



# Interreg



## France ( Channel Manche ) England

**RAPPORT ICE T1.1.1 : VUE D'ENSEMBLE  
DU POTENTIEL  
D'APPROVISIONNEMENT EN ENERGIE**

26/02/2018



# Rapport ICE T1.1.1 :

## Vue d'ensemble du potentiel d'approvisionnement en énergie renouvelable

---

Jon Hardwick, Helen C.M. Smith, Oscar Fitch-Roy, Peter M. Connor, Senthilarasu Sundaram



## À propos du projet ICE

Financé par le programme européen INTERREG VA France (Manche) Angleterre, le projet Intelligent Community Energy (ICE) vise à concevoir et à mettre en œuvre pour les territoires isolés de la Manche, des solutions intelligentes novatrices en matière d'énergie. Les îles et les communautés isolées sont confrontées à des défis énergétiques uniques. De nombreuses îles ne sont pas raccordées à des réseaux de distribution d'électricité plus vastes et dépendent de sources d'énergie importées, généralement alimentées par des combustibles fossiles. Les systèmes énergétiques dont dépendent les communautés isolées ont tendance à être moins fiables, plus coûteux et à produire plus d'émissions de gaz à effet de serre (GES) que les systèmes utilisés sur le continent. En réponse à ces problèmes, le projet ICE prend en compte l'ensemble du cycle énergétique, de la production à la consommation, et intègre des technologies nouvelles et établies afin de proposer des solutions innovantes en matière de systèmes énergétiques. Ces solutions seront mises en œuvre et testées sur nos sites de démonstration pilotes uniques (l'île d'Ouessant et le campus de l'Université d'East Anglia), afin de démontrer leur faisabilité et de développer un modèle général qui pourrait être appliqué à d'autres systèmes énergétiques intelligents isolés ailleurs. Le consortium ICE rassemble des centres de recherche et des organismes de soutien aux entreprises en France et au Royaume-Uni. De plus, l'engagement vis-à-vis des PME soutiendra le déploiement du projet et favorisera la coopération européenne.



## Table des matières

1.	Introduction .....	6
2.	Vue d'ensemble des technologies renouvelables et de la quantification des ressources .....	7
2.1	Vue d'ensemble .....	7
2.2	Contraintes affectant le déploiement des technologies.....	8
2.2.1	Contraintes liées aux ressources.....	8
2.2.2	Contraintes techniques.....	8
2.2.3	Contraintes environnementales et patrimoniales.....	9
2.2.4	Contraintes sociales et politiques.....	9
2.3	Coûts moyens actualisés de l'énergie.....	9
3.	Types de technologies.....	10
3.1	Technologies solaires.....	10
3.1.1	Vue d'ensemble .....	10
3.1.2	Contraintes.....	13
3.1.3	Méthodologie de quantification de la ressource.....	16
3.1.4	Calcul de l'énergie produite.....	17
3.2	Technologies marémotrices.....	17
3.2.1	Vue d'ensemble .....	17
3.2.2	Contraintes.....	19
3.2.3	Méthodologie de quantification de la ressource.....	21
3.2.4	Calcul de l'énergie produite.....	23
3.3	Technologies des vagues.....	23
3.3.1	Vue d'ensemble .....	23
3.3.2	Contraintes.....	25
3.3.3	Méthodologie de quantification de la ressource.....	26
3.3.4	Calcul de l'énergie produite.....	28
3.4	Technologies éoliennes.....	28
3.4.1	Vue d'ensemble .....	28
3.4.2	Contraintes.....	30
3.4.3	Méthodologie de quantification de la ressource.....	32
3.4.4	Calcul de l'énergie produite.....	33
3.5	Déchets et biomasse.....	34
3.5.1	Vue d'ensemble .....	34
3.5.2	Contraintes.....	36



3.5.3	Méthodologie de quantification de la ressource.....	37
3.6	Stockage de l'énergie.....	37
4.	Applicabilité aux pays concernés .....	38
4.1	France.....	38
4.2	Royaume-Uni .....	39
5.	Applicabilité aux sites principaux concernés .....	40
5.1	Ushant / Ouessant .....	40
5.2	Campus de l'Université d'East Anglia.....	41
6.	Conclusions .....	42
	Bibliographie .....	44



## Table des figures

Figure 2-1 : Diagramme de flux décrivant le processus d'évaluation des ressources pour les technologies renouvelables, y compris les contraintes de développement .....	8
Figure 3-1 : Exemples d'installations d'énergie solaire : installation photovoltaïque au sol (en haut), installation thermique solaire sur les toits (en bas à gauche) et installation photovoltaïque sur les toits (en bas à droite).....	11
Figure 3-2 : Carte de l'irradiation globale horizontale (source : SolarGIS, 2018) .....	14
Figure 3-3 : Exemples de technologie marémotrice : turbine OpenHydro déployée à l'EMEC (source : OpenHydro, 2018) (en haut à gauche), turbine Sabella D10 (source : Open Ocean, 2015) (en haut à droite), usine marémotrice de La Rance (en bas).....	18
Figure 3-4 : Exemples d'appareils d'énergie des vagues : la centrale terrestre OWC de Pico aux Açores (source : Pico OWC, 2006) (en haut à gauche), l'appareil en zone côtière Wavestar avec des absorbeurs ponctuels flottants (source : Wavestar, pas de date) (en haut à droite), le « BOLT II Lifesaver » en mer de Fred Olsen (en bas).....	24
Figure 3-5 : Diagramme de dispersion montrant la relation entre la hauteur significative de vagues et la période d'énergie sur le site de test d'énergie des vagues FaBTest, réalisé par l'Université d'Exeter (Parish & Hardwick 2012) .....	28
Figure 3-6 : Exemples d'éoliennes commerciales : éolienne à axe horizontal Siemens SWT-2.3-101 (source : Siemens, 2018) (en haut à gauche), éolienne en mer MHI Vestas (source : MHI Vestas, 2018) (en bas à gauche), éolienne à axe vertical Quiet Revolution qr6 (source : Quietrevolution, pas de date) (à droite).....	29
Figure 3-7 : Densité moyenne agrégée de la puissance du vent ( $W/m^2$ ) à 50 m dans le sud du Royaume-Uni et le nord de la France (source : Global Wind Atlas, 2017) .....	32
Figure 3-8 : La centrale modulaire de biogaz Flexibuster (source : SEaB Energy, 2016) .....	35
Figure 3-9 : Le processeur Plaxx RT7000 permettant de convertir des plastiques mixtes en carburant (source : Recycling Today, 2017) .....	36
Figure 4-1 : Carte des installations d'énergie renouvelable au Royaume-Uni en 2014 (source : UK Data Explorer, 2014) .....	40
Figure 5-1 : L'île d'Ouessant et sa situation au large de la côte nord-ouest de la France.....	41
Figure 5-2 : L'emplacement du campus de l'Université d'East Anglia à Norwich, dans l'est du Royaume-Uni .....	42



## 1. Introduction

Le présent rapport examine les technologies d'énergie renouvelable disponibles pour les communautés isolées, décrit les méthodologies appropriées pour évaluer les ressources disponibles et détermine les principales contraintes. Un rapport parallèle, intitulé « T1.1.2 Questions politiques », décrit les facteurs réglementaires et politiques pertinents dans le cadre des objectifs du projet ICE, en se concentrant sur les politiques et les réglementations qui ont une incidence sur la production, la distribution et la consommation d'énergie dans les régions visées par le projet. Ensemble, les deux rapports remplissent la tâche T1.1 du projet ICE.

L'un des deux sites sélectionnés comme études de cas pour le projet ICE est Ouessant, une communauté insulaire de quelques centaines d'habitants isolée électriquement et située au large de la côte du nord-ouest de la France. L'autre site est le campus principal de l'Université d'East Anglia (UEA), un grand établissement d'enseignement, de recherche et d'hébergement accueillant plus de 15 000 étudiants dans l'est de l'Angleterre. Les systèmes énergétiques de ces sites semblent présenter peu de similitudes. Ouessant est isolée électriquement : elle ne possède pas de raccordement physique avec la France continentale. Il s'agit d'une commune administrée de façon publique, ce qui signifie que les changements proposés concernant son système énergétique relèvent d'une prise de décision coopérative. Le campus de l'UEA est raccordé aux réseaux locaux de distribution de gaz et d'électricité avec une capacité suffisante pour répondre à ses besoins énergétiques actuels et futurs. Le campus fonctionne comme un site privé, ce qui offre une plus grande autonomie aux décideurs en matière d'énergie.

Cependant, les sites ont deux facteurs clés en commun en ce qui concerne leur approvisionnement en énergie. Tout d'abord, il s'agit de deux zones géographiques relativement petites. Le campus de l'UEA s'étend sur 130 hectares, tandis que l'île d'Ouessant possède une superficie d'environ 1 500 hectares. En outre, tous deux présentent des limites électriques clairement définies : Ouessant en raison de son isolement et l'UEA en raison de son statut de campus géré. Deuxièmement, les deux sites sont fortement incités à apporter des changements à leurs systèmes énergétiques qui nécessitent l'utilisation de technologies innovantes en matière d'approvisionnement en énergie ou de gestion de l'énergie. À Ouessant, le système énergétique actuel dépend entièrement des combustibles fossiles acheminés depuis la France continentale pour l'électricité, le chauffage et le transport. Par ailleurs, son système électrique est fortement tributaire d'une seule centrale. Les conséquences de cet arrangement en matière de coûts, de sécurité et d'environnement ne sont pas viables. Bien que le campus de l'UEA soit raccordé aux réseaux d'électricité et de gaz de la Grande-Bretagne, l'UEA est une université de recherche qui, en tant que telle, est fortement incitée à ouvrir la voie sur les questions environnementales, notamment en mettant en place des systèmes énergétiques plus propres et plus efficaces ainsi qu'en minimisant le coût de la fourniture de services énergétiques au personnel et aux étudiants. Toutes les universités du Royaume-Uni doivent atteindre des objectifs concernant la réduction des émissions de carbone imposés par le gouvernement (HEFCE, 2010).

Un système énergétique insulaire isolé électriquement est confronté à des défis uniques. La difficulté de répondre aux besoins énergétiques des habitants sans bénéficier de l'interconnexion à des réseaux électriques plus importants est aggravée par la nécessité de le faire en évitant des coûts économiques ou environnementaux inutiles. Toutefois, ces dernières années, des progrès ont été accomplis dans le domaine des technologies d'approvisionnement en énergie (principalement les technologies de



conversion des énergies renouvelables) et dans les technologies axées sur la demande (telles que les technologies de gestion de la demande et de l'information ainsi que le stockage de l'énergie). Il existe un consensus croissant sur le mérite de ces « réseaux intelligents » qui peuvent intégrer intelligemment à la fois les producteurs et les consommateurs d'électricité afin de fournir une énergie sûre et durable à partir de multiples sources.

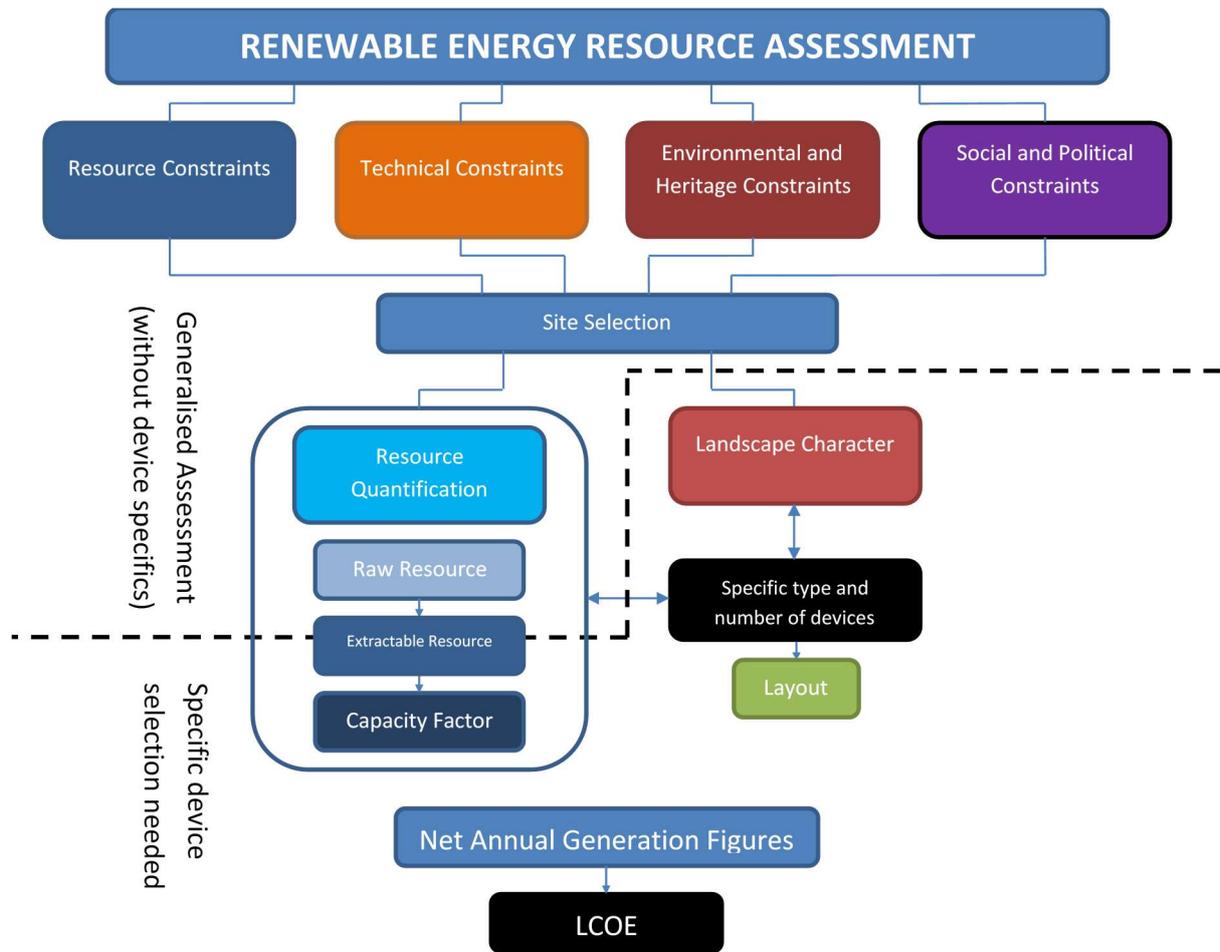
Le présent rapport détermine les technologies renouvelables disponibles qui conviendraient aux communautés isolées et présente un cadre pour entreprendre une évaluation des ressources pour chacune de ces technologies. Une évaluation des ressources d'énergie renouvelable est effectuée afin de quantifier l'énergie disponible sur un ou plusieurs sites et d'estimer la quantité d'électricité ou de chaleur qui peut être extraite. Les diverses sources d'énergie renouvelable posent différents problèmes relatifs à l'intermittence et à la prévisibilité. Elles présentent également des contraintes variées qui affectent l'exploitation de la ressource. L'objectif du présent document est de permettre aux parties prenantes de comparer facilement les avantages et les limites des différents types de technologies et de décider quelles technologies elles souhaitent explorer davantage.

## 2. Vue d'ensemble des technologies renouvelables et de la quantification des ressources

### 2.1 Vue d'ensemble

Dans le cadre du processus de sélection d'un site pour tout déploiement d'énergie renouvelable, il faut généralement suivre un processus d'évaluation tel que celui décrit à la Figure 2-1. Les contraintes associées au déploiement de chaque technologie sont d'abord définies, ce qui permet de sélectionner les sites appropriés pour une analyse détaillée. Une évaluation complète de la ressource brute est effectuée pour le ou les sites sélectionnés et les caractéristiques de rendement des installations sont ensuite appliquées afin de prédire la production annuelle d'énergie du projet, en tenant compte des variations de la ressource. Pour finir, les dépenses en capital et les coûts opérationnels sont intégrés pour calculer les coûts moyens actualisés de l'énergie (« levelised cost of energy » ou « LCOE » en anglais), ce qui permet d'évaluer la viabilité financière du projet.





**Figure 2-1** : Diagramme de flux décrivant le processus d'évaluation des ressources pour les technologies renouvelables, y compris les contraintes de développement

## 2.2 Contraintes affectant le déploiement des technologies

### 2.2.1 Contraintes liées aux ressources

Toutes les technologies d'énergie renouvelable nécessitent une ressource naturelle. Pour la plupart des technologies, cette ressource est variable ou intermittente, à l'exception de la production de biomasse qui dépend d'un approvisionnement fiable en matière première. La quantification de la ressource brute constitue un facteur clé dans l'évaluation du potentiel de déploiement d'une technologie renouvelable. La détermination de la ressource implique généralement une combinaison de modélisation numérique et de collecte de données *in situ*. Les ressources plus intermittentes, telles que l'énergie solaire, éolienne et l'énergie des vagues, nécessitent des ensembles de données plus longs par rapport aux ressources prévisibles telles que l'énergie marémotrice afin de calculer avec précision la disponibilité de la ressource.

### 2.2.2 Contraintes techniques

Les contraintes techniques sont des restrictions pratiques relatives à la technologie, par exemple un terrain inadapté ou un manque d'accès au réseau. Les zones qui disposent le plus de la ressource brute peuvent ne pas être adaptées au déploiement de la technologie, par exemple si elles sont isolées ou si elles ne possèdent pas d'infrastructures appropriées. De même, les zones urbaines sont susceptibles de présenter des limitations pratiques à cause de la présence d'habitations, de routes et d'autres



infrastructures existantes. Si la demande est insuffisante pour une utilisation de l'énergie sur le site, toute technologie renouvelable productrice d'électricité nécessitera un raccordement au réseau d'une capacité suffisante ou un autre mécanisme permettant d'atténuer les pertes, tel que le stockage de l'électricité. Tous les sites de déploiement devront disposer d'un accès approprié pour la construction et l'entretien.

### 2.2.3 Contraintes environnementales et patrimoniales

De nombreux sites présentant des niveaux appropriés de ressources brutes se trouvent à l'intérieur ou à proximité de zones d'intérêt environnemental ou naturel. Ces zones comprennent :

- les parcs nationaux ;
- les réserves naturelles ;
- les zones d'intérêt scientifique ou naturel ;
- les zones où la flore ou la faune est protégée ;
- les environnements protégés (p. ex. zones humides, forêts anciennes) ;
- les zones de conservation du paysage ;
- les sites du patrimoine mondial de l'UNESCO ;
- les autres zones d'importance culturelle ou naturelle.

Les pays et les régions possèdent des classifications pour les zones protégées ou de conservation qui s'accompagnent de limites en matière de développement ou d'exigences spécifiques à la juridiction locale. Ces classifications peuvent restreindre l'installation de technologies d'énergie renouvelable et de l'infrastructure nécessaire. De nombreuses technologies renouvelables entraînent des conséquences écologiques (p. ex. Copping et al., 2016 ; Wang & Wang, 2015 ; Hernandez et al., 2014), et les considérations environnementales doivent être prises en compte dans l'aménagement de tout développement. L'impact visuel des technologies renouvelables peut également constituer un facteur important, en particulier dans les zones de beauté naturelle ou d'importance historique. Cet impact sera pris en compte dans les demandes d'aménagement relatives au projet. La législation pertinente est examinée dans le rapport du projet ICE intitulé « T1.1.2 Questions politiques » qui accompagne le présent document.

### 2.2.4 Contraintes sociales et politiques

L'installation d'une technologie de production d'électricité peut avoir une incidence sur les parties prenantes locales, y compris les résidents, les visiteurs et les entreprises, par exemple un impact visuel, du bruit ou une perte de confort. Il se peut qu'il existe une réglementation en matière d'aménagement du territoire afin de limiter les lieux dans lesquels les technologies pourraient être mises en place. Les politiques et la législation pertinentes sont examinées dans le rapport du projet ICE intitulé « T1.1.2 Questions politiques ».

## 2.3 Coûts moyens actualisés de l'énergie

Les coûts moyens actualisés de l'énergie (LCOE) sont le coût unitaire de l'énergie produite pendant la durée de vie d'un projet, y compris les dépenses en capital initiales, les coûts opérationnels permanents et les coûts de la mise hors service, calculés comme suit :

$$LCOE = \frac{\text{Costs over lifetime of a project}}{\text{Total amount of electrical energy generated}}$$



Cette mesure peut être utilisée pour comparer des méthodes de production d'énergie dont les modes de fonctionnement peuvent sensiblement différer. Par exemple, les coûts d'une centrale au gaz sont très différents de ceux d'un parc éolien. La centrale au gaz aura des coûts permanents élevés liés au combustible, alors qu'une grande partie des coûts du parc éolien pourraient être des coûts initiaux. Le calcul des LCOE attendus pour un projet nécessite d'analyser les coûts liés à la planification, à l'installation, au fonctionnement, à l'entretien et à la mise hors service ainsi que de prévoir la quantité d'énergie qui sera produite. La nécessité de prévoir la production sur la durée de vie des projets implique que les calculs comportent souvent de grandes incertitudes, en particulier pour les technologies non testées telles que les réseaux de houlomotrices (BEIS, 2016). Les LCOE sont donc une mesure inappropriée pour comparer des technologies renouvelables immatures avec des technologies commerciales établies. Une méthodologie de calcul des LCOE pour les technologies de stockage est fournie par Pawel (2014).

## 3. Types de technologies

### 3.1 Technologies solaires

#### 3.1.1 Vue d'ensemble

Il existe deux méthodes principales de conversion de l'énergie solaire : l'utilisation de panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité et le chauffage thermique. Des exemples de ces deux systèmes sont présentés à la Figure 3-1. Les installations solaires photovoltaïques convertissent le rayonnement solaire en électricité qui peut être utilisée localement ou injectée dans le réseau. Les centrales thermiques solaires convertissent le rayonnement solaire en chaleur qui peut être utilisée pour l'eau, le chauffage des locaux ou la production d'électricité. La baisse importante des prix mondiaux au cours de la dernière décennie signifie que les panneaux solaires sont largement utilisés comme solution d'énergie renouvelable simple et peu coûteuse. Les déploiements vont des petites installations sur les toits d'habitations aux grandes fermes commerciales d'une capacité de plusieurs centaines de mégawatts.





**Figure 3-1 :** Exemples d'installations d'énergie solaire : installation photovoltaïque au sol (en haut), installation thermique solaire sur les toits (en bas à gauche) et installation photovoltaïque sur les toits (en bas à droite)

L'énergie solaire convient bien au déploiement dans les communautés isolées en raison des différentes échelles de déploiement disponibles et des faibles niveaux d'infrastructure requis. Les installations solaires produisent efficacement de l'électricité sous la plupart des latitudes, même si les sites plus éloignés de l'équateur produisent moins, surtout en hiver. Il s'agit d'une technologie particulièrement efficace pour répondre à la demande. Par contre, sa production augmente en été et diminue en hiver. Par conséquent, elle pourrait ne pas être la source unique d'énergie la plus appropriée dans les communautés où la demande est importante en hiver.

La quantification des ressources implique de mesurer ou de modéliser le rayonnement solaire atteignant le site. Le rayonnement solaire peut être mesuré à l'aide d'équipements *in situ* ou de satellites, ou être modélisé à l'aide de progiciels commerciaux. Pour une latitude connue, le nombre d'heures de clarté et la trajectoire relative du soleil sont intrinsèquement prévisibles. Les modèles météorologiques et les données historiques peuvent également être utilisés pour déterminer l'importance de la couverture nuageuse, la température et les conditions météorologiques probables. Les données peuvent être analysées sur différentes périodes, depuis les calculs à long terme du rendement total attendu d'une installation sur la durée du projet jusqu'à la variabilité à court terme mettant en lien la production avec la demande tout au long de la journée.

La taille et l'orientation des panneaux sont fondamentales pour les niveaux de conversion énergétique. Il faut tenir compte de la ligne d'horizon et de toute caractéristique qui limitera la



lumière directe du soleil, ainsi que de toute perte due aux conditions atmosphériques. Il existe des systèmes de poursuite solaire qui permettent d'augmenter la production d'électricité en orientant continuellement les cellules photovoltaïques vers l'angle et la direction les plus appropriés par rapport au soleil. Si l'utilisation d'un tel système est envisagée, il convient d'en tenir compte dans le calcul de la ressource.

### Photovoltaïque solaire

Les matériaux photovoltaïques produisent un courant électrique par le biais de l'effet photoélectrique lorsqu'ils sont exposés à un rayonnement électromagnétique. Les matériaux utilisés dans les cellules solaires sont conçus pour répondre de manière optimale aux fréquences de lumière les plus abondantes du rayonnement solaire. L'électricité produite est du courant continu (CC), mais à l'aide d'un convertisseur continu-alternatif, elle peut être convertie en courant alternatif (CA) et injectée dans un réseau électrique ou stockée dans des batteries.

La première cellule solaire photovoltaïque a été mise au point en 1954. Par la suite, les cellules solaires sont devenues une technologie courante, regroupées en trois catégories (première, deuxième ou troisième génération) (IRENA, 2016).

- Les cellules solaires de première génération sont produites à partir de silicium cristallin et constituent la majorité des installations solaires dans le monde. Elles sont relativement peu coûteuses et représentent une technologie bien établie depuis 25 ans.
- Les technologies de deuxième génération ou à couches minces utilisent moins de matériaux et ont des coûts de production inférieurs à ceux des cellules à plaquettes de silicium. Leur faible coût, leur poids léger et leur conception flexible les rendent idéales pour les applications non standard telles que les installations en mer.
- Les cellules de troisième génération englobent divers types de nouvelles technologies en cours de développement, notamment les cellules photovoltaïques à concentration et les cellules photovoltaïques organiques.

Le photovoltaïque à concentration utilise des cellules capables de convertir une quantité d'énergie nettement supérieure à celle qu'elles reçoivent directement du soleil, en focalisant le rayonnement atteignant une grande zone sur une cellule plus petite, à l'aide de lentilles ou de miroirs. Cela permet d'exploiter plus d'énergie à moindre coût (Baig et al., 2012).

Le marché de l'énergie photovoltaïque a connu une croissance annuelle moyenne de plus de 40 % au niveau mondial pendant plus d'une décennie. L'amélioration des techniques de fabrication a contribué à une baisse significative du coût de production des cellules solaires. Les prix des modules à couches minces de deuxième génération étaient par exemple de 0,5 \$ USD/W début 2016 (IRENA, 2016).

### Technologie de la thermie solaire à basse et moyenne température

La production de chaleur représente une part importante de la consommation annuelle d'énergie. Par exemple, en 2012, le chauffage représentait 47 % de la consommation totale d'énergie au Royaume-Uni (Connor et al, 2015). Au lieu de convertir l'énergie solaire en électricité destinée à la production électrique de chaleur, le rayonnement solaire peut être utilisé directement pour le chauffage. Dans un cadre domestique ou commercial, cela signifie faire chauffer un fluide (eau ou autre) pour l'utiliser



directement ou alimenter des échangeurs de chaleur afin de fournir de l'eau chaude. Cela peut aussi signifier utiliser un système de chauffage solaire de l'air pour le chauffage des locaux.

Il existe d'autres utilisations de l'énergie solaire à basse et moyenne température que le chauffage de l'eau et des locaux. Par exemple, les fours solaires peuvent être utilisés pour la cuisson ou le séchage, réduisant ainsi les besoins en combustibles fossiles.

#### Technologie de la thermie solaire à haute température

L'énergie solaire à concentration (« CSP » en anglais) est un système dans lequel le rayonnement solaire est collecté sur une grande surface et concentré sur un point focal plus petit par réflexion à partir de miroirs paraboliques. Cela chauffe un fluide qui est utilisé pour créer de la vapeur à haute température afin d'actionner une turbine, comme dans une centrale thermique classique. Ce système nécessite un contrôle précis des miroirs collecteurs afin de s'assurer que le rayonnement est focalisé sur le bon point.

Contrairement aux panneaux solaires, les générateurs CSP peuvent retarder la production de plusieurs heures en stockant la vapeur à haute température avant la production. Cela offre une protection contre l'intermittence. Les centrales CSP nécessitent de couvrir une grande surface avec des capteurs solaires et d'ériger une haute structure centrale qui servira de point focal. Ces centrales sont plus adaptées aux endroits comportant de grandes surfaces de terres inutilisées, comme les déserts.

### 3.1.2 Contraintes

#### Contraintes liées à la ressource

Les paramètres clés de la quantification de la ressource solaire utilisent différentes mesures afin d'évaluer la quantité de rayonnement solaire reçue. Il s'agit des mesures suivantes :

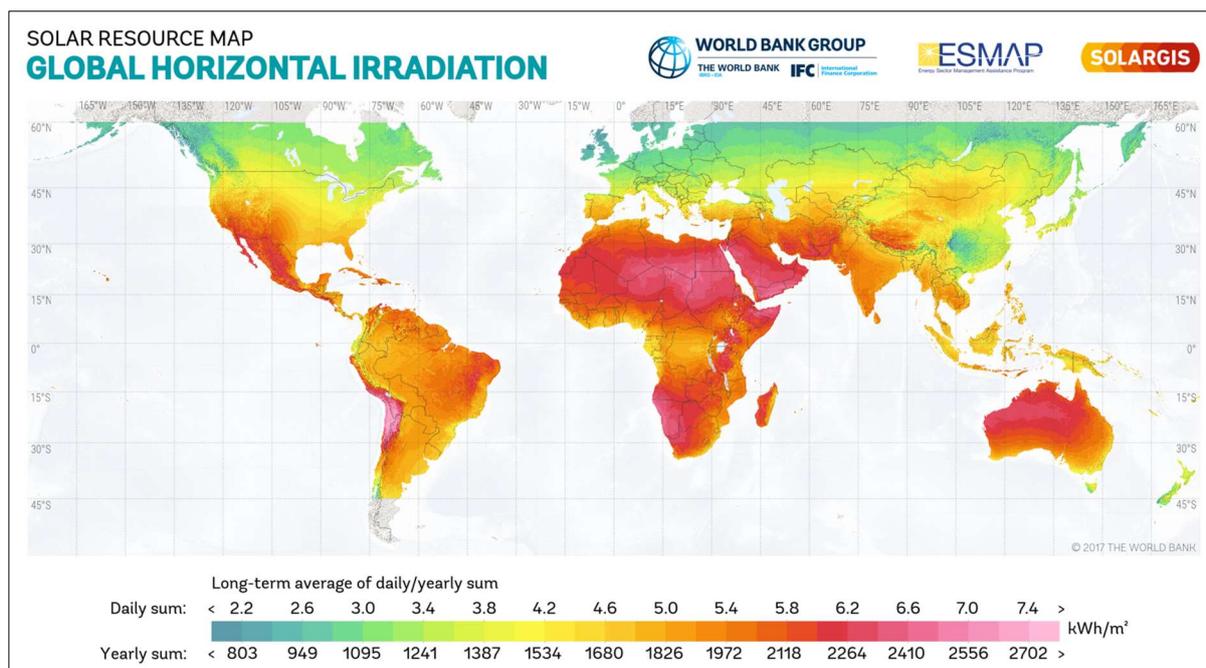
- l'irradiation directe normale (IDN) : rayonnement solaire reçu par unité de surface par une surface perpendiculaire aux rayons du soleil ;
- l'irradiation globale horizontale (IGH) : rayonnement reçu par une surface horizontale par rapport au sol ;
- l'irradiation globale inclinée : rayonnement reçu par une surface fixée à une inclinaison particulière, par exemple des panneaux solaires à inclinaison fixe ;
- l'irradiation diffuse horizontale (IDH) : rayonnement reçu par une surface horizontale après diffusion par les particules de l'atmosphère.

Les sites qui reçoivent les niveaux les plus élevés de rayonnement solaire seront les mieux adaptés à la production d'énergie, par exemple les environnements désertiques avec un rayonnement de forte intensité et une faible couverture nuageuse. Les sites plus éloignés de l'équateur présentent des variations saisonnières plus importantes en raison des jours plus longs en été qui permettent une production plus importante. La Figure 3-2 **Error! Reference source not found.** montre une carte de l'irradiation globale horizontale (IGH), illustrant les niveaux élevés d'IGH reçus dans les régions désertiques proches des tropiques, par exemple le désert du Sahara et les déserts australiens. Cependant, des niveaux de rayonnement annuel de plus de 1 000 kWh/m<sup>2</sup> sont reçus à des latitudes aussi élevées que l'Europe du Nord, ce qui prouve que l'énergie solaire est une ressource viable sur la majeure partie du globe. Un ciel dégagé et des journées longues permettent d'obtenir une ressource optimale. Il convient toutefois de noter que le rayonnement solaire est transmis à travers les nuages



et que les cellules solaires restent donc productives par temps couvert. L'efficacité de la production sans rayonnement solaire direct dépendra du niveau de couverture nuageuse et de la sensibilité des cellules solaires choisies.

La température d'une cellule photovoltaïque a un effet significatif sur son rendement. Il a été démontré que le rendement électrique diminuait lorsque la température augmentait (Skoplaki & Palyvos, 2009). La température de l'air et la vitesse du vent ont également une incidence sur la température des cellules, de même que le système électronique interne et d'autres facteurs comme le bâtiment où est installé le panneau photovoltaïque.



**Figure 3-2 :** Carte de l'irradiation globale horizontale (source : SolarGIS, 2018)

### Contraintes techniques

Les panneaux solaires sont généralement installés sur les toits ou au niveau du sol, et peuvent plus rarement être déployés comme installations flottantes lorsque les conditions le permettent. Les installations sur les toits permettent de produire de l'énergie solaire sans utiliser de terres supplémentaires. Les panneaux au niveau du sol peuvent être déployés dans des sites autonomes sur mesure ou dans des sites à usage mixte, par exemple des sites abritant du bétail en pâture. La réglementation en matière d'aménagement du territoire peut imposer des restrictions afin de limiter les impacts visuels ou pour d'autres raisons. Ces restrictions diffèrent en fonction du régime réglementaire local.

Les panneaux solaires peuvent être installés presque partout où un raccordement électrique est possible. Les installations de petite envergure peuvent être placées sur des bâtiments domestiques, l'énergie étant utilisée en interne, stockée ou raccordée par le biais de réseaux domestiques monophasés. Les installations de plus grande envergure nécessitent des raccordements spécialisés au réseau ou à la base d'utilisateurs. Les panneaux peuvent également être déployés à l'aide d'une infrastructure de taille relativement réduite. Une fois la centrale installée, il n'est pas nécessaire qu'un



personnel soit présent au quotidien. Il ne faut pas non plus s'y rendre chaque jour, mais uniquement pour l'entretien continu et en cas de panne.

Le type et la capacité du raccordement au réseau peuvent imposer des limites concernant l'installation. Par exemple, selon la réglementation du Royaume-Uni, les petits générateurs intégrés (ou « SSEG » en anglais) sont limités à 16 A pour les raccordements monophasés. Cela signifie que le plus grand système qui peut être installé librement sur la plupart des bâtiments domestiques au Royaume-Uni est un système de 3,68 kW. Les systèmes plus importants doivent être notifiés au gestionnaire de réseau de distribution (GRD) et une demande doit être soumise pour des études de système et le renforcement du réseau associé, si nécessaire, préalablement au raccordement (Energy Networks Association, 2014).

Pour garantir une production optimale, les toits ou les surfaces inclinées sur lesquels les panneaux doivent être déployés dans l'hémisphère nord doivent présenter une orientation proche de l'orientation sud (et inversement, c.-à-d. une orientation nord dans l'hémisphère sud) afin de maximiser l'intensité et la durée de l'irradiation solaire.

#### Contraintes environnementales et patrimoniales

Les conséquences environnementales des technologies solaires sont généralement localisées sur le site de développement et les conséquences négatives sont généralement peu importantes par rapport à d'autres technologies de production d'énergie renouvelable (Tsoutsos et al., 2005). L'impact visuel des cellules solaires peut être considéré comme indésirable, en particulier dans les zones protégées d'importance environnementale ou culturelle, ce qui pourrait empêcher l'obtention d'un permis de construire. Grâce à un positionnement minutieux, les panneaux peuvent être installés sur les toits de façon à minimiser les changements visibles par rapport à la toiture préexistante. Les installations au sol, en particulier les fermes de grande envergure, sont plus voyantes et il convient d'étudier la réglementation en matière d'aménagement du territoire pour s'assurer que les emplacements choisis sont appropriés.

Les cellules solaires contiennent des substances chimiques qui peuvent être dangereuses pour la faune. Il faut veiller à ne pas endommager les cellules solaires, en particulier lors de l'installation ou de la mise hors service. Dans des conditions normales, les émissions opérationnelles sont nulles et les répercussions sur la flore et la faune sont faibles. Lorsque des installations solaires doivent être installées sur des sites également utilisés à des fins agricoles, les conséquences sur l'agriculture doivent être prises en compte.

#### Contraintes sociales et politiques

La réglementation en matière d'aménagement du territoire relative à l'installation de panneaux solaires varie selon les pays et les régions. Les installations domestiques et les petites installations sur les toits ne nécessitent souvent pas de permis de construire spécifique tant que le système se trouve en dehors d'une zone de conservation. Par exemple, au Royaume-Uni, les panneaux sur les toits d'une capacité inférieure à 4 kW peuvent être installés sans permis sur des bâtiments non classés. En France, les systèmes d'une capacité inférieure à 3 kW ne nécessitent pas une demande complète de permis de construire. Les installations de plus grande envergure nécessitent généralement l'obtention d'un permis de construire complet. Les considérations réglementaires sont examinées en détail dans le rapport du projet ICE intitulé « T1.1.2 Questions politiques » qui accompagne le présent rapport.



### 3.1.3 Méthodologie de quantification de la ressource

La première étape de l'évaluation de la ressource pour un projet d'énergie solaire consiste à analyser les données relatives à l'irradiation solaire. L'irradiation peut être mesurée en déployant un équipement de mesure approprié tel qu'un pyranomètre (pour mesurer la densité du flux de rayonnement solaire) ou un pyréliomètre (pour mesurer l'irradiation du faisceau direct) sur les sites d'intérêt. Les données sur l'irradiation peuvent aussi être recueillies à partir d'autres sources. Les niveaux de rayonnement solaire autour du globe sont disponibles dans plusieurs bases de données open source et commerciales (p. ex. Amillo et al., 2014 ; Page, 2001 ; Šúri & Hofierka, 2004) qui fournissent des données collectées à partir de mesures réalisées grâce à des satellites, de stations météorologiques et de modèles numériques. Les données recueillies sur place peuvent être utilisées pour compléter et valider les modèles mondiaux.

Les données collectées peuvent être utilisées pour déterminer les emplacements où se trouvent les meilleures ressources brutes. Les zones qui ne respectent pas les contraintes techniques, environnementales et sociales seront écartées. Les zones présentant les meilleures ressources parmi les sites restants peuvent alors être retenues pour une analyse plus approfondie. Des logiciels de planification solaire tels que PVSyst (Mermoud, 2014) et PVGIS (Huld et al., 2012) peuvent être utilisés afin de concevoir des installations solaires et fournir des prévisions sur la disponibilité et l'intensité du rayonnement solaire au fil du temps. En utilisant une base de données de technologies solaires, ces logiciels peuvent également permettre de calculer la puissance et le coût de l'installation.

#### Installations solaires (sur les toits) de petite envergure

Les bâtiments domestiques et non domestiques dotés de toits plats ou de toits inclinés présentant une orientation proche de l'orientation sud (dans l'hémisphère nord) constituent un site idéal pour des installations solaires de petite envergure. Si le toit offre une vue dégagée, des panneaux peuvent y être installés afin de produire de l'électricité ou chauffer de l'eau. Le nombre et la disposition des panneaux dépendront des éléments suivants :

- la disponibilité d'un espace de toit approprié ;
- le type et la capacité du raccordement au réseau ;
- les restrictions en matière d'aménagement du territoire ;
- d'autres contraintes techniques ou sociales.

#### Installations solaires (au sol) de grande envergure

Les projets d'installations au sol de grande envergure nécessiteront une sélection de sites plus détaillée. L'étude d'autres projets locaux d'énergie renouvelable peut fournir des informations utiles sur les difficultés spécifiques liées à l'obtention d'un permis de construire.

Dans un premier temps, les sites susceptibles de contrevenir aux directives locales en matière d'aménagement du territoire ou à celle du distributeur doivent être écartés. Il convient de noter que tout raccordement au réseau peut également nécessiter un permis de construire. Lorsqu'un site a été défini comme approprié, un calcul complet du potentiel peut être entrepris. Il existe des logiciels (p. ex. PVSyst et PVGIS) qui permettent de saisir les statistiques de rayonnement annuel relatives au site ainsi que la taille et la disposition des bâtiments, et qui calculent ensuite la production électrique estimée.

Les éléments suivants seront pris en compte pour la conception du site :



- l'espace disponible et approprié ;
- la présence à proximité d'une architecture de réseau à haute capacité et à haute tension ;
- les éventuelles limitations techniques concernant le site ;
- les directives en matière d'aménagement du territoire ;
- la capacité du réseau régional ;
- le financement, c.-à-d. le coût de l'installation et du fonctionnement ainsi que les règles de financement relatives au projet.

Les résultats prévus du projet peuvent être optimisés en modifiant le type, le nombre et la taille des panneaux, leur disposition et l'angle d'inclinaison. L'inclusion d'un système de poursuite solaire augmentera le rendement du réseau, mais pourrait impliquer des coûts initiaux plus importants et nécessiter un entretien supplémentaire.

### 3.1.4 Calcul de l'énergie produite

La quantité d'énergie produite dépend de la taille et du type d'installation. Une fois que la conception potentielle d'une installation a été déterminée, le rendement annuel total peut être calculé. Ce dernier dépend des cellules solaires utilisées, car l'efficacité des panneaux solaires varie en fonction du type de cellules. Les progiciels mentionnés ci-dessus fourniront des calculs sur la production d'énergie relative au système spécifique installé.

## 3.2 Technologies marémotrices

### 3.2.1 Vue d'ensemble

Les marées ont longtemps été utilisées comme source d'énergie. Les moulins à marée étaient par exemple très répandus au Moyen Âge et avant cette période (Charlier & Menanteau, 1997). L'énergie marémotrice est utilisée depuis plus de cinq décennies afin de produire de l'électricité. L'usine marémotrice de La Rance, la première centrale marémotrice commerciale, a été mise en service en France en 1966 et est toujours opérationnelle aujourd'hui. Les marées sont causées par les forces d'attraction gravitationnelle et les mouvements relatifs entre la Terre, la Lune et le Soleil. Cela en fait une source d'énergie hautement prévisible. La seule variabilité par rapport aux prévisions astronomiques est due aux conditions météorologiques locales et aux caractéristiques géographiques du littoral et des fonds marins. À l'échelle mondiale, on estime qu'il y a plus de 1 TW de ressources exploitables à proximité des côtes (Kempener & Neumann, 2014). Deux aspects de la ressource marémotrice peuvent être exploités pour la conversion énergétique. Le premier est le courant de marée. L'énergie cinétique du courant de marée est utilisée pour actionner directement une turbine. Le second aspect est le marnage, qui permet d'utiliser l'énergie potentielle de la différence de hauteur due à la montée et à la descente des marées. Des exemples des deux formes de conversion de l'énergie marémotrice sont présentés à la Figure 3-3.

Au cours des vingt dernières années, le secteur de l'énergie marémotrice s'est principalement concentré sur la technologie du courant de marée. Des dispositifs de démonstration uniques ont été déployés avec succès sur des sites de test et de démonstration, par exemple OpenHydro, ScotRenewables SR2000, Andritz Hydro Hammerfest HS100 et Atlantis AR1000 à l'European Marine Energy Centre (EMEC) à Orkney, en Écosse (EMEC, 2018a), SeaGen-S à Strangford Lough (Atlantis Resources Ltd, 2018a) et Sabella D10 au large d'Ouessant (Paboeuf et al., 2016). Les premiers réseaux multidispositifs ont été déployés en 2016 : MeyGen exploite un réseau de quatre turbines de 6 MW



dans l'Inner Sound, au large de la côte nord de l'Écosse (Atlantis Resources Ltd, 2018b) et Nova Innovation exploite trois turbines de 100 MW dans les îles Shetland (Nova Innovation, 2018). Une vue d'ensemble détaillée de l'état du secteur marémoteur, comprenant une description des technologies existantes et prévues, du potentiel futur ainsi que des éléments constituant un moteur ou un obstacle pour le secteur, est disponible auprès de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) (Kempener & Neumann, 2014).



**Figure 3-3 :** Exemples de technologie marémotrice : turbine OpenHydro déployée à l'EMEC (source : OpenHydro, 2018) (en haut à gauche), turbine Sabella D10 (source : Open Ocean, 2015) (en haut à droite), usine marémotrice de La Rance (en bas)

### Courant de marée

La conversion de l'énergie du courant de marée utilise le mouvement horizontal de l'eau entraîné par le flux et le reflux des marées afin d'actionner une turbine et de produire de l'électricité. Les turbines de courant de marée nécessitent généralement des vitesses de courant moyennes supérieures à  $1 \text{ m s}^{-1}$ . Les sites de développement potentiels se trouveront donc dans des endroits où les courants sont accélérés, soit parce que le marnage est important, soit parce qu'ils se situent dans des zones restreintes dans des chenaux ou autour de promontoires. La puissance disponible dans le courant est proportionnelle au cube de la vitesse multiplié par la densité. La densité de l'eau de mer est environ 1 000 fois supérieure à celle de l'air. Les turbines marémotrices peuvent donc générer une puissance équivalente à celle des éoliennes à partir de vitesses plus faibles et avec des pales d'un diamètre considérablement plus petit.

Diverses conceptions de turbines ont été proposées et testées, notamment des turbines à axe horizontal et vertical, des hydrofoils oscillants, des appareils à vis d'Archimède et des appareils de Venturi. Une liste complète a été dressée par l'EMEC (2017a). Ces dernières années, les turbines à axe horizontal se sont imposées comme le principal type de turbine pour les installations de grande



envergure (> 500 kW) (Zhou et al., 2014). Ces turbines représentent la plupart des déploiements de démonstrateurs à grande échelle d'appareils individuels et de réseaux.

### Marnage

L'énergie du marnage utilise la technologie hydroélectrique classique à faible hauteur de chute afin d'exploiter la différence du niveau d'eau entre la marée haute et la marée basse. Une hauteur d'eau, causée par la variation du niveau de l'eau au cours d'un cycle de marée, est créée à travers une barrière par l'utilisation de vannes, puis libérée pour actionner des turbines et produire de l'électricité. Les centrales électriques utilisant le marnage peuvent être configurées pour produire à la marée montante ou à la marée descendante, ce qui signifie deux périodes d'environ 6 heures de production par jour. Ces centrales peuvent aussi être réglées comme un système de production bidirectionnel utilisant à la fois la marée montante et la marée descendante, ce qui permet d'avoir quatre périodes plus courtes de production par jour.

Les centrales marémotrices à barrage impliquent la construction d'une barrière en travers d'une zone présentant un marnage important, généralement un estuaire fluvial ou une baie. Cette barrière entraîne un blocage total de l'estuaire, à l'exception des écluses permettant le passage de la navigation, des vannes et des chambres de turbines. Les conséquences environnementales potentielles sont donc importantes et ont fait l'objet d'études approfondies pour un projet de développement dans l'estuaire de la Severn, au Royaume-Uni (DECC, 2010) et à la suite de la construction du barrage de La Rance en France (Retiere, 1994).

Une alternative proposée à la construction d'un barrage est l'utilisation de lagunes à marée, dans lesquelles un réservoir artificiel est construit soit sur le littoral, soit en mer, dans une zone où le marnage est important. Les lagunes fonctionnent de la même manière que les barrages, mais n'entraînent pas un blocage complet. L'incidence environnementale est donc moindre. Bien qu'aucune lagune n'ait été construite à ce jour, une étude indépendante du gouvernement du Royaume-Uni a conclu que les lagunes pourraient jouer un rôle rentable dans le futur bouquet énergétique du Royaume-Uni (Hendry, 2016). Les plans du premier lagon marémoteur au monde dans la baie de Swansea, au sud du Pays de Galles, sont à un stade avancé mais en attente d'une décision finale relative à la licence marine (Tidal Lagoon Power, 2018).

### 3.2.2 Contraintes

#### Contraintes liées à la ressource

Les paramètres clés de la ressource pour déterminer si un site est approprié pour l'énergie de courant de marée sont la vitesse du courant et sa variabilité au cours d'un cycle de marée. Des périodes soutenues de courant supérieur à la vitesse requise pour la production sont essentielles pour qu'un projet produise une énergie significative. La direction du courant est importante. Certaines turbines ont une capacité d'orientation et s'alignent continuellement sur le courant, tandis que d'autres sont fixes et fonctionneront moins efficacement si la direction du courant n'est pas appropriée pour les turbines. Les caractéristiques directionnelles du courant varient. Ce dernier peut être approximativement bidirectionnel (par exemple dans un chenal restreint), elliptique ou asymétrique, avec des variations significatives entre les marées descendantes et montantes. Le marnage nécessite un site présentant un grand déplacement vertical entre la marée haute et la marée basse. La puissance nominale d'un développement est proportionnelle au carré de la hauteur d'eau disponible. Par



conséquent, un site pour lequel le marnage est de 7 m aura un potentiel de production deux fois plus élevé qu'un site pour lequel le marnage est de 5 m.

Le signal de marée comprend une série de composantes de marée connues sous le nom d'harmoniques, chacune étant due à un mouvement astronomique différent entre la Terre, la Lune et le Soleil. Pour une compréhension détaillée de la ressource marémotrice sur un site spécifique, une analyse harmonique complète doit être effectuée sur la base de données mesurées ou modélisées, à l'aide d'un logiciel tel que UTide (Codiga, 2011). Selon l'emplacement, les sites peuvent être dominés par le cycle diurne (24 heures) ou par le cycle semi-diurne (12 heures). Le régime relatif au courant est en outre influencé par le cycle des marées de vives-eaux et des marées de mortes-eaux qui dure environ 14 jours, au cours duquel les courants et les marnages sont supérieurs à la moyenne lors des marées de vives-eaux et inférieurs à la moyenne lors des marées de mortes-eaux.

Les marées sont fortement influencées par les caractéristiques géographiques locales dans les régions côtières, ce qui peut entraîner des variations potentiellement significatives de la vitesse et de la direction du courant sur un site proposé. C'est pourquoi l'analyse de la ressource doit tenir compte de la variabilité spatiale du courant, soit par le biais de mesures en plusieurs endroits, soit par le biais de la modélisation numérique.

#### Contraintes techniques

Les convertisseurs d'énergie marémotrice nécessitent un site disposant d'un courant énergétique. Cela pose plusieurs problèmes techniques pour l'installation et l'entretien qui doivent être pris en compte lors de l'évaluation de la faisabilité d'un développement.

Les turbines marémotrices sont généralement installées avec des structures de fondation gravitaires ou des fondations monopieux forées. Les fondations gravitaires comportent une structure porteuse maintenue en place dans les fonds marins par son propre poids et sur laquelle la nacelle de la turbine est installée. Les fondations monopieux impliquent que la structure porteuse soit fixée dans un trou foré dans les fonds marins, fournissant ainsi une base solide et stable à la turbine. La constitution géologique et la pente éventuelle des fonds marins constitueront des facteurs importants lors de la recherche d'un emplacement approprié pour le déploiement impliquant l'un ou l'autre type de fondation (Heath et al., 2017). La plupart des installations nécessitent de grands navires à positionnement dynamique et un équipement de levage adapté. Les turbines marémotrices sont conçues pour fonctionner avec un minimum d'intervention, mais elles nécessitent un entretien périodique et correctif. C'est pourquoi il faut établir une stratégie d'accès régulier et de récupération.

Les spécifications individuelles de chaque turbine déterminent les vitesses de courant auxquelles elles peuvent fonctionner. La vitesse de démarrage définit la vitesse du courant à laquelle la turbine commence à produire, tandis que la vitesse nominale est la vitesse à laquelle la production est maximale. Étant donné que les vitesses maximales sont bien connues pour les sites marémoteurs, la plupart des turbines marémotrices n'ont pas de vitesse de coupure, c.-à-d. une vitesse au-delà de laquelle l'appareil est limité. On estime par exemple que la turbine Sabella D10 démarre à  $0,4 \text{ ms}^{-1}$  et fonctionne à des vitesses allant jusqu'à  $4 \text{ ms}^{-1}$  (Paboeuf et al., 2016).

#### Contraintes environnementales et patrimoniales

Un projet d'énergie marémotrice aura une incidence sur le milieu marin environnant. Par conséquent, les répercussions potentielles sur la vie marine, l'environnement physique et les autres utilisateurs de



l'eau doivent être évaluées avant de charger des personnes de la réalisation d'un projet. Une évaluation des incidences sur l'environnement sera probablement nécessaire afin de déterminer les effets du projet sur l'environnement, comme indiqué à la section 2.2.3.

Il faut en particulier tenir compte de l'effet d'une installation marémotrice sur les poissons et les mammifères marins. Les activités relatives à l'installation, le mouvement des pales des turbines, l'augmentation des turbulences, le bruit et d'autres aspects liés à un projet marémoteur peuvent avoir un effet néfaste sur la faune marine. Certaines zones peuvent présenter des sensibilités particulières (p. ex. des zones d'alimentation où la vie marine est abondante) et doivent donc être écartées des sites potentiels.

L'effet sur la pêche, la navigation et les autres utilisateurs de l'eau doit être pris en compte lors de la sélection d'un site pour le développement. Dans le cas de développements de courant de marée, le choix de l'appareil (p. ex. flottant, monté au niveau du fond ou semi-immérgé) influencera les contraintes imposées aux autres utilisateurs de l'eau. Les sites présentant un intérêt historique, tels que ceux abritant des épaves, doivent également être évités, non seulement lors du positionnement des appareils, mais aussi lors de la planification des trajets jusqu'à la côte qui seront utilisés pour les câbles.

#### Contraintes sociales et politiques

Le processus d'aménagement spécifique pour les projets d'énergie marémotrice variera en fonction de la juridiction. Le « propriétaire » des fonds marins, les agences de gestion marine, les gestionnaires de réseaux électriques, les communautés locales et les gouvernements nationaux peuvent tous être impliqués dans le processus d'aménagement et d'autorisation. Le processus réglementaire est décrit dans le rapport du projet ICE intitulé « T1.1.2 Questions politiques » qui accompagne le présent rapport.

#### 3.2.3 Méthodologie de quantification de la ressource

Les méthodologies d'évaluation de la ressource pour l'énergie de courant de marée sont codifiées par la Commission électrotechnique internationale (ou « IEC » en anglais) dans la norme IEC-TS 62600-201 (IEC, 2015a). D'autres normes et protocoles pour l'évaluation de la ressource marémotrice ont été élaborés par le secteur et des organismes de recherche, notamment les protocoles EquiMar (Ingram et al., 2011) et les lignes directrices de l'European Marine Energy Centre (EMEC) (Legrand, 2009).

La première étape de l'évaluation de la ressource consiste à mener une étude de préfaisabilité visant à caractériser les conditions de marée dans la zone envisagée, à déterminer les principales contraintes et à permettre la sélection de sites potentiels pour le développement. Cela peut être fait à l'aide d'une résolution relativement faible avant de procéder à une analyse plus détaillée du ou des sites définis comme présentant un potentiel pour le développement.

Une évaluation complète de la ressource impliquera d'abord la détermination des principales caractéristiques du site, notamment la profondeur de l'eau, le marnage, les vitesses du courant, la bathymétrie et la géologie des fonds marins. Si une turbine marémotrice spécifique a été sélectionnée pour le projet, les spécifications de la turbine (comme la hauteur du moyeu) doivent être prises en compte lors de la quantification de la ressource, sinon les caractéristiques du site pour une turbine à axe horizontal peuvent être supposées (Legrand, 2009). La ressource marémotrice devra être



quantifiée par une combinaison d'analyse harmonique (afin de déterminer les principaux constituants marémoteurs), de modélisation numérique et d'analyse des données mesurées.

Les mesures du courant présent sur un site peuvent être effectuées à l'aide de débitmètres, de profileurs acoustiques, de radars à haute fréquence (HF) et d'autres équipements de mesure. Chaque technique de mesure présente certains avantages et une combinaison d'équipements peut être nécessaire pour acquérir un ensemble complet de données sur le site. Les débitmètres tels que les vélocimètres acoustiques à effet Doppler (« ADV » en anglais) utilisent des fréquences d'échantillonnage élevées afin de saisir les courants de marée et les turbulences à des endroits individuels. Les profileurs de courant acoustiques à effet Doppler (« ADCP » en anglais) échantillonnent les vitesses de courant à travers la colonne d'eau, fournissant un profil vertical de la variation du courant en fonction de la profondeur. Les installations radars HF permettent de mesurer les vitesses du courant de surface sur une zone plus large grâce à l'utilisation de stations de transmission et de réception basées à terre. Les résultats se sont avérés correspondre aux mesures de surface effectuées à partir de mesures de points ADCP (Ren et al., 2015). Pour compléter les programmes de mesure, des modèles numériques hydrodynamiques peuvent être utilisés pour simuler les courants de marée dans la zone envisagée, soit en utilisant une grille 2D pour fournir des résultats moyens par rapport à la profondeur, soit une grille 3D, en tenant compte de la variation en fonction de la profondeur. Comme pour toute simulation numérique, la précision des résultats dépend des données fournies, de la configuration du modèle et des conditions aux limites. Les résultats du modèle doivent être vérifiés et validés à l'aide de données *in situ* avant d'être utilisés pour les calculs relatifs à un projet.

Les lignes directrices sur le niveau de détail requis pour chaque étape de l'évaluation de la ressource varient quelque peu d'une source à l'autre, mais, à titre d'exemple, le guide de l'EMEC recommande les évaluations suivantes :

- évaluation régionale : analyse harmonique déterminant deux composants principaux obtenus à partir des séries temporelles de niveaux d'eau provenant de sources publiques ou commerciales ; modèles hydrodynamiques avec une résolution < 5 km ; aucune étude sur le terrain n'est requise ;
- évaluation du site portant sur la préfaisabilité : analyse harmonique déterminant un minimum de quatre composants dérivés des vitesses du courant ; modèle hydrodynamique avec une résolution < 500 m ; une étude sur le terrain d'au moins deux jours est recommandée ;
- évaluation du site portant sur la faisabilité complète : analyse harmonique déterminant au moins vingt composants ; modèle hydrodynamique avec une résolution < 50 m ; une enquête sur le terrain d'au moins un mois est recommandée ;
- évaluation du développement de la conception : en plus de l'étude de faisabilité complète, il est recommandé d'effectuer une étude sur le terrain de trois mois.

Il convient d'étudier si des modèles hydrodynamiques antérieurs couvrant les zones envisagées sont disponibles, en particulier pour la première étape de l'évaluation régionale. L'évaluation complète d'un site nécessite généralement l'établissement d'un modèle sur mesure (à moins que le site n'ait déjà fait l'objet d'une étude) comprenant une résolution suffisamment haute. Il est recommandé que les modèles fournissent un minimum de 30 jours de données pour la première étape et de trois mois à un an pour les analyses plus détaillées.



Des données mesurées sur le courant doivent être obtenues pour les sites envisagés. Il faut notamment mener des études de transects afin d'établir la variation sur le site et des études statiques à plus long terme (au moins 15 à 30 jours). Les données doivent être analysées à des intervalles de 2 à 10 minutes et fournies dans des compartiments verticaux de 0,5 à 1 mètre. Les vitesses du courant doivent être fournies sous la forme de trois composantes directionnelles (est, nord et verticale) pour chaque pas de temps afin de permettre une analyse directionnelle.

### 3.2.4 Calcul de l'énergie produite

Les caractéristiques spécifiques de la turbine détermineront la quantité d'énergie qui peut être extraite du courant de marée. Les concepteurs de turbines produiront une courbe de puissance montrant la relation entre la vitesse du courant et la puissance électrique produite. Les courants dépassant les limites de vitesse opérationnelle doivent être écartés. Cette courbe de puissance permet de calculer la production d'énergie tout au long du cycle de marée et de l'étendre à des périodes mensuelles et annuelles. Les pertes causées par les variations de la direction du courant, le mouvement des vagues, les turbulences, les effets de sillage et l'ombre des autres turbines peuvent également avoir été étudiées par le concepteur de la turbine et peuvent être incorporées dans les calculs de puissance. Paboeuf et al (2016) présentent une évaluation du rendement en matière de puissance de la turbine Sabella D10 à partir des données recueillies lors d'un déploiement en 2015.

## 3.3 Technologies des vagues

### 3.3.1 Vue d'ensemble

Les convertisseurs d'énergie des vagues (« WEC » en anglais) transforment l'énergie cinétique du mouvement des vagues en électricité. La technologie est encore en phase de développement et de test, et le secteur n'a pas encore convergé vers un type d'appareil spécifique. Un large éventail de modèles de WEC ont été conçus et parfois développés, à l'aide de nombreuses méthodes différentes de conversion de l'énergie. Les appareils peuvent être conçus pour fonctionner soit sur la terre, dans la région côtière (~ 10 à 20 m de profondeur), soit en mer (~ 50 à 100 m de profondeur). Les principaux types d'appareils sont les suivants (des exemples sont présentés à la Figure 3-4) :

- **Absorbeur ponctuel** : Un appareil de petite taille par rapport à la longueur d'onde des vagues, capable d'absorber l'énergie d'un front d'onde incident beaucoup plus large que ses propres dimensions. Il s'agit généralement d'une bouée flottante qui se déplace librement au gré des vagues par rapport à une base fixe. L'électricité est générée par le biais d'un générateur linéaire, une turbine hydraulique ou un système de pompage en raison du mouvement relatif entre la bouée et le dispositif statique d'amarrage.
- **Atténuateur linéaire** : Une longue structure flottante articulée et alignée parallèlement à la direction des ondes incidentes. L'atténuateur absorbe l'énergie des vagues sur toute sa longueur et produit de l'électricité grâce aux mouvements relatifs des différentes sections de l'appareil qui actionnent des turbines hydrauliques au niveau des charnières.
- **Appareil oscillant de déferlement** : Un appareil flottant ou monté au niveau des fonds marins qui utilise le mouvement horizontal de déferlement des vagues pour faire tourner un volet pivotant, ce qui produit de l'électricité par le biais de turbines hydrauliques ou de systèmes de pompage.
- **Colonne d'eau oscillante (« OWC » en anglais)** : Une structure flottante ou côtière comprenant une chambre fermée qui est ouverte à la mer en bas et à l'air en haut. Une turbine



bidirectionnelle est installée dans l'ouverture supérieure. Les vagues font monter et descendre le niveau de l'eau dans la chambre, forçant continuellement l'air à sortir de la chambre et à y revenir, ce qui actionne la turbine qui va alors produire de l'électricité.

- **Masse en rotation** : Un corps flottant contenant un pendule dont la masse est en rotation. L'appareil est conçu pour se déplacer avec les mouvements de la houle et ceux de déferlement et d'oscillation des vagues, entraînant la rotation de la masse se trouvant à l'intérieur. Ce mouvement de rotation est capté et utilisé afin d'actionner un générateur.

Une liste actualisée des conceptions proposées de convertisseurs d'énergie des vagues est fournie par l'EMEC (2017b).

La recherche et le développement dans le domaine de l'énergie des vagues se poursuivent depuis les années 1970. Le secteur a mis au point et testé un certain nombre de prototypes d'appareils à grande échelle. L'EMEC a accueilli une série d'appareils, notamment l'appareil Pelamis, l'appareil « Oyster » d'Aquamarine et l'appareil « Penguin » de Wello (EMEC, 2018b). Dans le sud-ouest du Royaume-Uni, le « BOLT II Lifesaver » de Fred Olsen a été testé sur le site FaBTest pendant deux ans à partir de 2012 (FaBTest, 2015). Toutefois, le secteur a connu un certain nombre de revers ces dernières années, notamment la faillite très médiatisée d'entreprises telles que Pelamis et Aquamarine. Il a été reconnu qu'il fallait davantage se concentrer sur les tests préliminaires et les tests des composants afin d'accroître la fiabilité des appareils et de réduire les coûts (Ocean Energy Forum, 2016).



**Figure 3-4** : Exemples d'appareils d'énergie des vagues : la centrale terrestre OWC de Pico aux Açores (source : Pico OWC, 2006) (en haut à gauche), l'appareil en zone côtière Wavestar avec des absorbeurs ponctuels flottants (source : Wavestar, pas de date) (en haut à droite), le « BOLT II Lifesaver » en mer de Fred Olsen (en bas)



### 3.3.2 Contraintes

#### Contraintes liées à la ressource

Les vagues océaniques peuvent être classées en deux catégories. La première est celle des vagues de vent à haute fréquence, générées localement par le transfert d'énergie du vent à l'eau. La seconde catégorie est celle des vagues de mer à basse fréquence, générées par des vents lointains qui se sont propagés loin de la région où ils ont été générés. Un état de mer typique peut comprendre à la fois des vagues de vent et de mer. La compréhension des états de mer sous-jacents représente une partie importante du processus d'évaluation de la ressource. Les différents appareils sont conçus pour fonctionner le plus efficacement possible dans des conditions spécifiques, de sorte que les caractéristiques des vagues sur un site déterminent le choix de l'appareil. En particulier, la directionnalité des états de mer doit être prise en compte, car certains appareils ne fonctionnent que pour une série limitée de directions des vagues.

La variabilité de la ressource des vagues doit être considérée lors de l'évaluation d'un site. Outre la variabilité à court terme, la plupart des sites présentent une variabilité saisonnière (avec des états de mer plus importants pendant les mois d'hiver plus tempétueux) ainsi qu'une variabilité interannuelle. Certains sites sont également plus exposés aux tempêtes. Ces dernières pourraient nécessiter l'arrêt de l'appareil afin d'assurer sa survie. Du point de vue de la fiabilité, il est important de comprendre les charges que les appareils sont susceptibles de subir lors des conditions les plus extrêmes.

#### Contraintes techniques

Les problèmes techniques liés à un projet d'énergie des vagues varient en fonction du type d'appareil. Cependant, tous les appareils d'énergie des vagues sont installés dans des zones présentant un climat de vagues énergétique. C'est pourquoi il faut tenir compte des fenêtres météorologiques pour l'installation, le fonctionnement et les activités d'entretien. L'accès à des installations portuaires appropriées doit être pris en compte.

Les appareils flottants nécessitent des systèmes d'amarrage conçus pour s'adapter au mouvement de l'appareil, à la profondeur de l'eau et aux conditions des fonds marins. Les appareils montés au niveau des fonds marins nécessiteront probablement des fondations forées, semblables à celles utilisées pour les turbines marémotrices. La bathymétrie et la pente des fonds marins doivent être évaluées et intégrées dans le processus d'aménagement du site.

L'exportation d'électricité vers le réseau nécessite un raccordement au réseau terrestre et une infrastructure correspondante. Le trajet des câbles jusqu'à la côte doit être planifié de manière à éviter les zones où les sédiments sont très mobiles ou les canyons des fonds marins. De plus, une protection appropriée du trajet des câbles doit être envisagée (comme un enrochement).

#### Contraintes environnementales et patrimoniales

Les convertisseurs d'énergie des vagues peuvent avoir une incidence sur la vie marine, la pêche commerciale, la navigation et d'autres utilisateurs de l'eau à proximité immédiate des appareils et peuvent également entraîner des conséquences plus larges sur l'environnement physique plus éloigné. À moins que le déploiement n'ait lieu sur un site de test préalablement autorisé, il est probable qu'une évaluation des conséquences environnementales sera nécessaire afin de déterminer l'ampleur des effets du projet, le niveau d'acceptabilité et les mesures d'atténuation potentielles.



Les poissons et les mammifères marins peuvent être affectés par le bruit de l'appareil, le rayonnement électromagnétique et les pièces mobiles. Toutefois, les fondations de l'appareil et autres infrastructures sous-marines peuvent faire office de récifs artificiels et jouer un rôle dans l'attraction de la faune marine (Inger et al., 2009).

Étant donné que les appareils d'énergie des vagues sont principalement des appareils flottants ou semi-immergés souvent équipés de vastes câbles d'amarrage sous-marins, la plupart des développements d'énergie des vagues nécessiteront une zone d'exclusion afin d'éviter les risques de collision et d'enchevêtrement avec le reste du trafic maritime. Cela aura des conséquences pour la pêche commerciale et pourrait nécessiter de modifier les couloirs de navigation.

En retirant de l'énergie de la mer, le climat des vagues à l'abri des appareils sera affecté (Millar et al., 2009), ce qui aura une incidence sur les processus sédimentaires. Cela pourrait entraîner des répercussions sur les plages, la morphologie du littoral, la vie marine et les activités récréatives. Un rapport de l'organisation caritative Surfers Against Sewage (2009) détaille les conséquences potentielles des WEC sur les utilisateurs d'eau participant à des activités récréatives.

L'impact visuel devrait être moins préoccupant que pour d'autres formes d'énergie renouvelable puisque la plupart des déploiements se trouveront probablement à une certaine distance en mer. Néanmoins, il est possible qu'il faille considérer cet impact le long des sections du littoral préservées pour leur valeur patrimoniale ou dans les endroits abritant des zones de fonds marins protégées.

Une vue d'ensemble complète des conséquences environnementales potentielles de l'énergie des vagues peut être consultée dans Copping et al. (2016).

### Contraintes sociales et politiques

Le processus d'aménagement spécifique pour les projets d'énergie des vagues variera d'une juridiction à l'autre. L'organisme responsable de la propriété des fonds marins, les agences de gestion marine, les gestionnaires de réseaux électriques, les communautés locales et les gouvernements nationaux peuvent tous être impliqués dans le processus d'aménagement et d'autorisation. Le processus réglementaire est décrit dans le rapport du projet ICE intitulé « T1.1.2 Questions politiques » qui accompagne le présent rapport.

### 3.3.3 Méthodologie de quantification de la ressource

Une norme internationale pour l'évaluation de la ressource en énergie des vagues a été élaborée par l'IEC dans la norme IEC-TS 62600-101 (IEC, 2015b). D'autres documents d'orientation et protocoles sont disponibles auprès de sources telles qu'EquiMar (Ingram et al., 2011) et l'EMEC (Pitt, 2009).

L'étape initiale d'un processus d'évaluation de la ressource implique une évaluation régionale de haut niveau des conditions des vagues. Il s'agira généralement d'utiliser les résultats de modèles de vagues globaux à faible résolution ou les enregistrements de données existants afin de déterminer et d'étudier de manière plus approfondie les sites de développement potentiels. Une évaluation détaillée de la ressource d'un site proposé sera réalisée à l'aide de données enregistrées *in situ* et d'une modélisation numérique à plus haute résolution.

L'appareil de mesure des vagues le plus couramment utilisé est la bouée houlomotrice, un instrument flottant amarré qui suit le mouvement des vagues et mesure le déplacement de la surface de la mer à l'aide d'un accéléromètre, d'un compas et d'un traceur GPS. Les données de déplacement sont

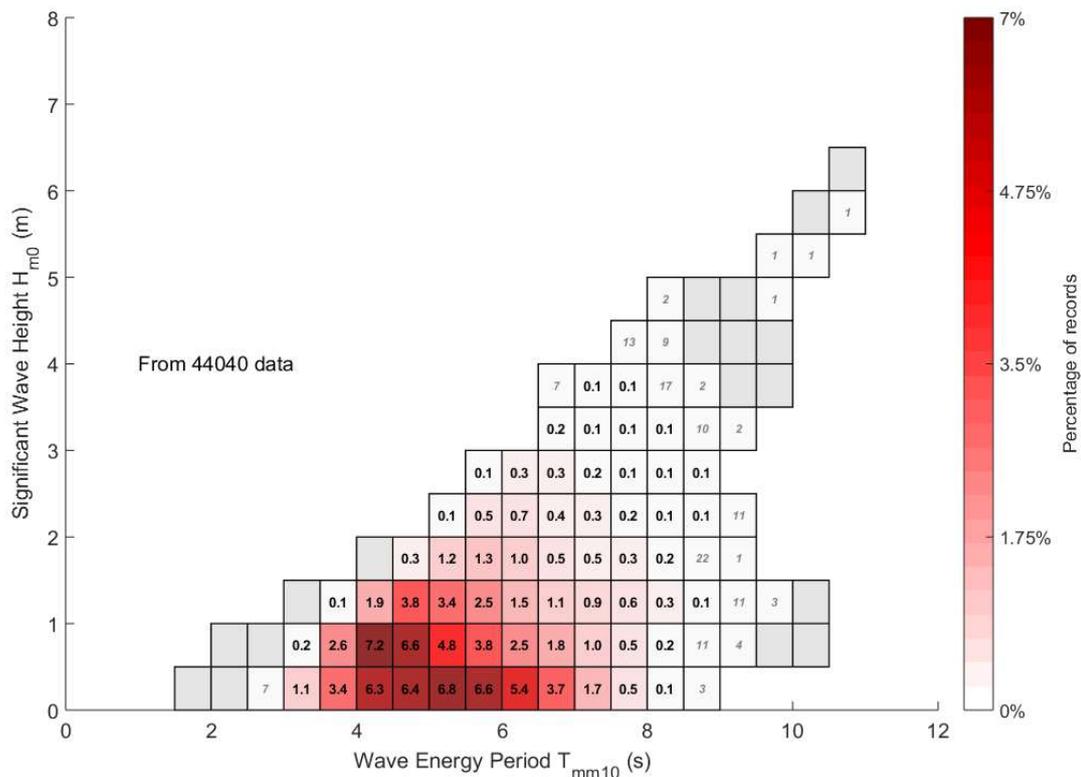


traitées à bord de la bouée afin de produire un spectre de densité de variance du domaine des fréquences, ce qui permet de calculer des paramètres de synthèse clés tels que la hauteur significative des vagues, la période moyenne et la direction. Les bouées houlomotrices présentent l'avantage de pouvoir transmettre les données en temps réel de la mer à la terre. Un autre appareil de mesure est un ADCP orienté vers le haut, qui produit des résultats équivalents mais ne dispose généralement pas de capacités de transmission de données. Pour une couverture spatiale plus étendue, des systèmes radars tels que les radars HF et en bande X peuvent être utilisés, mais les limitations opérationnelles réduisent la précision de ces mesures par rapport aux méthodes de mesure directe (Wyatt et al., 2011).

Les modèles de vagues en zone côtière tels que SWAN (Booij et al, 1999), TOMAWAC (Benoit et al, 1996) et MIKE21 (Warren et Bach, 1992) peuvent être utilisés afin de propager les états de mer à travers une grille géographique, en tenant compte des pertes d'énergie dues aux processus physiques se produisant dans les zones côtières et dans les eaux peu profondes. De cette façon, des évaluations spatiales de la ressource peuvent être effectuées sur les sites potentiels. Afin d'accroître la fiabilité des résultats des modèles numériques, ces derniers doivent être utilisés en combinaison avec des ensembles de données mesurées dans le domaine de modèle relatif aux études d'étalonnage et de validation.

Les caractéristiques du site peuvent être résumées dans un diagramme de dispersion, comme illustré à la Figure 3-5. Le diagramme présente le pourcentage d'occurrence des combinaisons de hauteurs et de périodes de vagues, ce qui permet de déterminer les états de mer les plus fréquents et les plus extrêmes. Afin d'avoir une compréhension plus approfondie et d'orienter la conception technique du site, une analyse des spectres de vagues fournira des informations sur la série d'énergies contenues dans les vagues. En outre, cette analyse peut être utilisée avec des renseignements sur des appareils spécifiques en vue de déterminer si les sites sont viables pour la production d'énergie. L'analyse des valeurs extrêmes peut être appliquée en adaptant des données mesurées ou modélisées à une distribution spécifique et en essayant de prédire la probabilité d'événements extrêmes à long terme. Les hauteurs de vagues maximales pour une période de 10 ans, de 50 ans et de 100 ans sont importantes pour évaluer la capacité de survie des appareils et des composants.





**Figure 3-5 :** Diagramme de dispersion montrant la relation entre la hauteur significative de vagues et la période d'énergie sur le site de test d'énergie des vagues FaBTest, réalisé par l'Université d'Exeter (Parish & Hardwick 2012)

### 3.3.4 Calcul de l'énergie produite

La puissance des vagues disponible peut être dérivée des données de mesure et de l'analyse spectrale en suivant le processus décrit par les protocoles EquiMar (Ingram et al., 2011). Lors de l'évaluation d'un site pour le déploiement d'un appareil spécifique, la matrice de puissance du concepteur peut être utilisée. Elle décrit la production d'énergie prévue de l'appareil pour différentes combinaisons de hauteurs et de périodes de vagues. De surcroît, cette matrice peut être utilisée en parallèle avec le diagramme de dispersion du site afin de prédire la production d'énergie annuelle potentielle.

## 3.4 Technologies éoliennes

### 3.4.1 Vue d'ensemble

L'énergie éolienne est générée par le débit d'air traversant des turbines, dont la taille peut varier de la petite éolienne à l'échelle domestique aux structures commerciales de plusieurs MW. Les petites éoliennes sont généralement utilisées pour des systèmes de production domestiques ou de petite envergure hors réseau, tandis que les grandes éoliennes sont raccordées au réseau et souvent installées au sein d'un ensemble de plusieurs appareils, formant ainsi un parc éolien. Le secteur a convergé vers un modèle d'éolienne à axe horizontal et à trois pales (le « modèle danois »), bien que des éoliennes à axe vertical et des éoliennes à axe horizontal à deux pales soient également utilisées. Des exemples sont présentés à la Figure 3-6.





**Figure 3-6 :** Exemples d'éoliennes commerciales : éolienne à axe horizontal Siemens SWT-2.3-101 (source : Siemens, 2018) (en haut à gauche), éolienne en mer MHI Vestas (source : MHI Vestas, 2018) (en bas à gauche), éolienne à axe vertical Quiet Revolution qr6 (source : Quietrevolution, pas de date) (à droite)

L'énergie éolienne est exploitée avec succès depuis des millénaires. Les premières structures étaient constituées de voiles tournantes reliées mécaniquement à des machines simples pour moulinier le grain ou pomper l'eau. L'utilisation de ces structures pour produire de l'électricité à partir du vent a commencé dans les années 1880 et s'est développée au cours des premières décennies du XX<sup>e</sup> siècle, en particulier dans les zones rurales où le raccordement aux réseaux de distribution n'était pas encore possible. Cependant, le développement s'est accéléré après la crise pétrolière de 1973 et les parcs éoliens se sont multipliés dans le monde entier à partir des années 1980. Les améliorations apportées à l'électronique de puissance, à la conception des pales et aux procédés de fabrication ont permis de mettre au point des éoliennes toujours plus grandes et plus efficaces. Fin 2016, la capacité installée d'énergie éolienne était estimée à 487 GW, 28 pays ayant installé plus de 1 GW (GWEC, 2016a).

Depuis le début des années 1990, des parcs éoliens ont également été installés en mer, ce qui a permis d'exploiter la ressource éolienne plus puissante et plus constante qui se trouve au-dessus de la mer. Bien que ce type d'installation pose des problèmes techniques plus importants et entraîne des coûts plus élevés liés à l'installation, à l'exportation d'énergie, au fonctionnement et à l'entretien, le secteur des éoliennes en mer a connu une croissance significative au cours de la dernière décennie, avec 14,4 GW installés fin 2016 dans le monde et principalement en Europe (GWEC, 2016b). Le prochain développement du secteur portera probablement sur des éoliennes en mer flottantes, qui permettront d'accéder à des eaux plus profondes et d'accroître ainsi considérablement la viabilité économique d'un plus grand nombre de sites. Des prototypes sont déjà testés, par exemple dans le cadre du projet Hywind en Écosse (Statoil, 2017).

L'énergie éolienne est en passe de rivaliser avec les combustibles fossiles et la production nucléaire au niveau des prix. Par exemple, les projets britanniques en mer Hornsea 2 et Moray doivent



commencer à produire en 2022/23 à 57,50 £ sterling par MWh (RenewableUK, 2017a) et les LCOE de l'énergie éolienne terrestre française s'élevaient à 76 € par MWh fin 2016 (RenewablesNow, 2016).

### 3.4.2 Contraintes

#### Contraintes liées à la ressource

La vitesse moyenne du vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne fournit une évaluation de base de la faisabilité d'un site pour la production d'énergie éolienne. Une analyse plus détaillée devrait examiner la constance de la vitesse du vent, la fréquence des tempêtes, la direction, le cisaillement du vent, les turbulences et l'existence d'une régularité dans le système éolien (par exemple des occurrences régulières de vents plus forts dans l'après-midi). Le site idéal présentera une vitesse du vent constante proche de la vitesse nominale de l'éolienne proposée.

La ressource peut être évaluée au moyen de mesures ou de modélisations. Les données les plus précises relatives à un site envisagé seront fournies par des campagnes de surveillance, effectuées à l'aide d'équipements de surveillance montés sur des tours ou au sol. Lors de l'utilisation de données modélisées, les incertitudes associées doivent être prises en compte. Les modèles à grande échelle peuvent ne pas rendre compte avec précision des caractéristiques locales, en particulier sur les terrains complexes et à proximité des côtes. Bien qu'ils soient utiles pour déterminer les zones envisageables, dans de nombreux cas, les modèles éoliens mondiaux et régionaux ne fournissent pas suffisamment de données pour une quantification complète de la ressource.

#### Contraintes techniques

À l'exception des petites installations d'éoliennes individuelles, tout développement d'énergie éolienne nécessite un accès au réseau électrique. La proximité du site et sa facilité d'accès en vue d'un raccordement au réseau électrique ont une incidence sur le coût et la faisabilité du développement. Les grandes fermes nécessiteront un raccordement à haute tension au réseau de distribution. Par ailleurs, l'accès à l'infrastructure du réseau ainsi que tout développement nécessaire le long du trajet d'accès devront être pris en compte lors du choix de site relatif à un projet. Les développements en mer sont confrontés à des problèmes semblables à ceux des secteurs de l'énergie des vagues et de l'énergie marémotrice en ce qui concerne l'acheminement des câbles d'exportation d'énergie. En fonction des régimes réglementaires applicables, les coûts de raccordement initiaux doivent être pris en charge par les gestionnaires de réseau ou par le promoteur du parc éolien. Dans le premier cas, le promoteur paie pour l'utilisation ultérieure du réseau, tandis que dans le second cas, ces coûts initiaux peuvent représenter une augmentation significative des coûts en capital du promoteur. Le rapport du projet ICE intitulé « T1.1.2 Questions politiques » qui accompagne le présent rapport aborde ces réglementations de manière plus détaillée.

Les éoliennes sont de grandes structures : une éolienne classique de 1,5 MW (p. ex. Vestas V63) possède par exemple un diamètre de rotor de 63,6 m et est installée sur une tour de 60 m de haut (Wind Power, 2017). Afin d'installer et d'entretenir ces éoliennes, le site doit être accessible aux véhicules et équipements de grande envergure. Il peut s'avérer difficile (et coûteux) d'accéder à des zones isolées dotées d'une mauvaise infrastructure routière. Par conséquent, ces zones pourraient ne pas se prêter au développement. Les installations en mer nécessiteront des plateformes autoélévatrices appropriées pour le battage des pieux et l'installation des éoliennes.



Les éoliennes modernes correctement installées présentent un faible risque d'effondrement (Robinson et al., 2013). Toutefois, il vaut mieux s'assurer qu'elles sont installées à une distance de sécurité d'infrastructures telles que les bâtiments, les routes et les voies ferrées. Les lignes directrices du ministère du Royaume-Uni du Logement, des Communautés et du Gouvernement local recommandent que les éoliennes ne soient pas placées à une distance inférieure à la distance de chute (hauteur du moyeu plus longueur des pales) plus 10 % par rapport aux bâtiments (Ministry of Housing, Communities & Local Government, 2015). En outre, les lignes directrices de la Highways Agency du Royaume-Uni recommandent que les éoliennes ne soient pas placées à une distance inférieure à la hauteur plus 50 m ou à la hauteur plus 50 % par rapport à l'autoroute, la distance la plus faible étant privilégiée (Department for Transport, 2013). Des limites similaires sont proposées pour les chemins de fer, les voies navigables et les lignes électriques. Il n'existe pas de distance minimale de séparation entre les habitations et les éoliennes fixée au niveau national (Smith, L., 2016). Les lignes directrices des autorités locales de la région où se trouve le site définissent les limites pour des développements spécifiques et les conseils locaux sont en mesure d'appliquer des restrictions dans leurs zones d'influence.

Le terrain doit être propice à l'installation d'éoliennes. Les zones géographiquement inappropriées peuvent comprendre entre autres les forêts, les marais et les zones sujettes aux inondations. Même si la présence de ces caractéristiques géographiques n'empêche pas l'installation d'éoliennes, il est probable qu'elles rendront le projet encore plus complexe et en augmenteront donc les coûts. Dans le cadre du processus d'octroi d'un permis de construire au Royaume-Uni, les développements éoliens peuvent être soumis à l'obligation d'éviter de causer des dommages et d'apporter des modifications qui améliorent l'environnement local. En France, les parcs éoliens doivent faire l'objet d'un processus d'aménagement complet qui garantit qu'ils respectent les lignes directrices en matière de bruit ainsi que la réglementation en matière de sécurité. La géologie du site doit être analysée afin de comprendre les contraintes géotechniques liées à l'installation des éoliennes. Les conditions du sol et de la roche détermineront la taille et le type de fondations requises.

#### Contraintes environnementales et patrimoniales

Dans le cadre du processus d'autorisation, il convient d'effectuer une évaluation complète des conséquences environnementales pour toutes les installations d'énergie éolienne, à l'exception des plus petites installations. Les conséquences principales comprennent le bruit des éoliennes, l'effet de lumière « clignotante » dû à la rotation des pales des éoliennes, les conséquences hydrologiques sur les cours d'eau locaux dues à l'installation et les conséquences sur la flore et la faune locales. Le risque que représentent les éoliennes pour les oiseaux peut être important (p. ex., Drewitt and Langston, 2006) et la présence d'espèces menacées à proximité d'un développement peut encourager l'organisme compétent à refuser d'octroyer un permis de construire.

En ce qui concerne les zones d'importance culturelle ou historique ainsi que les sites désignés tels que les parcs nationaux, des restrictions s'appliquent sur les développements autorisés, principalement en raison de l'impact visuel des éoliennes.

#### Contraintes sociales et politiques

L'installation d'éoliennes fait l'objet de nombreux débats entre les promoteurs, les autorités et les parties prenantes locales. Les conséquences (ou les conséquences perçues) du développement peuvent susciter une opposition considérable et il faut donc en tenir compte lors de la sélection du



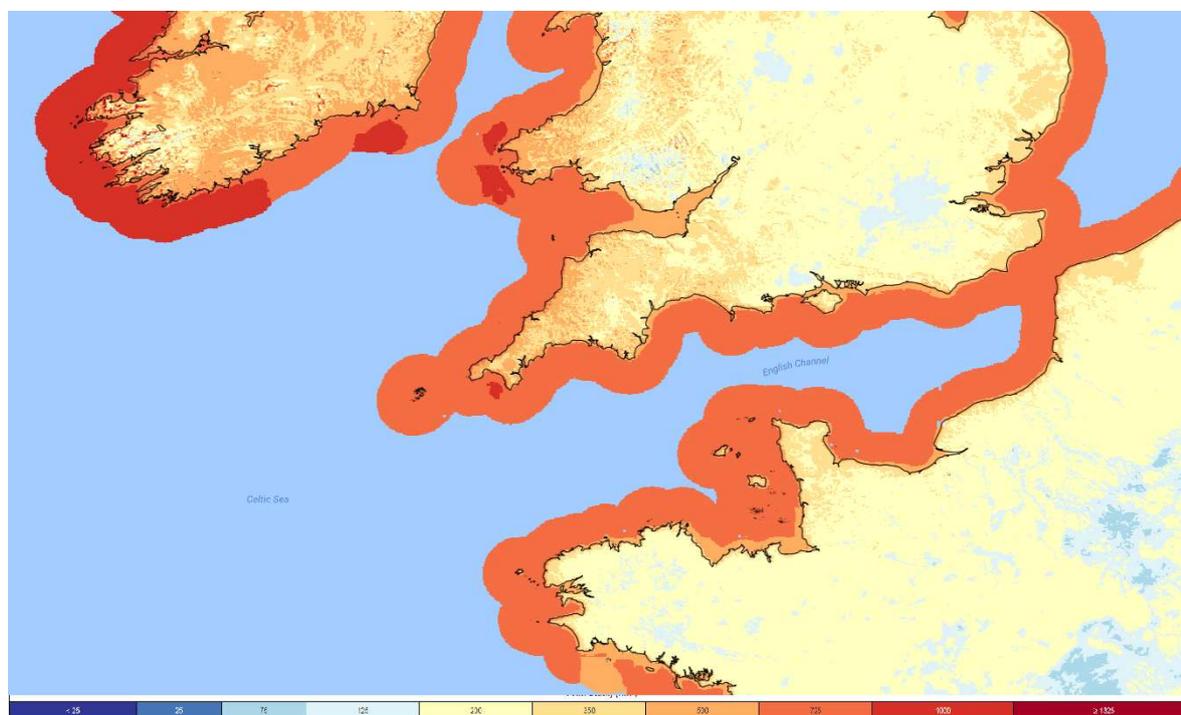
site. La réglementation en matière d'aménagement du territoire varie d'une localité à l'autre et un permis de construire est généralement requis pour toute structure permanente. Cependant, des exceptions peuvent être prévues. Par exemple, au Royaume-Uni, une autorisation n'est pas toujours nécessaire pour les petites éoliennes domestiques (Smith, 2016).

Le rapport du projet ICE intitulé « T1.1.2 Questions politiques » qui accompagne le présent rapport examine les réglementations de manière plus détaillée.

### 3.4.3 Méthodologie de quantification de la ressource

Il n'existe actuellement aucune norme internationale publiée pour l'évaluation de la ressource éolienne, bien que certains aspects soient couverts par les normes de l'IEC pour les éoliennes IEC 61400, y compris la norme « IEC 61400-1:2005+AMD1:2010 CSV: Wind turbines - Part 1: Design requirements » (IEC, 2014) et la norme « IEC 61400-12-1:2017: Power performance measurements of electricity producing wind turbines » (IEC, 2017). L'élaboration d'un document d'évaluation de la ressource éolienne (« IEC 61400-15: Assessment of Wind Resource, Energy Yield and Site Suitability input conditions for wind power plants ») est en cours, tandis que le document d'orientation de MEASNET (2016) sur les conditions de vent spécifiques au site est largement utilisé.

La première étape de l'évaluation de la ressource éolienne consiste à déterminer les sites potentiels présentant des niveaux de ressource appropriés, généralement à l'aide de modèles éoliens mondiaux ou régionaux. Les données relatives à la vitesse et à la puissance du vent sont disponibles auprès de diverses sources à l'échelle locale, régionale et mondiale, avec des niveaux de résolution et de précision variables. Lors de l'utilisation de données modélisées, il convient de s'assurer que le niveau d'incertitude et d'imprécision se situe dans des paramètres acceptables. Un exemple de ce type de données est présenté à la Figure 3-7.



**Figure 3-7** : Densité moyenne agrégée de la puissance du vent ( $W/m^2$ ) à 50 m dans le sud du Royaume-Uni et le nord de la France (source : Global Wind Atlas, 2017)



Lorsque les sites envisageables ont été déterminés, une caractérisation détaillée de la ressource éolienne peut être entreprise. Les données sur le vent *in situ* peuvent être collectées en installant une tour de surveillance ou en utilisant des appareils de surveillance au sol. Pour comprendre précisément la ressource, les mesures relatives au vent doivent être effectuées à différentes hauteurs au-dessus du sol. L'enregistrement à l'aide d'anémomètres nécessite l'installation d'un mât (qui implique probablement des contraintes en matière d'aménagement) auquel sont attachés les instruments. Les anémomètres les plus simples sont constitués d'une hélice ou d'un ensemble de coupelles fixées à un axe qui peuvent tourner dans le vent. Les instruments plus techniques comprennent l'utilisation d'un fil chaud, d'un laser et d'ultrasons, qui présentent l'avantage de pouvoir échantillonner à des fréquences beaucoup plus élevées. Les systèmes de télédétection basés au sol ou à la surface de la mer, tels que les systèmes SoDAR et LiDAR, peuvent être utilisés avec une faible préparation du site. Les systèmes SoDAR et LiDAR fonctionnent en émettant des impulsions acoustiques à haute fréquence (SoDAR) ou de lumière infrarouge (LiDAR) et en mesurant le signal réfléchi par les particules dans l'air. Le décalage Doppler du signal réfléchi causé par le mouvement de l'air est mesuré afin de pouvoir calculer la vitesse du vent. L'avantage est que ces systèmes peuvent mesurer la vitesse du vent dans une colonne verticale au-dessus de l'appareil (et sur une zone dans le cas des systèmes LiDAR à balayage) à partir de son emplacement fixe. Il est recommandé de recueillir au moins un an de données sur les vents avant de construire un parc éolien (Brower, 2012).

Les vitesses moyennes du vent sur dix minutes sont couramment utilisées afin d'évaluer la ressource éolienne, bien que des données instantanées soient également nécessaires afin de calculer les valeurs relatives aux turbulences et aux rafales maximales. Les données relatives au vent doivent être analysées afin de déterminer le profil vertical de la vitesse du vent, en particulier sur la hauteur de la zone du rotor. L'analyse de la distribution des valeurs de la vitesse du vent permet d'évaluer la production potentielle d'un parc éolien au fil du temps. Des méthodes statistiques peuvent être appliquées aux données relatives au vent enregistrées ou modélisées afin d'estimer les valeurs extrêmes (rafales les plus importantes) susceptibles de se produire sur un site. Il convient de calculer les valeurs les plus élevées susceptibles d'être dépassées sur une période de 10 ans, de 50 ans et de 100 ans. Le niveau de confiance dans ces valeurs extrêmes dépendra largement de la longueur de l'ensemble de données mesurées.

Afin d'extrapoler et de transformer les données à court terme du site en prévisions à long terme, une méthode connue sous le nom de « mesure, corrélation, prédiction » (MCP) est appliquée. Cela permet de corréler les données de mesure du site à court terme (~ 1 an) avec l'enregistrement équivalent relatif à un site de surveillance permanent à long terme qui peut se trouver à une certaine distance du développement proposé. Les coefficients de corrélation obtenus sont ensuite utilisés afin d'établir des prévisions à plus long terme pour le site envisagé.

### 3.4.4 Calcul de l'énergie produite

Une courbe de puissance, établie par les fabricants des éoliennes, montre la relation entre la vitesse du vent et la puissance produite pour une éolienne spécifique. La production est limitée aux vitesses de vent comprises entre une vitesse de démarrage (en dessous de laquelle l'énergie est insuffisante pour faciliter la production) et une vitesse de coupure (au-dessus de laquelle l'éolienne est arrêtée pour éviter tout dommage). L'énergie maximale théorique qui peut être capturée par une éolienne en vertu de la loi de Betz est de 59,3 %. Dans la pratique, la plupart des éoliennes modernes peuvent capturer entre 25 et 40 % de l'énergie du vent dans les conditions les plus favorables (Hau, 2013). En



utilisant la matrice de puissance fournie par le fabricant de l'éolienne, les vitesses de vent prévues et en tenant compte des pertes mécaniques et électriques, il est possible de prévoir la production annuelle d'énergie.

## 3.5 Déchets et biomasse

### 3.5.1 Vue d'ensemble

La conversion des déchets ou de la biomasse en énergie utile est un moyen de valoriser des matériaux qui auraient autrement une valeur négligeable ou négative. Pour le projet ICE, trois scénarios de valorisation ont été envisagés :

- le scénario direct local : conversion directe de biomasse ou de déchets produits localement en énergie électrique ;
- le scénario indirect local : conversion de biomasse ou de déchets produits localement en combustibles intermédiaires pouvant remplacer les combustibles traditionnels, y compris les combustibles utilisés pour la production d'électricité ;
- le scénario indirect régional : conversion de biomasse ou de déchets produits au niveau régional en combustibles intermédiaires pouvant être transportés et utilisés pour la production locale d'électricité ou à d'autres fins.

Tous ces scénarios présentent également un potentiel pour produire de la chaleur dans un contexte de production combinée de chaleur et d'électricité (PCCE), ce qui peut contribuer à réduire la dépendance à l'égard des importations de combustibles fossiles.

#### Scénario direct local

Une centrale biomasse à l'échelle du réseau est une centrale thermique qui utilise des déchets (par exemple des déchets ménagers ou des sous-produits d'autres processus industriels) ou de la biomatière (comme le bois ou d'autres cultures énergétiques) comme combustible ou pour produire du biogaz, l'un ou l'autre pouvant être brûlé pour produire de la chaleur. Comme dans une centrale thermique classique, le but est de créer de la vapeur sous pression qui peut actionner un générateur.

Plusieurs nouveaux procédés, impliquant des centrales de plus petite taille, ont été mis au point pour répondre aux besoins de la production décentralisée locale à partir de déchets. Ces procédés consistent généralement à brûler le biogaz directement dans un moteur à combustion interne, afin de produire de l'énergie mécanique, puis de l'énergie électrique. La centrale modulaire Flexibuster mise au point par SEaB en est un exemple. Elle est présentée à la Figure 3-8.



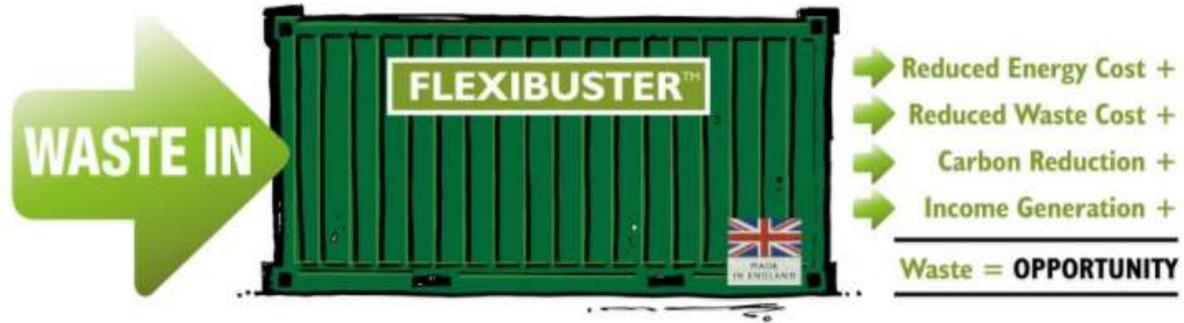


Figure 3-8 : La centrale modulaire de biogaz Flexibuster (source : SEaB Energy, 2016)

#### Scénario indirect local

Certains déchets ou matériaux de la biomasse peuvent également être convertis chimiquement en combustibles. La production de « l'alcool de bois » (méthanol) à partir de déchets ligneux en est un exemple de longue date. Le méthanol peut être brûlé dans des moteurs à combustion interne classiques afin de produire de l'électricité, moyennant quelques modifications mineures du moteur pour assurer la compatibilité du matériel avec le méthanol. Ce dernier peut également être facilement stocké (sous forme de liquide à la température et à la pression ambiantes), permettant ainsi un stockage d'énergie utile.

Un certain nombre de nouveaux procédés ont été mis au point afin de convertir différents déchets en combustibles utiles, comme le procédé Plaxx (Figure 3-9). Ce dernier permet de convertir des déchets plastiques mixtes, provenant par exemple du flux de déchets ménagers, en un carburant de type diesel. Ce carburant peut être brûlé dans des moteurs diesel classiques sans qu'il soit nécessaire de modifier le moteur. Plaxx a été conçu dans un format modulaire pour permettre un déploiement facile.





**Figure 3-9 : Le processeur Plaxx RT7000 permettant de convertir des plastiques mixtes en carburant (source : Recycling Today, 2017)**

### Scénario indirect régional

Certains procédés de valorisation des déchets ou de la biomasse ne peuvent être mis en place de manière réaliste à petite échelle. De plus, ils doivent généralement s'appuyer sur une base de ressources régionale. La biomasse peut être convertie en biodiesel et de grandes usines de traitement ont été construites dans le monde entier afin de produire du biodiesel. Le biodiesel lui-même ne présente pas d'intérêt pour le projet ICE puisqu'il est déjà intégré dans les infrastructures de carburants classiques.

Toutefois, la valorisation du flux de déchets de glycérol provenant des usines de biodiesel pourrait être intéressante. Moyennant quelques modifications mineures, le glycérol peut être brûlé dans des moteurs diesel classiques pour produire de l'électricité avec de très faibles émissions. Un certain traitement du glycérol brut est nécessaire afin de créer un matériau de qualité combustible, mais ce traitement pourrait en principe être effectué dans une usine de raffinage relativement petite (de l'ordre de 10 000 tonnes par an). Elle pourrait être située dans la région et importer du glycérol brut d'une usine régionale de biodiesel afin de fournir un combustible renouvelable pouvant être utilisé pour la production d'électricité ou à d'autres fins.

### 3.5.2 Contraintes

#### Contraintes liées à la ressource

La disponibilité de la biomasse et son coût, qu'elle soit produite localement ou importée, constituent des éléments clés pour déterminer la viabilité d'une centrale dans une communauté isolée. Une évaluation du risque de prix lié au combustible et de l'accès continu au combustible pendant la durée du projet représente une exigence spécifique à cette technologie. Compte tenu des scénarios présentés ci-dessus, les données suivantes sont nécessaires pour évaluer les éventuelles contraintes liées à la ressource :



- l'existence de déchets ménagers, de déchets d'emballages, de déchets alimentaires, de déchets agricoles, de déchets liés à la mariculture ou de déchets d'algues qui pourraient servir de matière première à une centrale Flexibuster ;
- l'existence de déchets plastiques mixtes (composants des flux de déchets ménagers et d'emballages) qui pourraient servir de matière première à une centrale Plaxx ;
- l'existence de déchets ligneux qui pourraient être convertis en méthanol ;
- la disponibilité de glycérol brut provenant d'une usine régionale de biodiesel.

### Contraintes techniques

Chacune des options de traitement des déchets et de la biomasse présente ses propres exigences en matière d'infrastructure. En ce qui concerne la production et le raccordement au réseau, il existe deux possibilités :

- l'usine de traitement produit directement de l'électricité et est située à un endroit propice au raccordement au réseau ;
- l'usine de traitement produit un combustible qui peut être brûlé dans une usine de diesel existante (pour la production d'électricité ou à d'autres fins) et nécessite l'utilisation de camions-citernes pour distribuer le combustible aux utilisateurs.

En ce qui concerne l'approvisionnement en matière première, il existe trois possibilités :

- les déchets domestiques et commerciaux peuvent être collectés et détournés à l'aide de l'infrastructure de collecte des déchets existante, de sorte qu'aucune infrastructure supplémentaire n'est nécessaire ;
- les déchets agricoles, les déchets liés à la mariculture et les déchets d'algues nécessiteraient des services spécialisés afin de rassembler et de transporter les déchets jusqu'à l'usine de traitement, éventuellement à l'aide d'installations déjà utilisées pour des activités agricoles et maricoles ;
- les matériaux d'origine régionale (p. ex. le glycérol brut) nécessiteraient des infrastructures pour les transporter jusqu'à l'usine de traitement, notamment des services de transport routier, de manutention portuaire et d'expédition.

### 3.5.3 Méthodologie de quantification de la ressource

Compte tenu de l'éventail des options potentiellement disponibles, une méthodologie en deux étapes est appropriée :

1. Détermination de l'ampleur de la matière première disponible ou potentiellement disponible dans les catégories énumérées ci-dessus. Cela permettra de déterminer les options de traitement les plus intéressantes.
2. Des données plus détaillées sur la matière première peuvent ensuite être collectées, y compris celles relatives à la saisonnalité, aux tendances, aux risques, etc.

## 3.6 Stockage de l'énergie

La variabilité intrinsèque de certaines technologies d'énergie renouvelable signifie que les périodes de production maximale correspondent rarement aux périodes de demande maximale. Sans moyens de stockage de l'énergie produite, il existe un risque que les générateurs doivent être réduits ou que l'énergie soit jetée. Comme la ressource renouvelable ne coûte rien (à l'exception de la biomasse), il



est financièrement avantageux de la produire chaque fois que cela est possible. Ce problème peut être résolu par l'utilisation de solutions de stockage de l'énergie.

Les technologies de stockage de l'énergie permettent un nivellement de la charge entre les périodes de production et les périodes de forte demande. Il est ainsi possible d'utiliser sur le réseau l'énergie renouvelable produite en dehors des heures de pointe et de réduire la nécessité de diminuer la production. Le stockage de l'énergie peut également être utilisé afin de répondre aux pics de demande, lorsque la demande est supérieure à la production actuelle. L'utilisation de l'énergie provenant de réserves de stockage permet de répondre à cette demande sans qu'il soit nécessaire de démarrer à froid une centrale électrique supplémentaire. La réponse des installations de stockage d'énergie est généralement très rapide. Par conséquent, les pics de demande soudains ou inattendus peuvent être satisfaits rapidement, ce qui minimise les perturbations du réseau (Denholm, 2010).

Les principales technologies de stockage de l'énergie sont les suivantes :

- **Stockage mécanique** : Ces systèmes convertissent l'énergie électrique en énergie potentielle mécanique, par exemple des centrales hydroélectriques de pompage, des systèmes d'air comprimé ou des volants d'inertie.
- **Stockage électrique** : Les systèmes basés sur des condensateurs stockent la charge électrique et peuvent être utilisés pour conserver l'énergie électrique en vue d'une utilisation ultérieure.
- **Stockage électrochimique** : Les systèmes de batteries stockent l'énergie électrique sous forme d'énergie potentielle chimique. Il existe de nombreux types de batteries chimiques qui peuvent être utilisées pour conserver l'énergie, la plus courante étant la batterie au lithium-ion. Une vue d'ensemble complète des options de stockage dans des batteries peut être consultée dans IRENA (2015).
- **Stockage de l'hydrogène** : Ces systèmes utilisent l'énergie électrique pour produire de l'hydrogène à partir d'eau. L'hydrogène peut être stocké à long terme, transporté vers un autre endroit ou utilisé en cas de besoin dans des piles à combustible ou des moteurs à combustion.

## 4. Applicabilité aux pays concernés

### 4.1 France

La production d'électricité en France est dominée par le nucléaire, qui représentait 72,3 % de la production d'électricité en France en 2016, les énergies renouvelables et fossiles produisant respectivement 19,2 % et 8,5 % de l'électricité (RTE Open Data, 2018). Une série d'interconnexions entre la France et ses voisins européens permet à d'autres pays d'accéder à l'importante énergie de base nucléaire produite en France. De même, la France peut consommer l'électricité excédentaire provenant du reste de l'Europe, en particulier s'il existe un excédent d'énergie éolienne produite en Europe du Nord ou en Espagne (IEA, 2016).

Les tarifs de l'électricité sont régulés par le gouvernement français par l'intermédiaire de la Commission de régulation de l'énergie (CRE). Tous les consommateurs ont accès aux mêmes tarifs, y compris ceux résidant dans des îles isolées et des départements d'outre-mer. Le coût supplémentaire



de la production d'énergie et de sa distribution aux régions isolées du pays est financé par une taxe sur les factures d'énergie.

La France bénéficie de ressources renouvelables riches et diversifiées. Les vitesses du vent le long de la côte atlantique et dans les contreforts des montagnes sont appropriées à la production d'énergie éolienne. Par ailleurs, il existe une excellente ressource solaire, en particulier dans le sud du pays. Les côtes nord et ouest offrent des possibilités pour l'exploitation des technologies émergentes dans le domaine de l'énergie des vagues et de l'énergie marémotrice, comme en témoigne le nombre croissant de projets de démonstration qui en sont aux stades de la planification et du développement (Ocean Energy Systems, 2016).

## 4.2 Royaume-Uni

La production d'électricité au Royaume-Uni est plus diversifiée qu'en France. En 2016, 54,5 % de l'électricité était produite à partir de combustibles fossiles (42 % à partir de gaz naturel, 9 % à partir de charbon), 21 % de l'électricité était produite à partir du nucléaire et 24,5 % à partir d'énergies renouvelables (Energy UK, 2018). Du point de vue des énergies renouvelables, le Royaume-Uni dispose d'un éventail de ressources tout aussi diversifié et présente l'un des potentiels les plus élevés au monde en ce qui concerne la ressource d'énergie marémotrice. Le Royaume-Uni est un leader mondial en ce qui concerne l'énergie éolienne en mer. Le pays possédait une capacité opérationnelle de 5,36 GW en juin 2017 et 15,94 GW supplémentaires avaient entraîné l'octroi d'un permis de construire ou étaient en cours de construction (RenewableUK, 2017b). La Figure 4-1 montre les lieux de production d'énergie renouvelable au Royaume-Uni.



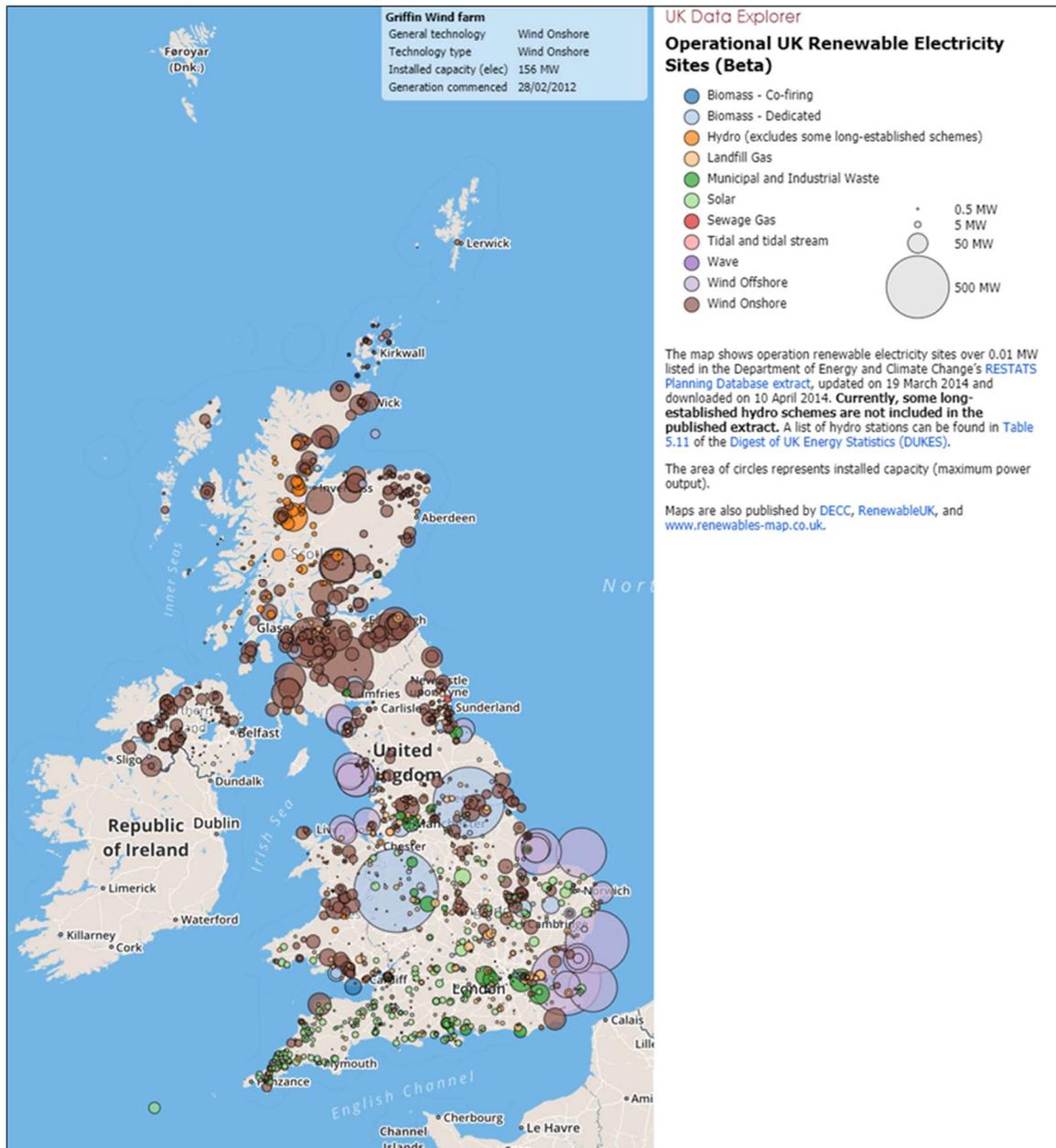


Figure 4-1 : Carte des installations d'énergie renouvelable au Royaume-Uni en 2014 (source : UK Data Explorer, 2014)

## 5. Applicabilité aux sites principaux concernés

### 5.1 Ushant / Ouessant

Ouessant est une île située au large de la côte nord-ouest de la France (Figure 5-1). En 2009, elle comptait environ 850 habitants répartis dans 488 habitations (Sogreah Consultants, 2009). Le tourisme représente le principal secteur. Il peut accroître temporairement la population locale, plus de 100 000 visiteurs se rendant sur l'île chaque année, principalement pendant la saison estivale. L'île est actuellement alimentée par quatre générateurs diesel fournissant jusqu'à 4,1 MW. En 2015, une turbine marémotrice Sabella D10 de 1,1 MW (initialement limitée à 250 kW) alimentait l'île en électricité (Paboeuf et al., 2016). Il est prévu qu'elle soit remise en service à plein régime au



printemps 2018. En 2017, un système d'énergie solaire de 50 kW a été installé sur le bâtiment de la salle de sport de l'île et d'autres installations solaires sont prévues (SDEF, 2018). L'île vise à ce que 70 % de son électricité soit produite à partir de technologies renouvelables d'ici 2020 et 100 % d'ici 2030. C'est ce qui a été déclaré lors d'une réunion avec le maire d'Ouessant, des responsables locaux et l'équipe du projet ICE (Palluel, D. communication personnelle, novembre 2017). En raison des protections environnementales en place sur l'île et de la dépendance à l'égard du tourisme estival, il est probable que certaines technologies renouvelables ne se prêtent pas à un déploiement à grande échelle sur ou autour de l'île. Toutefois, les technologies solaires, éoliennes, marémotrices et celles relatives à la biomasse pourraient toutes être explorées afin d'augmenter le niveau de production renouvelable et de diversifier le bouquet énergétique de l'île. Les technologies de chauffage et l'efficacité énergétique peuvent également contribuer utilement à l'amélioration de la sécurité énergétique de l'île.

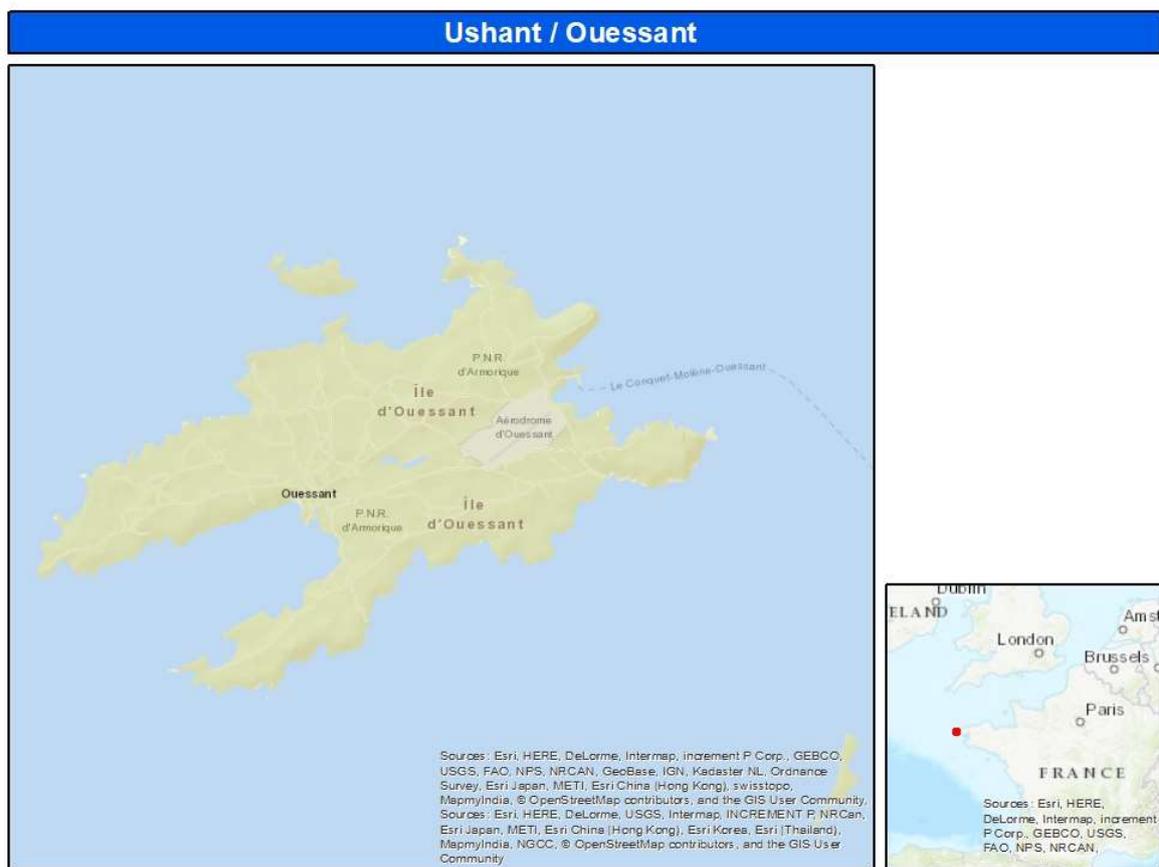


Figure 5-1 : L'île d'Ouessant et sa situation au large de la côte nord-ouest de la France

## 5.2 Campus de l'Université d'East Anglia

L'Université d'East Anglia est un campus universitaire situé près de Norwich dans le Norfolk, dans l'est du Royaume-Uni (Figure 5-2). L'Université compte environ 20 000 étudiants et 4 000 membres du personnel, dont environ 4 500 résident sur le campus pendant plus de la moitié de l'année. Le campus dispose d'une capacité de production solaire de 250 kW installée sur les toits des bâtiments ainsi que



de trois unités de PCCE produisant 5,7 MW d'électricité et 5,9 MW de chaleur. L'objectif du campus est d'installer 1 MW d'énergie solaire d'ici 2020. En outre, des recherches ont été menées en vue d'installer un générateur de biomasse de 1 MW.

Le campus n'est pas côtier. Il ne présente donc pas de potentiel pour la ressource marine. Néanmoins, la production supplémentaire d'énergie solaire et de biomasse sera envisagée et le potentiel pour l'énergie éolienne sera examiné.

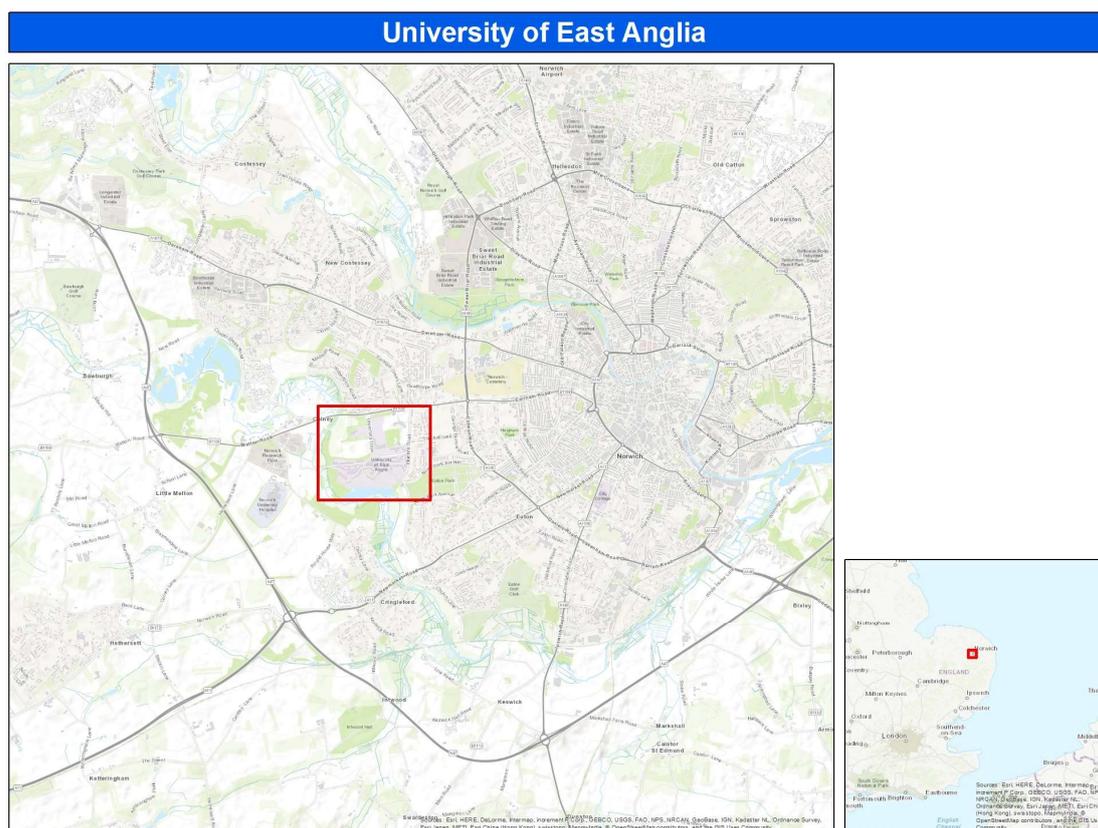


Figure 5-2 : L'emplacement du campus de l'Université d'East Anglia à Norwich, dans l'est du Royaume-Uni

## 6. Conclusions

Le présent document a examiné les technologies renouvelables disponibles en vue d'une évaluation plus approfondie spécifique à chaque site du potentiel individuel que présentent Ouessant et le campus de l'UEA. Le présent document a déterminé les principales contraintes liées à la ressource, à la technologie, à l'environnement et à la réglementation. En tant qu'île exposée, Ouessant est bien située pour bénéficier de l'énergie solaire, marémotrice, éolienne et de l'énergie relative à la biomasse. Si l'énergie des vagues peut être une option pour l'avenir, elle n'est pas suffisamment développée commercialement pour qu'on puisse envisager de l'intégrer au bouquet énergétique à l'heure actuelle. Sur le campus de l'UEA, les technologies solaires et relatives à la biomasse seront probablement les plus efficaces. Il est également possible d'utiliser l'énergie éolienne si les contraintes en matière d'aménagement du territoire le permettent et si l'Université est intéressée après avoir pris en compte les préoccupations locales. Les évaluations complètes de ces technologies pour les deux



sites seront présentées dans le rapport T1.4 du projet ICE. Toutefois, à l'exception de la biomasse, toutes ces ressources sont intermittentes et certaines sont plus prévisibles que d'autres. Les solutions de stockage de l'énergie sont donc susceptibles de jouer un rôle important dans l'amélioration de l'approvisionnement en électricité et la garantie d'une résilience, bien que cela concerne davantage l'île d'Ouessant, qui n'est pas raccordée au réseau. Ces questions seront traitées en détail dans le rapport T1.2 du projet ICE.



## Bibliographie

- Amillo, A. G., et al., 2014. A new database of global and direct solar radiation using the eastern meteosat satellite, models and validation. *Remote Sensing*, 6(9) pp. 8165-8189.
- Atlantis Resources Ltd, 2018a. *SeaGen-S 2MW*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.atlantisresourcesltd.com/wp/wp-content/uploads/2016/08/SeaGen-Brochure.pdf> [Consulté le 24/01/18].
- Atlantis Resources Ltd, 2018b. *MeyGen*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.atlantisresourcesltd.com/projects/meygen/> [Consulté le 24/01/18].
- Baig, H., Heasman, K.C. & Mallick, T.K., 2012. Non-uniform illumination in concentrating solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp. 5890-5909.
- BEIS, 2016. *Electricity Generation Costs*. Department for Business, Energy and Industrial Strategy, Londres, Royaume-Uni.
- Benoit, M., Marcos, F. & Becq, F., 1996. Development of a third generation shallow-water wave model with unstructured spatial meshing. *Proc. 25th International Conference on Coastal Engineering*, 2-6 septembre 1996, Orlando, Floride, États-Unis.
- Booij, N., Ris, R.C. & Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions - 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research – Oceans*, 104 pp. 7649-7666.
- Brower, M., 2012. *Wind resource assessment: a practical guide to developing a wind project*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- Charlier, R.H. & Menanteau, L., 1997. The saga of tide mills. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1(3), pp. 171-207.
- Codiga, D.L., 2011. *Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions*. Technical Report 2011-01. Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, RI, États-Unis.
- Connor, P. M., Xie, L., Lowes, R., Britton, J. & Richardson, T., 2015. The development of renewable heating policy in the United Kingdom. *Renewable Energy*, 75, pp. 733-744.
- Copping, A., Sather, N., Hanna, L., Whiting, J., Zydlewski, G., Staines, G., Gill, A., Hutchison, I., O'Hagan, A., Simas, T., Bald, J., Sparling, C., Wood, J., & Masden, E., 2016. *Annex IV 2016 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World*. IEA OES Annex IV.
- DECC, 2010. *Severn Tidal Power Feasibility Study Conclusions and Summary Report*. HM Government Department of Energy and Climate Change, Londres, Royaume-Uni.
- Denholm, P., Ela, E., Kirby, B. & Milligan, M., 2010. *The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation. Technical Report NREL/TP-6A2-47187*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, États-Unis.
- Department for Transport, 2013. *The Strategic Road Network and the Delivery of Sustainable Development*. Department for Transport, Londres, Royaume-Uni.
- Drewitt, A.L. & Langston, R.H.W., 2006. Assessing the impacts of wind farms on birds. *IBIS International Journal of Avian Science*, 148(s1), pp. 29-42.
- EMEC, 2017a. *Tidal developers*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://www.emec.org.uk/marine-energy/tidal-developers/> [Consulté le 01/12/17].
- EMEC, 2017b. *Wave developers*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-developers/> [Consulté le 25/01/18].



EMEC, 2018a. *Tidal clients*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://www.emec.org.uk/about-us/our-tidal-clients/> [Consulté le 24/01/18].

EMEC, 2018b. *Wave clients*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/> [Consulté le 25/01/18].

Energy Networks Association, 2014. *Distributed Generation Connection Guide*. Energy Networks Association, Londres, Royaume-Uni.

Energy UK, 2018. *Electricity generation*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.energy-uk.org.uk/energy-industry/electricity-generation.html> [Consulté le 25/01/16].

FaBTest, 2015. *Pioneering wave technology device launched in Falmouth heads for the US*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://fabtest.com/sites/default/files/FaBTest%20success%2023%203%2015.pdf> [Consulté le 25/01/18].

Global Wind Atlas, 2017. *Global Wind Atlas*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://globalwindatlas.info/> [Consulté le 25/01/18].

GWEC, 2016a. *Global Wind Report: Annual Market Update 2016*. Global Wind Energy Council, Bruxelles, Belgique.

GWEC, 2016b. *Offshore Wind*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2017/05/Global-Offshore-2016-and-Beyond.pdf> [Consulté le 19/12/17].

Hau, E., 2013. *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. Springer, Berlin.

Heath, J., Jensen, R. P., Weller, S., Hardwick, J., Roberts, J., Johanning, L., 2017. Applicability of geotechnical approaches and constitutive models for foundation analysis of marine renewable energy arrays. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, pp. 191-204.

HEFCE, 2010. *Carbon reduction target and strategy for higher education in England*. Higher Education Funding Council for England, Bristol, Royaume-Uni.

Hendry, C., 2016. *The Role of Tidal Lagoons*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://hendryreview.files.wordpress.com/2016/08/hendry-review-final-report-english-version.pdf> [Consulté le 24/01/18].

Hernandez, R.R., Easter, S.B., Murphy-Mariscal, M.L., Maestre, F.T., Tavassoli, M., Allen, E.B., Barrows, C.W., Belnap, J., Ochoa-Hueso, R., Ravi, S. & Allen, M.F., 2014. Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, pp. 766-779.

Huld, T., Muller, R. & Gambardella, A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy*, 86, pp. 1803-1815.

IEA, 2016. *Large scale electricity interconnection: Technology and prospects for cross-regional networks*. International Energy Agency, Paris, France.

IEC, 2014. *IEC 61400-1:2005+AMD1:2010 CSV Consolidated version. Wind turbines - Part 1: Design requirements*. International Electrotechnical Commission.

IEC, 2015a. *IEC TS 62600-201:2015 Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 201: Tidal energy resource assessment and characterization*. International Electrotechnical Commission.

IEC, 2015b. *IEC TS 62600-101:2015 Marine energy - Wave, tidal and other water current converters - Part 101: Wave energy resource assessment and characterization*. International Electrotechnical Commission.



- IEC, 2017. *IEC 61400-12-1:2017 Wind energy generation systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*. International Electrotechnical Commission.
- Inger, R., Attrill, M.J., Bearhop, S., Broderick, A.C., Grecian, W.C., Hodgson, D.J., Mills, C., Sheehan, C., Votier, S.C., Witt, M.J. & Godley, B.J., 2009. Marine renewable energy: potential benefits to biodiversity? An urgent call for research. *Journal of Applied Ecology*, 46(6), pp. 1145-1153.
- Ingram, D., Smith, G.H., Bittencourt-Ferreira, C. & Smith, H. (eds.), 2011. *Protocols for the Equitable Assessment of Marine Energy Converters*. University of Edinburgh, School of Engineering Publishers, Édimbourg, Royaume-Uni.
- IRENA, 2015. *Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, É.A.U.
- IRENA, 2016. *The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, É.A.U.
- Kempener, R. & Neumann, F., 2014. *Tidal Energy Technology Brief*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, É.A.U.
- Legrand, C., 2009. *Assessment of Tidal Energy Resource*. BSI, Londres, Royaume-Uni.
- MEASNET, 2016. *Evaluation of site-specific wind conditions, version 2*. [en ligne] Disponible à l'adresse : [http://www.measnet.com/wp-content/uploads/2016/05/Measnet\\_SiteAssessment\\_V2.0.pdf](http://www.measnet.com/wp-content/uploads/2016/05/Measnet_SiteAssessment_V2.0.pdf) [Consulté le 25/01/16].
- Mermoud, A. & Wittmer, B., 2014. *PVsyst User's Manual*. [en ligne] Disponible à l'adresse : [http://www.pvsyst.com/images/pdf/PVsyst\\_Tutorials.pdf](http://www.pvsyst.com/images/pdf/PVsyst_Tutorials.pdf) [Consulté le 19/12/17].
- MHI Vestas, 2018. *MHI Vestas Offshore Wind leads offshore wind debate at AWEA 2016*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://www.mhivestasoffshore.com/mhi-vestas-offshore-wind-leads-offshore-wind-debate-awea-2016/> [Consulté le 25/01/18].
- Millar, D.L., Smith, H.C.M. & Reeve, D.E., 2007. Modelling analysis of the sensitivity of shoreline change to a wave farm. *Ocean Engineering*, 34, pp. 884-901.
- Ministry of Housing, Communities & Local Government, 2015. *Planning for renewable and low carbon energy: introduction*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.gov.uk/guidance/renewable-and-low-carbon-energy#wind-turbines> [Consulté le 25/01/18].
- Nova Innovation, 2018. *Shetland Tidal Array*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.novainnovation.com/tidal-array> [Consulté le 24/1/17].
- Ocean Energy Forum, 2016. *Ocean Energy Strategic Roadmap: Building Ocean Energy for Europe*. Ocean Energy Forum, Bruxelles, Belgique.
- Ocean Energy Systems, 2016. *Annual Report*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://report2016.ocean-energy-systems.org/> [Consulté le 25/01/18].
- Open Ocean, 2015. *Sabella Connects the First French Tidal Turbine*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://www.openocean.fr/en/news/2015/09/22/sabella-connects-the-first-french-tidal-turbine/> [Consulté le 24/01/18].
- OpenHydro, 2018. *Projects*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://www.openhydro.com/Projects> [Consulté le 24/01/18].
- Paboef, S., Sun, P.Y.K., Macadré, L.-M. & Malgorn, G., 2016. Power Performance Assessment of the Tidal Turbine Sabella D10 Following IEC62600-200. *Proc. 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, Busan, Corée du Sud, 19-24 juin 2016.



Page, J.K., Albuissou, M. & Wald, L., 2001. The European solar radiation atlas: a valuable digital tool. *Solar Energy*, 71(1), pp. 81-83.

Parish, D. et Hardwick, J. 2011, mis à jour en 2016 « Falmouth Bay Test Site: Description of site Characteristics and Eligible Test Installations ». Technical Report, FaBTest

Pawel, I., 2014. « The Cost of Storage – How to Calculate the Levelized Cost of Stored Energy (LCOE) and Applications to Renewable Energy Generation ». *Energy Procedia*, 46, pp. 68-77.

Pico OWC, 2006. *OWC Pico Power Plant*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://www.pico-owc.net/gallery.php?cat=42&id=226&wnsid=8e59c45a7d6d10b995906dddffa282af3> [Consulté le 25/01/18].

Pitt, E., 2009. *Assessment of Wave Energy Resource*. BSI, Londres, Royaume-Uni.

Quietrevolution, pas de date. *The qr6 Vertical Axis Wind Turbine*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.quietrevolution.com/> [Consulté le 25/01/18].

Recycling Today, 2017. *Recycling Technologies awarded for Plaxx oil*. [en ligne] [Consulté le 25/01/18].

Ren, L., Nash, S. & Hartnett, M., 2015. Observation and modeling of tide- and wind-induced surface currents in Galway Bay. *Water Science and Engineering*, 8(4), pp. 345-352.

RenewablesNow, 2016. *French wind power costs EUR 76 per MWh – study*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://renewablesnow.com/news/french-wind-power-costs-eur-76-per-mwh-study-550594/> [Consulté le 19/12/17].

RenewableUK, 2017a. *Offshore wind prices tumble in record-breaking auction results – cheaper than nuclear and gas*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://www.renewableuk.com/news/362971/Offshore-wind-prices-tumble-in-record-breaking-auction-results--cheaper-than-nuclear-and-gas-.htm> [Consulté le 19/12/17].

RenewableUK, 2017b. *Offshore Wind Project Timelines*. [en ligne] Disponible à l'adresse : [http://c.yimcdn.com/sites/www.renewableuk.com/resource/resmgr/publications/RUK17\\_Offshore\\_Timeline\\_v4.pdf](http://c.yimcdn.com/sites/www.renewableuk.com/resource/resmgr/publications/RUK17_Offshore_Timeline_v4.pdf) [Consulté le 26/01/18].

Retiere, C., 1994. Tidal power and the aquatic environment of La Rance. *Biological Journal of the Linnean Society*, 51, pp. 25-36.

Robinson, C.M.E., Paramasivam, E.S., Taylor, E.A., Morrison, A.J.T. & Sanderson, E.D., 2013. *Study and development of a methodology for the estimation of the risk and harm to persons from wind turbines*. Health and Safety Executive, Royaume-Uni.

RTE Open Data, 2018. *Production nationale annuelle par filière (2012 à 2016)*. [en ligne] Disponible à l'adresse : [https://opendata.rte-france.com/explore/dataset/prod\\_par\\_filiere/?sort=-annee](https://opendata.rte-france.com/explore/dataset/prod_par_filiere/?sort=-annee) [Consulté le 25/01/18].

SDEF, 2018. *Future solar power plants in Ushant driven by SDEF*. SDEF.

SEaB Energy, 2016. *Flexibuster*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://seabenergy.com/products/mb400/> [Consulté le 25/01/18].

Siemens, 2018. *Onshore Geared Wind Turbine SWT-2.3-101*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.siemens.com/global/en/home/markets/wind/turbines-and-services/swt-2-3-101.html> [Consulté le 25/01/18].

Skoplaki, E. & Palyvos, J.A., 2009. *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations*. *Solar Energy*, 83, pp. 614-624.



- Smith, L., 2016. *Planning for onshore wind, Briefing Paper Number 04370*. House of Commons Library, Londres, Royaume-Uni.
- Sogreah Consultants, 2009. *Etude de faisabilité d'une opération de maîtrise de l'énergie et de développement des énergies renouvelables sur les îles de Molène et Ouessant*. Sogreah, Lyon, France.
- SolarGIS, 2018. *Solar resource maps of World*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://solargis.com/products/maps-and-gis-data/download/world> [Consulté le 26/01/18].
- Statoil, 2017. *World's first floating wind farm has started production*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.statoil.com/en/news/worlds-first-floating-wind-farm-started-production.html> [Consulté le 19/12/17].
- Surfers Against Sewage, 2009. *Guidance on environmental impact assessment of offshore renewable energy development on surfing resources and recreation*. Surfers Against Sewage, St Agnes, Royaume-Uni.
- Šúri, M. & Hofierka, J., 2004. A New GIS-based Solar Radiation Model and Its Application to Photovoltaic Assessments. *Transactions in GIS*, 8(2), pp. 175-190.
- Tidal Lagoon Power, 2018. *Planning*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://www.tidallagoonpower.com/projects/swansea-bay/planning/> [Consulté le 27/01/18].
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N. & Gekas, V., 2005. Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33(3), pp. 289-296.
- UK Data Explorer, 2014. *Operational UK Renewable Electricity Sites*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://ukdataexplorer.com/renewables/> [Consulté le 26/01/18].
- Wang, S. & Wang, S., 2015. Impacts of wind energy on environment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, pp. 437-443.
- Warren, I.R. & Bach, H.K., 1992. MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. *Environmental Software*, 7, pp. 229-240.
- Wavestar, pas de date. *Projects*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <http://wavestarenergy.com/projects> [Consulté le 25/01/18].
- Wind Power, The, 2017. *V39/500 (Vestas)*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.thewindpower.net/scripts/fpdf181/turbine.php?id=169> [Consulté le 19/12/17].
- Wyatt, L.R., Green, J.J. & Middleditch, A., 2011. HF radar data quality requirements for wave measurement. *Coastal Engineering*, 58, pp. 327-336.
- Zhou, Z., Sculler, F., Charpentier, J.F., Benbouzid, M. & Tang, T., 2014. An up-to-date review of large marine tidal current turbine technologies. *Proc. International Power Electronics and Application Conference and Exposition*, Shanghai, Chine, 5-8 novembre 2014.

