5	552	663	773	884	994	1105	1215	1326	1436
1	2210	2652	3094	3536	3978	4420	4862	5304	5746
1.5	4972	5967	6961	7956	8950	9945	10939	11934	12928
2	8840	10608	12376	14144	15912	17679	19447	21215	22983
2.5	13812	16574	19337	22099	24862	27624	30387	33149	35911
3	19889	23867	27845	31823	35801	39779	43757	47735	51712
3.5	27072	32486	37900	43315	48729	54143	59558	64972	70386
4	35359	42431	49502	56574	63646	70718	77790	84861	91933
4.5	44751	53701	62652	71602	80552	89502	98453	107403	116353

### Capacité houlomotrice dans le temps

Il s'agit d'une étape cruciale dans l'analyse pour avoir une idée de la capacité de puissance soutenue disponible sur le site d'intérêt. Le chercheur peut identifier les périodes de temps où il y a une puissance soutenue au-dessus et en dessous d'un certain seuil pendant des heures et des jours. Les seuils sont déterminés par les paramètres opérationnels du type de WEC considéré.

Pour l'étude de cas de Portland, un seuil représentatif a été défini comme des périodes pendant lesquelles l'énergie des vagues était comprise entre 0,17 kW/m et 18,5 kW, ce sont des seuils qui reflètent les paramètres opérationnels de la turbine Wells de la centrale de Mutriku . Ainsi, il n'y a pas de puissance générée en dessous d'une valeur de puissance des vagues de 0,17, et il n'y aura pas d'énergie supplémentaire générée au-dessus de 18,5 kW. Les turbines OWC Wells utilisées à Mutriku ont une capacité maximale de 18,5 kW, car les chambres OWC ont une largeur de 6 m, ce qui donne une capacité maximale de 3,1 kW/m. La gamme de hauteurs et de périodes de vagues que représente 0,17 kW/m est de 2,5 s et 0,4 m à 20 s et 0,14 m.



**Tableau 5** : Puissance totale des vagues disponible à Portland et puissance totale potentielle générée, en fonction des capacités de l'appareil Oyster.

<b>2021</b>	<b>Puissance de houle disponible <math>P_w</math> kWh/m</b>	<b>Puissance totale générée <math>P_o</math> (en kW/m)</b>
Janvier	5968	3640
Février	6067	3700
Mars	717	437
Avril	566	345
Peut	5432	3313
Juin	403	245
Juillet	1758	1072
Août	1343	819
Septembre	1519	927
Octobre	5568	3396
Novembre	1824	1113
Décembre	6065	3700
<b>Total annuel</b>	<b>37 235</b>	<b>22 713</b>

Pour 2021, la puissance totale pour chaque jour de chaque mois a été additionnée, puis une valeur moyenne pour chaque mois a été calculée (tableau 5). En utilisant les chiffres mensuels moyens de la puissance des vagues disponible et l'efficacité de l'appareil signalée pour l'Oyster, la puissance totale mensuelle générée par un appareil tel que l'Oyster peut être calculée. Ces informations sont utiles lors de la planification d'un calendrier de maintenance de l'appareil ; lors de l'examen des temps d'importation probables pour l'exportation vers le réseau, ou pour une utilisation avec un dispositif de stockage de batterie, ou lors de l'examen de la création d'un mix de production d'énergie optimal dans un système hybride d'apport marémoteur, éolien ou solaire (Coles et al., 2021).

Pour illustrer la ressource de vagues sur le site. les données des bouées de vagues ont été utilisées pour calculer une matrice de l'énergie des vagues disponible à Portland, à partir du climat des vagues enregistré tout au long de 2021. Le tableau 6 donne la somme des données de vagues enregistrées tombant dans les paramètres entre parenthèses de la hauteur des vagues en colonnes et les paramètres entre parenthèses correspondants de la période de la vague en lignes.



**Tableau 6** : Matrice de puissance calculée pour l'énergie des vagues disponible sur la base des paramètres climatiques des vagues enregistrés en 2021.

<b>Matrice de puissance totale (en kW/m)</b>							
<i>Te (s) Hs (m)</i>	.....	<b>6</b> (5.6-6.5)	<b>7</b> (6.6-7.5)	<b>8</b> (7.6-8.5)	<b>9</b> (8.6-9.5)	<b>10</b> (9.6-10.5)	....
.....							
0,4 (0,3-0,49)		<b>179</b>	<b>181</b>	<b>224</b>	<b>158</b>	<b>345</b>	
0,6 (0,5-0,69)		<b>304</b>	<b>301</b>	<b>342</b>	<b>176</b>	<b>362</b>	
0,8 (0,7-0,89)		<b>266</b>	<b>187</b>	<b>295</b>	<b>284</b>	<b>388</b>	
1,0 (0,9-1,19)		<b>554</b>	<b>469</b>	<b>888</b>	<b>590</b>	<b>829</b>	
1.2 (1.2-1.39)		<b>767</b>	<b>393</b>	<b>611</b>	<b>307</b>	<b>624</b>	
.....							

Le tableau 7 présente le nombre d'incidences enregistrées et le pourcentage de temps pendant lequel la puissance des vagues à la bouée à vagues de la plage de Chesil était inférieure au seuil de fonctionnement de l'usine de Mutriku, décrit ici comme la période de puissance exploitable, tout au long de 2021 et pour la mois de janvier. Comme le montre le tableau 7, tout au long de 2021, à Portland, les conditions de vagues pendant un peu plus de 90 % de l'année dépassent le seuil de 0,17 kW/m. Pendant le mois orageux de janvier, l'énergie des vagues était au-dessus du seuil supérieur de la puissance exploitable pendant 13 % du temps, donc aucune puissance supplémentaire ne serait générée.

Selon les besoins d'une évaluation donnée, cette analyse pourrait être répétée pour une série chronologique plus longue où une moyenne sur plusieurs années ajouterait de la profondeur à l'analyse, et/ou une analyse distincte pour chaque mois. Ce type d'analyse informera les limites d'un dispositif énergétique donné dans le lieu d'intérêt et pourrait aider à informer la période de l'année où il est préférable d'effectuer une maintenance par exemple.

**Tableau 7** : Puissance exploitable enregistrée dans le seuil supérieur à 0,17 kW/m et inférieur à 18 kW/m ; le nombre d'occurrences et le pourcentage de temps en 2021 et en janvier.

<b>2021</b>			<b>janvier 2021</b>		
<b>Puissance exploitable*</b>			<b>Puissance exploitable*</b>		
Nombre de lectures de 30 minutes > 0,17 kW/m	% du temps les relevés > 0,17 kW/m	% du temps les relevés > 18,5 kW/m	Nombre de lectures de 30 minutes > 0,17	% de lectures de temps > 0,17 kW/m	% du temps les relevés > 18,5 kW/m
15 155	91,5 %	6%	1255	89%	13%

\* Les heures où aucune donnée n'était disponible ont été omises du temps total

Une étape supplémentaire dans une étude détaillée d'une zone consisterait à modifier les seuils en fonction des seuils opérationnels des derniers développements technologiques dans les dispositifs houlomoteurs ou en permettant la prise en compte de différentes caractéristiques des dispositifs (par exemple, en modifiant les tailles d'orifice).



## Application en fonction des besoins en puissance de la zone d'intérêt

Une façon de quantifier la contribution des marées requise est de considérer les besoins énergétiques de la zone d'intérêt pendant une année. Par exemple, la population de Portland est d'environ 12 797 personnes. Au Royaume-Uni, la consommation moyenne d'énergie électrique par personne et par an est d'environ 2 900 kWh (Ofgem, 2022). L'île de Portland aurait donc actuellement besoin de 37 111 300 kWh par an (Miles, ICE tidal report). Le nombre de ménages pourrait également être utilisé pour informer une estimation des besoins en énergie d'une zone dans ce cas, Portland compte 5 175 ménages (Dorset Council, 2011).

Les caractéristiques de production d'énergie d'un exemple de turbine à vagues sont utilisées pour déterminer la taille de l'usine à vagues qui serait nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques de Portland compte tenu de la puissance potentielle des vagues du site. La longueur de la digue abritant suffisamment de dispositifs de colonne d'eau oscillante (OWC) peut être calculée en utilisant la puissance moyenne des vagues disponible. En utilisant les données de 2021, la puissance des vagues disponible est de 37 235 kWh/an/m (tableau 5).  
Puissance disponible des vagues ( $P_w$ ) = 37 235 kWh/an/m

$$C_p = 0,41$$

$$\text{Puissance convertie (} P_{out} \text{)} = C_p \times P_w = 15\,266 \text{ kWh/an/m}$$

$$\text{Puissance convertie (} P_{out} \text{) en unités de MWh/an/m} = 15,3 \text{ MWh/an/m}$$

$$\text{de l'île de Portland} = 37\,111 \text{ MWh/an}$$

$$\text{Longueur de l'appareil nécessaire} = \text{Besoin énergétique} / P_{out} = 997 \text{ m.}$$

Si le rendement  $C_p$  était de 1, alors la longueur de l'appareil serait de  $37\,111\,000 / 15\,266 = 2\,431 \text{ m}$ .

En utilisant une longueur de mur de 2 431 m et une population de 12 797 habitants, la longueur de mur OWC requise par personne est de  $2\,431 / 12\,797 = 0,19 \text{ m/personne}$ .

**Tableau 8 :** Demande et production d'énergie par les éoliennes

	Facture de Portland
Demande insulaire annuelle	37 111 MWh
Production annuelle d'énergie de l'appareil par m d'onde	15 266 kWh/an/m
Structure énergétique Longueur	2.431 km

Pour répondre à la demande énergétique de l'île de Portland avec l'énergie des vagues, une structure d'environ 2400 m de longueur serait nécessaire. Le côté mer de l'île mesure un peu plus de 10 km de long. L'énergie des vagues a donc le potentiel d'être un contributeur majeur à l'approvisionnement en énergie de l'île de Portland.



## Les références

Biscay Marine Energy Platform (BiMEP): <https://www.bimep.com/en/mutriku-area/technical-characteristics/>

Boake, C. B., T. J.T. Whittaker, M. Folley and H. Ellen (2002). 'Overview and Initial 920 Operational Experience of the LIMPET Wave Energy Plant'. In: Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference 12. February 2015, pp. 586–594.

Cahill, B and A W Lewis (2014). 'Wave period ratios and the calculation of wave power'. In: The 2nd Marine Energy Technology Symposium, pp. 1–10.

CANDHIS: <http://www.cetmef.equipement.gouv.fr/donnees/candhis/home.php>.

Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science (CEFAS) <https://wavenet.cefas.co.uk/Map>

Coles, D., Angeloudis, A., Goss, Z., and Miles, J. (2021). Tidal Stream vs. Wind Energy: The Value of Cyclic Power when Combined with Short-Term Storage in Hybrid Systems. *Energie* 14, 1106. <https://doi.org/10.3390/en14041106>

Dorset Council. Area profile for Portland (2011) <https://mapping.dorsetcouncil.gov.uk/statistics-and-insights/AreaProfiles/Town/portland>. Source: 2011 Census. Office for National Statistics.

Falcão, A. Wave energy utilization: A review of the technologies. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 14, Issue 3, April 2010, Pages 899-918

Folley, M., T. Whittaker and M. Osterried (2004). 'The Oscillating Wave Surge Converter'. In: Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference January 2004, pp. 189–193. issn: 10986189

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA) Analyses of the energy consumption of the household sector in Spain 2011. [www.SECH\\_Spain.pdf](http://www.SECH_Spain.pdf) (europa.eu)

Isherwood, R M (1987). 'Technical note: A revised parameterisation of the Jon[1]swap spectrum'. In: *Applied Ocean Research* 9.1, pp. 47–50. issn: 0141-1187. doi: [https://doi.org/10.1016/0141-1187\(87\)90030-1](https://doi.org/10.1016/0141-1187(87)90030-1) url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0141118787900307>

National Network of Regional Coastal Monitoring Programmes (NNRCMP) <https://coastalmonitoring.org/>

Ofgem, 2022. <https://usave.co.uk/energy/how-much-energy-does-the-average-uk-household-consume/>

Power-technology: Mutriku Wave Energy Plant, Basque Country, Spain (power-technology.com) June 7 2021.

Silva, D., E. Rusu and C. Guedes Soares (2013). Evaluation of Various Technologies for Wave Energy Conversion in the Portuguese Nearshore. *Energies*, 6, 1344-1364

Stamnes, J. (1986) *Waves in Focal Regions: Propagation, Diffraction and Focusing of Light, Sound and Water Waves*. <https://doi.org/10.1201/9780203733998>

Tucker, M J (1991). *Waves in Ocean Engineering: Measurement, Analysis, Interpretation*. Ellis Horwood Series in Applied Science and Industrial Techn. E. Hor[1]wood. isbn: 9780139329555. url: <https://books.google.co.uk/books?id=mv5RAAAAMAAJ>.

Wavenergy it: <https://www.wavenergy.it/generico/the-first-worldwide-application-at-full-scale-of-the-rewec3-device-in-the-port-of-civitavecchia/2014>.

Whittaker, T and Folley, M. Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster Source. In: *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 28 January 2012, Vol. 370, No. 1959, The Peaks and troughs of wave energy: the dreams and the reality (28 January 2012), pp. 345-364 Published by: Royal Society Stable URL: <https://www.jstor.org/stable/41348239>

