



Un nouveau regard sur l'énergie des marées

Une chance pour les
Territoires Français



Livre Blanc du GT national SHF « Nouveau Marémoteur »

Guide complet – 2019

(ce guide complète et détaille le livret de synthèse publié par la SHF en Janvier 2019)

PREFACE & SYNTHESE

Ré-ouvrir l'option marémotrice : une audace réaliste

La France aurait-elle son énergie marémotrice honteuse ?

La question s'impose tant le regard porté sur cette énergie totalement renouvelable, prédictible, abondante est ambivalent. Regard reconnaissant et fier devant la réussite industrielle et pionnière de l'usine de la Rance. Mais regard perplexe aussi et parfois même hostile, avec l'idée reçue que de nouveaux sites ne sont pas imaginables.

Cette perception ambivalente est d'ailleurs retranscrite dans la vision restituée jusqu'à présent à l'échelon national : le rapport de la mission d'étude interministérielle sur les énergies marines renouvelables publié en mars 2013¹, reconnaît sa maturité technologique et son potentiel. Cependant, les questions d'acceptabilité environnementale et sociétale sont mises en avant comme un frein majeur pour pouvoir la considérer comme une option du futur.

La SHF est convaincue que cette énergie a un avenir

En 2015, renouant avec ses missions premières, la Société Hydrotechnique de France (SHF) a souhaité, à travers un groupe de travail (GT) national intitulé « Nouveau marémoteur », revisiter les fondamentaux de cette puissante énergie, et redéfinir les conditions de son développement moderne et responsable. Rassemblant plus d'une vingtaine d'experts et de spécialistes, il restitue réflexions, données, informations à jour et proposition d'actions pour rouvrir l'option marémotrice, une technologie mature à fort potentiel d'*innovation*. Ce groupe de travail a mis en lumière les conditions de faisabilité et de viabilité de nouveaux projets dans une approche moderne et innovante, sans concession sur les questions d'intégration environnementale des projets.

Le présent guide complète ainsi le livret de synthèse du GT national « Nouveau Marémoteur » déjà publié par la SHF début 2019. Il a pour ambition de replacer l'énergie marémotrice dans un contexte qui a profondément évolué depuis la mise en service de l'usine de la Rance en 1967. Il offre la vision complète des travaux du GT « Nouveau Marémoteur » qui expose convictions et clés pour réussir de futurs projets : une **intégration territoriale globale**, une **intégration environnementale optimisée**, **l'innovation** comme moteur de développement et une **évaluation économique lucide et transparente**.

¹ Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie / Ministère de l'Economie. Rapport de la mission d'étude sur les énergies marines renouvelables (mars 2013). N° 2013 / 008693-01 / CGEDD

Après un rappel des chiffres-clés caractéristiques de l'énergie marémotrice (Chap. 2), permettant aussi de corriger certaines idées reçues, ce guide rappelle les principes et les différents modes de fonctionnement et de configuration d'une installation marémotrice (Chap. 3). Une large part du guide est ensuite consacrée aux enjeux d'intégration, d'impacts et d'effets environnementaux et sociétaux de tels projets sur des zones maritimes et littorales par essence sensibles (Chap. 4). De ce fait, l'avenir de tels projets passe aux yeux de la SHF par des recherches de synergies entre les différents usages, notamment **la possibilité d'améliorer la protection du littoral contre l'érosion et les submersions marines** : c'est l'objet du Chap. 5 d'identifier toutes les opportunités de multi-usages et d'intégration territoriale de tels aménagements, les mêmes installations pouvant apporter des services à plusieurs usages différents. L'état de l'art technico-économique, concernant à la fois le génie-civil et les machines, est exposé au Chap. 6, en précisant les champs d'innovation permettant à la fois (i) de réduire l'empreinte environnementale, (ii) d'optimiser la production, et (iii) de réduire les coûts de construction et d'exploitation. La vision d'un potentiel de développement « pragmatique », intégrant les critères de viabilité économique des projets, est enfin proposée, avant de dresser une possible feuille de route pour la filière marémotrice française (Chap. 7), qui peut se résumer par :

- **Horizon 2020-2021** : zonages et pré-qualifications de données de bases en Normandie ou Hauts-de-France (les deux régions identifiées comme les plus attractives en France),
- **Horizon 2021-2025** : engagement du développement d'un ou plusieurs projets pilotes ou projets « pré-commerciaux » d'au moins 350 MW de puissance installée, et plus généralement de taille adaptée au territoire étudiée,
- **Horizon 2025-2030** : engagement du développement d'un grand projet de territoire (voire deux) supérieur au GW de puissance.

Forte de ces travaux, la SHF est convaincue que l'énergie marémotrice est un atout majeur pour la transition énergétique, pour enrichir le mix des sources d'énergie décarbonée. Les territoires sont parmi les premiers engagés à la mise en œuvre de cette transition sur le terrain, et nous pensons que l'énergie marémotrice est un atout pour leur développement économique, social et écologique.

Nous remercions tous les contributeurs au dossier « Nouveau Marémoteur », organisé autour de 3 sous-groupes thématiques (voire liste ci-après). Nous souhaitons que le présent guide éclaire tous les acteurs et décideurs territoriaux et nationaux sur cette formidable source d'énergie.

Olivier METAIS
(Grenoble-INP)

Président de la SHF

Pierre-Louis VIOLLET
(SHF)

Président du BCST de la SHF

Denis AELBRECHT
(EDF-CIH)

Pilote du GT national "Nouveau Marémoteur"

Membres du GT national « Nouveau Marémoteur de la SHF » :

Pilotage du GT national : Denis Aelbrecht (EDF Hydro / CIH), avec l'appui de deux « challengers » : Michel Paillard (expert, ex. Chef de projet EMR à l'Ifremer) ; et Jérôme Loyer (expert, ex. Veolia).

Sous-groupe A « Environnement et intégration territoriale » piloté par Christophe Le Visage (Président Stratégies Mer & Littoral), avec la contribution de : Jean-Paul Bouheret (EDF Hydro), Sébastien Ledoux (Artelia), Claire Le Renard (EDF R&D) ; Paul Leslie (Tidal Lagoon Power).

Sous-groupe B « Economie, Viabilité des projets, et Prospective » piloté par Antoine Rabain (Président de Geckosphere), avec la contribution de : Alain Clément (ECN-LHEEA), Romain Dausque (EDF Hydro), Vincent Delaleu (EDF R&D), Olivier Didry (EDF Hydro), Jean-François Filipot (France Energies Marines), Dominique Gagnaire (Tidal Lagoon Power), Jill Galland (Consultant énergie renouvelable), Dominique Godefroy (Ifremer, Président Parc Naturel Marin Côte d'Opale), David Havard (GE-Alstom Power Hydro), François Lempérière (Président, Hydrocoop), Hassan Smaoui (Cerema).

Sous-groupe C « Technologies » : piloté par Luc Deroo (Président d'ISL-Ingénierie), avec la contribution de Sophie Ancel (Artelia), Claude Bessière (Ingérop), Léo Breuilly (ISL-Ingénierie), Christophe Cochet (EDF Hydro / CIH), Nicolas Jestin (Bouygues), Stefan Kristukat (Andritz-Hydro), Florence Lafon (EDF Hydro / CIH), Marc Leclerc (MJ2 Technologies), François Lempérière (Président HydroCoop), Antoine Libaux (EDF Hydro / CIH), Philippe Pépin (GE-Alstom Power Hydro).

TABLE DES MATIERES

PREFACE & SYNTHESE	2
1 Préambule et contexte	11
1.1 Environnement du marché du marémoteur	11
1.2 Mandat du groupe de travail et contexte de ce document	12
1.3 Liste des contributeurs	13
2 L'énergie des marées : chiffres-clés.....	15
2.1 Panorama du marché mondial du marémoteur	15
2.1.1 <i>Points méthodologiques</i>	15
2.1.2 <i>Bilan de situation du marché mondial à fin 2016</i>	15
2.1.3 <i>Premières évaluations économiques sur les investissements</i>	17
2.2 Potentiel de marché et prospective à horizon 2030.....	19
2.2.1 <i>De la nécessité de définir un potentiel techniquement exploitable ... pragmatique</i>	19
2.2.2 <i>Qualification du potentiel du marémoteur au niveau mondial</i>	21
2.2.3 <i>Approfondissement de la dynamique de marché autour d'une douzaine de pays clés</i>	22
2.2.4 <i>Synthèse du potentiel de marché accessible et prospective de marché</i>	23
2.3 Annexe : Tableau de données qualifiées sur les projets les plus avancés au monde.....	26
3 L'énergie marémotrice : principes techniques	27
3.1 L'énergie des marées, comment ça marche ?	27
3.2 Typologie d'aménagements : la configuration des bassins	28
3.2.1 <i>Bassins d'estuaire</i>	28
3.2.2 <i>Bassins offshore</i>	29
3.2.3 <i>Bassins côtiers</i>	30
3.2.4 <i>Bassins côtiers de grande dimension</i>	30
3.2.5 <i>Petits sites ou sites de démonstration</i>	32
3.3 Energie envisageable - Puissance installée	33
3.3.1 <i>Energie envisageable</i>	33
3.3.2 <i>Fonctionnement hydraulique d'un bassin marémoteur simple en marée moyenne</i>	34
3.4 Principaux types de fonctionnement.....	37
3.4.1 <i>Type A - Opération dans un seul sens</i>	38
3.4.2 <i>Type B - Opération à double sens sous charge élevée</i>	39
3.4.3 <i>C - Opération à double sens sous charge moyenne</i>	41
3.4.4 <i>Type D - Opération au fil de l'eau</i>	42
3.4.5 <i>Comparaison des différentes options</i>	43
3.5 Fonctionnement hydraulique pour les autres types de marée	44
3.5.1 <i>Modulation du fonctionnement</i>	44
3.5.2 <i>Bassins associés</i>	45
3.6 Un retour d'expérience : l'usine de La Rance	45
3.6.1 <i>Description de l'aménagement</i>	46

3.6.2	<i>Les modes de fonctionnement</i>	47
3.6.3	<i>Exploitation et contraintes</i>	48
3.6.4	<i>La maintenance</i>	49
4	Incidence des projets sur l'environnement maritime et littoral	52
4.1	Résumé exécutif de cette partie.....	52
4.2	Objectifs et méthodologie de l'étude	53
4.2.1	<i>Typologie des projets marémoteurs</i>	55
4.2.2	<i>Cycle de vie des projets marémoteurs</i>	56
4.2.3	<i>Caractérisation de l'environnement marin</i>	57
4.2.4	<i>Typologie des régions susceptibles d'accueillir des projets marémoteurs</i>	58
4.3	Typologie des effets potentiellement associés aux projets marémoteurs	59
4.3.1	<i>Analyse des effets</i>	59
4.3.2	<i>Evaluation préliminaire des effets potentiels</i>	60
4.4	Incidences potentielles	61
4.4.1	<i>Incidences potentielles en fonction des descripteurs environnementaux</i>	61
4.4.2	<i>Incidences en fonction du type d'écosystème</i>	64
4.4.3	<i>Risques naturels</i>	65
4.5	Mesures d'évitement, de réduction, de compensation	65
4.5.1	<i>Evitement</i>	66
4.5.2	<i>Réduction</i>	67
4.5.3	<i>Compensation</i>	67
4.6	Synthèse, conclusions.....	69
4.7	Annexes	70
4.7.1	<i>Liste des descripteurs de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM)</i>	70
4.7.2	<i>Liste indicative de caractéristiques, pressions et impacts (source : DCSMM)</i>	71
5	Opportunités multi-usages	74
5.1	Résumé exécutif	74
5.2	Introduction.....	75
5.2.1	<i>Objectifs de l'étude</i>	75
5.2.2	<i>Approche choisie</i>	76
5.3	Interactions avec les autres activités, impacts, synergies.....	77
5.3.1	<i>Interactions avec les activités</i>	77
5.3.2	<i>Analyse des interactions : impacts, synergies avec les activités</i>	79
5.4	Acceptabilité vis-à-vis des activités	80
5.4.1	<i>Acception des projets : des enjeux multiples</i>	80
5.4.2	<i>Les obstacles potentiels à l'acceptation des projets</i>	81
5.4.3	<i>Mesures de réduction des impacts</i>	82
5.4.4	<i>Association d'autres acteurs au projet marémoteur</i>	84
5.5	Interactions avec les territoires littoraux.....	86
5.5.1	<i>Des projets en interaction forte avec le territoire</i>	86
5.5.2	<i>Des projets structurants pour l'identité du territoire</i>	87
5.5.3	<i>Des projets porteurs pour l'économie bleue</i>	87
5.6	Synthèse et conclusion sur l'intégration sociale et économique des projets marémoteurs.....	88
5.6.1	<i>Incidences socio-économiques des projets marémoteurs</i>	88

5.6.2	<i>Enjeux socio-économiques : neutralité impossible, oppositions inévitables</i>	89
5.6.3	<i>Mesures susceptibles de favoriser l'appropriation territoriale des projets marémoteurs</i>	90
5.6.4	<i>Autres facteurs influant sur l'intégration des projets</i>	91
5.7	Intégration territoriale des projets marémoteurs - Recommandations	92
5.7.1	<i>Etude stratégique des sites favorables aux projets marémoteurs</i>	92
5.7.2	<i>Prise en compte du marémoteur dans les politiques nationales et régionales</i>	92
5.7.3	<i>Planification stratégique – Evaluation stratégique, consultation du public</i>	93
5.7.4	<i>Conception et portage des projets</i>	93
5.7.5	<i>Choix des projets</i>	95
5.7.6	<i>Projet pilote</i>	95
5.7.7	<i>Gouvernance des projets</i>	96
5.7.8	<i>Consultation du public</i>	96
5.7.9	<i>Production de valeur locale</i>	96
5.8	Annexes	98
5.8.1	<i>Annexe 1 - Typologie des interactions, des conflits, des synergies</i>	98
5.8.2	<i>Annexe 2 - Incidences potentielles pour chaque activité</i>	100
5.8.3	<i>Annexe 3 – Exemple d'analyse des interactions pour un projet marémoteur de type « lagon littoral »</i> 104	
5.8.4	<i>Annexe 4 – Trois scénarios envisageables</i>	106
5.8.5	<i>Annexe 5 - Bibliographie</i>	108
6	Etat de l'art technico-économique	109
6.1	Turbines et équipements électriques	109
6.1.1	<i>Turbines pour aménagement marémoteur classique</i>	109
6.1.2	<i>Autres types de turbines</i>	113
6.1.3	<i>Hydroliennes pour aménagement de type marélienne</i>	117
6.1.4	<i>Prédétermination du coût des équipements</i>	120
6.2	Digues et génie-civil	121
6.2.1	<i>Retours d'expérience de travaux de digues à la mer</i>	121
6.2.2	<i>Conception et dimensionnement des digues</i>	127
6.2.3	<i>Conception et de dimensionnement du bassin</i>	130
6.2.4	<i>Conception et construction des usines</i>	131
6.2.5	<i>Conception et dimensionnement des pertuis</i>	131
6.2.6	<i>Prédétermination du coût des ouvrages de génie-civil</i>	132
6.3	Puissance, productible, coût	135
6.3.1	<i>Définition d'un site de référence</i>	135
6.3.2	<i>Prédétermination du productible et du coût d'un aménagement marémoteur côtier « classique »</i>	135
6.3.3	<i>Hydraulique du chenal de marélienne</i>	138
6.3.4	<i>Prédétermination du productible et du coût d'un aménagement de type « marélienne »</i> .	143
6.3.5	<i>Quelques pistes de progrès techniques</i>	147
7	Potentiel de développement & Attractivité socio-économique des projets	150
7.1	Eléments méthodologiques	150
7.1.1	<i>Approche générale sur l'analyse d'attractivité des projets</i>	150
7.1.2	<i>Détail des hypothèses retenues par le GT</i>	151

7.2	Choix d'un scénario de référence et détermination de son seuil d'attractivité économique	153
7.3	Conditions d'atteinte du seuil d'attractivité	154
7.3.1	Contribution de la vente d'électricité à l'atteinte du seuil d'attractivité	154
7.3.2	Contribution du multi-usages à l'atteinte du seuil de rentabilité	155
7.3.3	Bénéfices socio-économiques et externalités environnementales positives	157
7.3.4	Bilan de l'analyse socio-économique des projets marémoteurs	160
7.4	Tests de sensibilité des variables clés du modèle d'attractivité des projets	161
7.4.1	Sensibilité à la puissance installée	161
7.4.2	Sensibilité au financement	162
7.4.3	Sensibilité au tarif d'achat de l'électricité	162
7.5	Annexes	163
7.5.1	Tableau de données justifiant l'évaluation des revenus issus du multiusage	163
8	Bilan et recommandations pour la filière française	164
8.1	Résumé des éléments clés d'analyse du marché international	164
8.2	Bilan sur les conditions de réalisation spécifiques d'ordre socio-économique des nouveaux projets marémoteurs	164
8.3	Recommandations de stratégie et feuille de route nationale	165

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Maturités échelonnées des différentes filières EMR - Source : Antoine Rabain	11
Figure 2 : Localisation des 5 projets en opération dans le monde – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	16
Figure 3 : Mise en évidence du poids économique de la digue – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	18
Figure 4 : Evolution des CAPEX selon 2 volets critiques et fonction de la taille des projets (sur la base du retour d'expérience) – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	18
Figure 5 : Cartographie mondiale des gisements éligibles et des potentiels théoriques – Source : National Tidal Centre, Bureau of Meteorology	19
Figure 6 : Approche méthodologique pour évaluer le PTE du marémoteur au niveau mondial - Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	21
Figure 7 : Evaluation des PTE par grande zones géographiques via l'analyse des potentiels de 20 pays - Total : 1'250 TWh/an - Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	21
Figure 8 : Matrice des pays clés du marémoteur au niveau mondial - Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	22
Figure 9 : 1 ^{er} traitement : bilan de l'analyse de données brutes de 56 projets identifiés dans le monde - Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	24
Figure 10 : 2 nd traitement : bilan de l'analyse des volumes de production probabilisées dans le monde - Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	25
Figure 11 : Synthèse des chiffres clés entre le PTE et la prospective à horizon 2035 - Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	25

Figure 12 : Données qualifiées par les contributeurs du GT sur les projets les plus avancés au monde - Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	26
Figure 13 : Illustration des situations de marée	27
Figure 14 : Cycles d'utilisation de l'énergie potentielle des marées en bassin	28
Figure 15 : deux bassins d'estuaires ; le moulin à marée de l'île d'Arz et l'usine de la Rance	28
Figure 16 : Schéma conceptuel d'un bassin offshore - Source : ISL Ingénierie	29
Figure 17 : Implantation envisagée pour le projet Swansea Bay	30
Figure 18 : Schéma conceptuel pour un bassin côtier de grande taille, équipé en marélienne - Source : ISL Ingénierie	31
Figure 19 : barrière Oosterschelde (PB) récemment équipé d'un groupe de turbines expérimental...	33
Figure 20 : Fonctionnement typique de l'usine de La Rance	36
Figure 21 : Option A, pour la marée moyenne. Illustration des niveaux respectifs en mer et dans le bassin, et de la période de production d'énergie	38
Figure 22 : Fonctionnement typique de l'usine de Sihwa	39
Figure 23 : Option B, pour la marée moyenne. Illustration des niveaux respectifs en mer et dans le bassin, et de la période de production d'énergie	40
Figure 24 : Option C, pour la marée moyenne. Illustration des niveaux respectifs en mer et dans le bassin, et de la période de production d'énergie	41
Figure 25 : Option D, pour la marée moyenne. Illustration des niveaux respectifs en mer et dans le bassin, et de la période de production d'énergie	42
Figure 26 : Extrait de documentation EDF	46
Figure 27 - Approche générale de l'évaluation stratégique des incidences sur l'environnement	55
Figure 28 - Approche générale de l'étude des incidences sur les activités	77
Figure 29 - Retour local pour un projet porté par un territoire – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	97
Figure 30 - Maeslant Barrier, Pays-Bas	107
Figure 31 : Coupe d'une usine marémotrice avec turbine bulbe	109
Figure 32 : Turbine bulbe	110
Figure 33 : Un groupe de La Rance, en coupe	111
Figure 34 : Un groupe bulbe, montage dit « en cassette »	112
Figure 35 : Roue VLH (en rivière)	113
Figure 36 : « Turret » à axe horizontal, et « turret » contenant une turbine strafflo	115
Figure 37 : Usine à turbines orthogonales russes	116
Figure 38 : tube de courant autour d'une éolienne ou d'une hydrolienne en pleine mer, et puissance maximale extraite	117
Figure 39 : hydroliennes, des géométries très variées (Sabella, Seagen, Openhydro, concept Hydroquest)	118
Figure 40 : Travaux de recherche universitaire consacrés aux hydroliennes en chenal. Essais présentés par P. Mycek (PhD 2013 – Le Havre, France. Calculs développés par T. Divett (PhD 2014 – Otago, New Zeland)	118
Figure 41 : digue d'Antifer, source : GoogleEarth	122
Figure 42 : digue d'Antifer, coupe-type AA (côté Port à droite) – source : Artelia	122
Figure 43 : Le Havre port 2000, source : GoogleEarth	123
Figure 44 : digue principale de Port2000, coupe sur une section typique – source : Artelia	124
Figure 45 : vue d'artiste du projet Calais Port 2015 - source : Région Nord - Pas de Calais	124

Figure 46 : coupe-type de la digue à talus, Calais – source : colloque CFGI - 30/03/2017 (Arcadis)	125
Figure 47 : digue à caissons « Jarland » en cours de construction, Tanger Med II – Photo © Bouygues	126
Figure 48 : coupe-type de la digue à caissons, Tanger Med II	127
Figure 49 : illustration de modèles physiques – étude d’une coupe-type de digue ; étude du fonctionnement 3D d’un aménagement – source : Artelia	129
Figure 50 : exemple de modélisation hydrodynamique d’un bassin marélien – source ISL	130
Figure 51 : usine bulbe construite à sec (La Rance, source : EDF) ou amenée par flottaison (Vitalia, Mississippi)	131
Figure 52 : Vannes secteurs (Measlant-kering) et vannes levantes (Hartelkering) aux Pays-Bas – sources : images libres de droit Seabrook floodgates, Nouvelle Orléans - source : USACE	132
Figure 53 : simulation typique d’un aménagement marémoteur côtier	136
Figure 54 : Diagramme des pertes de charges d’un chenal marélien – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	138
Figure 55 : Validation du modèle marélien comparaison aux données publiées pour Seagen (1 turbine). Les résultats du modèle sont en cercles bleus	140
Figure 56 : Validation du modèle marélien : comparaison aux résultats de simulation de Divett (rangées multiple). Les résultats du modèle sont les valeurs de la série « model »	140
Figure 57 : calcul typique de rendement d’un chenal marélien	141
Figure 58 : chenal marélien, relation entre nombre de rangées et vitesse moyenne de l’écoulement	142
Figure 59 : chenal marélien, relation entre nombre de rangées et rendement du chenal	143
Figure 60 : Financement de l’actif économique du scénario référentiel – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	152
Figure 61 : Détail des scénarios - 1GW – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	153
Figure 62 : Positionnement des différents scénarios - 1GW – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	153
Figure 63 : Ecart vente d’électricité/seuil d’attractivité – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	154
Figure 64 : Détail des revenus annuels du multiusage imputables au lagon – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	155
Figure 65 : Revenus de la vente d’électricité et du multiusage par rapport au seuil d’attractivité – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	156
Figure 66 : Détail des emplois générés par le nouveau marémoteur – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	158
Figure 68 : Valorisation de la création d’emplois directs – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	159
Figure 69 : Valeur générée par l’électricité, le multiusage et les externalités d’emplois et environnementales – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	160
Figure 70 : Sensibilité du seuil d’attractivité à la puissance installée – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	161
Figure 71 : Sensibilité de l’attractivité au coût du financement – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	162
Figure 72 : Tableau de données justifiant les 10 M€/an de revenus issus du multiusage – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur	163

1 PREAMBULE ET CONTEXTE

1.1 Environnement du marché du marémoteur

Le marché des énergies marines renouvelables (EMR) fait référence à une large gamme de technologies.

Les ouvrages de type marémoteur dédiés à la valorisation du courant des marées représentent la filière historique, avec des productions commerciales qui remontent à plus de 50 années, mais n'a pas fait l'objet d'investissements soutenus sur la période – seuls quelques ouvrages sont en opération actuellement, et en particulier deux installations de quelques 250 MW en France et en Corée du Sud.

Plus récemment, à partir du début des années 90 pour les premières fermes commerciales, l'éolien en mer constitue le marché le plus attractif des EMR, en particulier depuis l'accélération des investissements en 2005 : depuis on observe une croissance annuelle à deux chiffres, avec un investissement mondial qui atteint aujourd'hui l'ordre de 10 G€ / an, si on ne retient que les dépenses issues des nouvelles capacités installées.

D'autres segments des EMR font l'objet de projets de développement technologique importants, et représentent des leviers de croissance dans les 5 à 20 prochaines années, avec notamment l'hydrolien maritime, estuarien et fluvial, qui valorise tout comme le marémoteur les courants, et dont les concepts les plus avancés entrent progressivement en phase d'industrialisation et de pré-commercialisation.

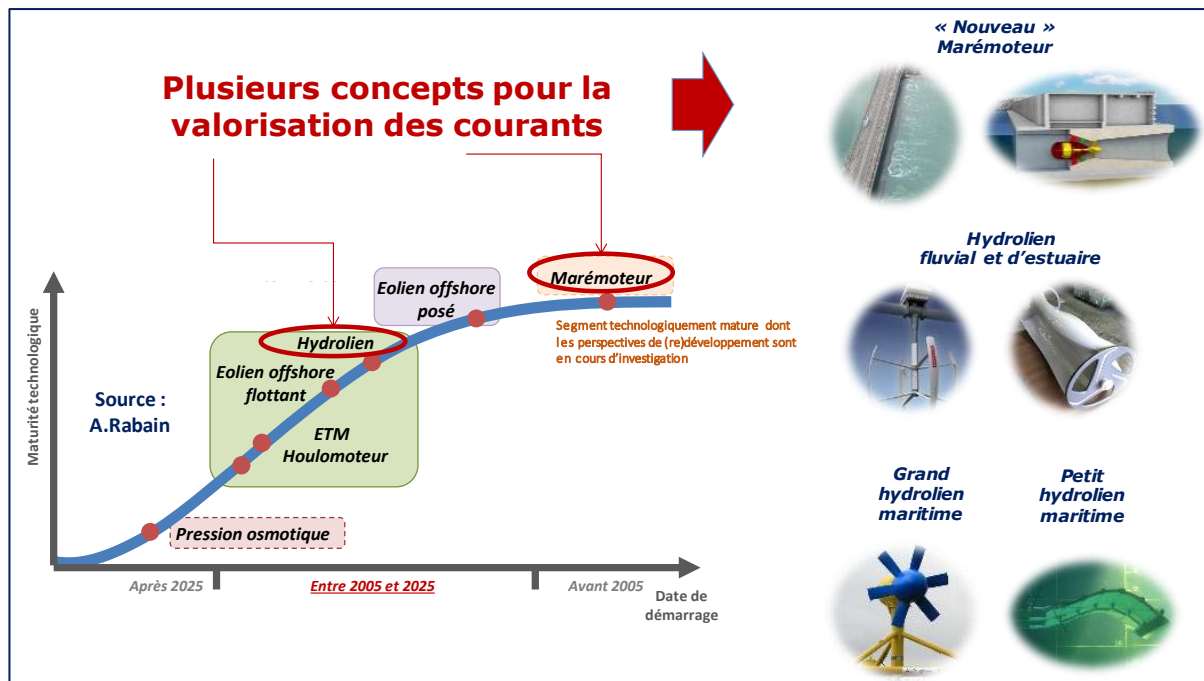


Figure 1 : Maturités échelonnées des différentes filières EMR - Source : Antoine Rabain

Compte tenu de la maturité des technologies et des perspectives de croissance des différents marchés des EMR à court et moyen termes, le marémoteur fait actuellement l'objet d'un regain d'intérêt, notamment en considérant les nouvelles architectures et types de projets de développement qui ont été analysés dans le cadre de ce GT.

1.2 Mandat du groupe de travail et contexte de ce document

Dans le prolongement du colloque « Energies Marines Renouvelables » EMR-2013 tenu à Brest les 9 et 10 octobre 2013, et organisé par la SHF en partenariat avec IFREMER, EDF, France-Energies-Marines, et l'ENSTA Bretagne, et dans un contexte d'inflexion forte en matière de politique énergétique nationale (cf. Loi sur la Transition Énergétique en débat actuellement au sein des instances législatives : Assemblée Nationale et Sénat), la SHF a engagé la constitution d'un Groupe de Travail (GT) national « Nouveau Marémoteur ».

L'objectif majeur de ce GT national est de définir les conditions de faisabilité Environnementale, Sociale, Technique et Economique de nouveaux aménagements marémoteurs en France, porteurs de nouveaux modèles de développement territorial.

En France, le regard porté sur l'énergie marémotrice est ambivalent : à la fois reconnaissance et même fierté de la réussite industrielle et pionnière de l'usine de la Rance ; et dans le même temps, le sentiment, malgré une ressource potentielle importante, que de nouveaux sites ne sont pas imaginables, notamment pour des questions socio-environnementales cependant mal définies. Cette perception ambivalente est retranscrite dans le rapport de la mission d'étude interministérielle sur les énergies marines renouvelables, publié en mars 2013. C'est pourquoi il est nécessaire de mettre à jour et partager les informations techniques et non techniques clés pour évaluer le possible développement de nouveaux projets marémoteurs en France, et les conditions de leur développement.

A ce titre, les travaux du GT ont abordé les questions suivantes :

1. Quel est le retour d'expérience complet et objectif de l'usine de la Rance, premier aménagement marémoteur mondial à taille industrielle : performance industrielle, impact environnemental et notamment sédimentaire, services non énergétiques de l'aménagement, etc...
2. Quels sont les impacts environnementaux défavorables du marémoteur ? Quelles solutions pour Eviter, Réduire ou Compenser ces impacts (principe E.R.C.) ? Quels sont les influences positives de tels aménagements sur l'Environnement, au sens large ?
3. Quelles sont les opportunités de services multi-usages d'un aménagement marémoteur :
 - protection côtière (érosion, lutte contre le risque inondation),
 - projet multi-énergies (projet intégrant l'éolien, le houlomoteur, ...),
 - infrastructures de transport,
 - développement de l'aquaculture,
 - développement d'un tourisme responsable,
 - développement d'une industrie locale, d'activités socio-culturelles et sportives,
 - etc. ...
4. Comment intégrer ces besoins et ces opportunités le plus en amont, dès la concertation et la conception initiale ?
5. Quelle est la réalité du potentiel marémoteur techniquement exploitable (PTE) ? Quels sont les critères de recherche de sites potentiels ?

6. Quels sont les développements technologiques nécessaires : conception digues (les digues représentent une part majoritaire des coûts d'investissement des projets) ; performance des machines ; amélioration du facteur de charge²; modes de fonctionnement.
7. Quel est le potentiel du concept de « Marélienne » (connexion d'un bassin marémoteur à la mer par des chenaux équipés d'hydroliennes) ?
8. Comment se positionne la France au regard des initiatives des autres pays : UK, Corée du Sud, Inde, ... Quels enseignements en tirer pour un développement en France ?

Le produit de sortie du GT est ce document, qui vise à la définition des conditions de développement d'un nouveau modèle territorial d'aménagement marémoteur.

Pour atteindre cet objectif, le GT a rassemblé des participants d'horizons variés, qui ont contribué à sa rédaction entre 2016 et 2018, sous le pilotage suivant :

- Pilotage global : Denis AELBRECHT du Centre d'Ingénierie Hydraulique (CIH) d'EDF,
- Conditions sociales et environnementales : Christophe LE VISAGE, Consultant (cabinet SML),
- Conditions socio-économiques : Antoine RABAIN, Ingénieur-Conseil et Président de Geckosphere,
- Conditions techniques : Luc DEROO, du bureau d'ingénierie ISL.

Michel PAILLARD et Jérôme LOYER, deux experts de référence dans le domaine des énergies marines renouvelables (EMR), ont accompagné la phase finale des travaux.

1.3 Liste des contributeurs

Pilotage général et relecture d'ensemble :

- Denis Aelbrecht (EDF Hydro)
- Michel Paillard (expert, ex. Chef de projet EMR à l'Ifremer)
- Jérôme Loyer (expert, ex. Veolia)

Conditions sociales et environnementales (parties 4 et 5 de ce document) : Christophe LE VISAGE, Consultant, avec l'appui notamment de :

- Jean-Paul Bouheret (EDF Hydro)
- Sébastien Ledoux (ARTELIA)
- Claire Le Renard (EDF R&D)
- Paul Leslie (Tidal Lagoon Power)
- Echanges au sein du GT EMR de l'UICN

² Le facteur de charge est le ratio entre l'énergie annuelle produite d'une part et l'énergie produite si l'installation produisait 100% du temps à 100% de la puissance installée d'autre part ; elle exprime un « taux d'utilisation à puissance maximale ».

Conditions socio-économiques (parties 2 et 7 de ce document) : Antoine RABAIN, Ingénieur-Conseil et Président de Geckosphere, avec l'appui de :

- Alain Clément (ECN-LHEEA)
- Romain Dausque (EDF Hydro)
- Vincent Delaleu (EDF R&D)
- Olivier Didry (EDF Hydro)
- Jean-François Filipot (France Energies Marines)
- Dominique Gagnaire (Tidal Lagoon Power)
- Jill Galland (Consultant énergie renouvelable)
- Dominique Godefroy (Ifremer, Président Parc Naturel Marin Côte d'Opale)
- David Havard (GE-Alstom Power Hydro)
- François Lempérière (Hydrocoop)
- Hassan Smaoui (Cerema)

Conditions techniques (parties 3 et 6 de ce document) : Luc DEROO, du bureau d'ingénierie ISL, avec l'appui de :

Pour les contributions principales au texte :

- Sophie Ancel (Artelia)
- Léo Breuilly (ISL)
- Christophe Cochet (EDF Hydro)
- François Lempérière (Hydrocoop)
- Antoine Libaux (EDF Hydro)
- Philippe Pépin (GE-Alstom Power Hydro)

Pour des contributions spécifiques :

- Claude Bessière (Ingérop)
- Nicolas Jestin (Bouygues)
- Stefan Kristukat (Andritz Hydro)
- Florence Lafon (EDF Hydro)
- Marc Leclerc (MJ2 Technologies)

2 L'ÉNERGIE DES MAREES : CHIFFRES-CLES

2.1 Panorama du marché mondial du marémoteur

2.1.1 Points méthodologiques

Afin de mener à bien l'analyse comparée des projets au niveau mondial, trois critères clés de premier ordre ont été retenus :

1. **La puissance nominale électrique des installations** plus ou moins matures, faisant apparaître des ouvrages importants de plusieurs centaines de MW installés (voire plusieurs milliers de MW à terme en intégrant les perspectives de projets actuellement en phase de développement), ou au contraire des ouvrages de moyennes ou petites dimensions, le plus souvent faisant référence à des projets de démonstration ;
2. **La production annuelle, permettant d'identifier les gammes de productibles** (ou facteur de charge) constatées ou visées dans les projets en opération ou annoncés ;
3. **La production cumulée depuis l'année de démarrage**, caractérisant ainsi l'expérience des porteurs de projets et la crédibilité des données valorisées par la suite dans l'analyse de l'économie des projets (retour d'expérience).

En outre, cette phase de diagnostic fondée sur des données en volume fait par la suite l'objet d'une analyse de la valeur des projets, faisant notamment ressortir les investissements réalisés sur ce marché, et plus généralement l'ensemble des unités d'œuvre nécessaires pour évaluer la réalité puis les conditions d'attractivité économique des projets (Capex, Opex, TRI, LCOE, ...).

2.1.2 Bilan de situation du marché mondial à fin 2016

Actuellement, nous identifions **cinq sites dans le monde** où une production électrique issue d'un ouvrage marémoteur est effective, totalisant ainsi :

- ✓ Une puissance installée globale de 517 MW
- ✓ Une production annuelle dépassant 1,1 TWh
 - Soit un productible moyen de 25% environ (correspondant à 2'125 heures de production à pleine puissance)
- ✓ Une production cumulée de l'ordre de 32 TWh depuis l'ouverture de la première installation en France il y a plus de 50 ans

Ces données relatives à la production électrique du marché marémoteur au niveau mondial, sont à mettre en perspective vis-à-vis d'autres filières EMR, à l'image de l'éolien offshore, qui représente depuis le début des années 2000 le marché des EMR le plus attractif : fin 2016, ce sont plus de 13 GW qui étaient en opération (majoritairement en Europe - 12'631 MW selon l'EWEA), correspondant à une production annuelle de l'ordre de 40 TWh, déjà sensiblement supérieure en une seule année à la production d'origine marémotrice cumulée depuis plusieurs décennies.



Figure 2 : Localisation des 5 projets en opération dans le monde – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

Parmi ces installations les plus abouties, trois d’entre elles se distinguent et peuvent être considérées comme des **projets commerciaux** et dotées d’une production significative et de retours d’expérience probants :

- **Le barrage de la Rance en France** est de loin le projet le plus ancien : il est doté d’une puissance électrique de 240 MW et d’une production annuelle constante, de l’ordre de 550 GWh. Sa production cumulée depuis son lancement en 1966 est évaluée à 27,5 TWh (soit plus de 85% de la production électrique cumulée au niveau mondial sur la période).
- **L’ouvrage situé à Sihwa, en Corée du Sud**, est le projet de grande ampleur le plus récent. Entrée en production en 2011, il est doté d’une puissance de 252 MW ; malgré des problématiques d’efficacité dans les opérations, sa production cumulée atteint environ 2,5 TWh, pour une production annuelle à peu près équivalente à celle de la Rance, et évalué à près de 490 GWh.

La Rance et Sihwa représentent de loin les deux ouvrages marémoteurs les plus importants au monde en termes de puissance et de production annuelle ou cumulée depuis leur inauguration. Selon ces trois critères clés, ils représentent systématiquement plus de 95% du marché mondial.

- Un troisième ouvrage, celui d’**Annapolis au Canada**, peut aussi être considéré comme un site de production parmi les plus importants au monde : sa taille est certes plus limitée que les deux premiers (sa puissance nominale est de l’ordre de 20 MW), mais elle doit être mise en regard de son ancienneté (démarrage en 1984) : ainsi sa contribution au niveau mondial selon les trois critères clés retenus varie entre 4 et 5%, ce qui reste significatif.

Si ces trois ouvrages (Rance, Sihwa, Annapolis) représentent la quasi-totalité de la puissance installée et de la production effective dans le monde actuellement, deux autres sites historiques sont à considérer de manière prioritaire dans l’analyse économique et stratégique des projets internationaux :

- La Russie a investi la filière depuis de nombreuses années, avec un premier ouvrage de petite dimension (0,4 MW) et dont la production a commencé seulement deux années après celle de la Rance (1968). Il a depuis été complété en 2006 par un second ouvrage de 1,5 MW environ, pour une puissance totale installée de près de 2 MW.
- De même, en Chine, les premières productions datent de 1980, avec un ouvrage de 1,1 MW, complété depuis par un second de 2,1 MW, totalisant ainsi une puissance installée de l'ordre de 3,2 MW. Le premier ouvrage a par la suite été rénové et depuis 2015 la puissance totale a atteint 4,1 MW.

Les données recueillies autour de ces projets de démonstration – et qui ne peuvent considérant leur taille être qualifiés de commerciaux – sont jugées moins robustes ; il ressort toutefois et a priori que les facteurs de charge sont du même ordre que ceux des projets commerciaux, voire meilleurs, au regard de la petitesse des installations.

NB : En Annexe à cette partie figure le détail des données qualifiées par les contributeurs directs du GT sur chacun des projets analysés ci-dessus.

2.1.3 Premières évaluations économiques sur les investissements

NB : Une analyse socio-économique approfondie est développée plus en aval de ce rapport, notamment sur le coût global de possession et les seuils d'attractivité des projets marémoteurs. A ce stade seuls des premiers éléments sur les investissements sont présentés et sont issus des retours d'expérience les plus probants.

Les trois ouvrages dit « commerciaux » - Rance, Sihwa, Annapolis - ont été retenus comme les seuls projets sur lesquels les contributeurs du GT ont considéré que les éléments d'ordre économique étaient suffisamment robustes pour être valorisés dans le cadre d'une analyse d'ensemble.

L'investissement cumulé associé à ces trois projets clés représentant aujourd'hui plus de 99% des volumes de marché au niveau mondial, a été estimé à près de 1.2 G€ (valeur actuelle).

Signalons un point important ici : cette donnée macro-économique intègre pour certains ouvrages comme celui de la Rance, l'investissement qu'a nécessité la construction d'une digue, alors que cette dernière pouvait être déjà présente ou financée dans d'autres projets tels que ceux de Sihwa ou d'Annapolis.

Sur ces trois seuls exemples, ces marqueurs économiques permettent d'ores et déjà de faire ressortir **le poids important du coût de la digue dans l'investissement global du projet**, lorsque celui-ci doit être comptabilisé.

- L'investissement de la Rance évalué à quelques 816 M€ (et considéré par les contributeurs du GT comme le plus fiable) ; ainsi le ratio en M€/MW atteint pour ce projet de 3,4, digue comprise.
- Hors digue, ceux de Sihwa et Annapolis atteignent respectivement 1,3 et 1,5, soit une moyenne de 1,4 M€/MW avec un faible écart type.

© SHF-GT Nouveau Marémoteur 2019	en M€/MW	Sihwa	Annapolis	moyenne		Sihwa	Annapolis	moyenne
Total Rance / étalonnage		3,4	3,4	3,4				
dont la digue		2,1	1,9	2,0		62%	55%	58%
dont l'électrotechnique		1,3	1,5	1,4		38%	45%	42%
Légende :		Données d'entrée						

Figure 3 : Mise en évidence du poids économique de la digue – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

Considérant des niveaux d'investissement du même ordre pour comparer ces trois projets, le coût de la digue représentent ainsi environ 2 M€/ MW, soit près de 60% du CAPEX global.

En synthèse, les analyses et valorisation des données qualifiées par les contributeurs du GT comme étant les plus pertinentes, ont permis d'asseoir une évaluation du CAPEX unitaire des projets en service selon ces deux segments de coûts (digue et partie électrotechnique, développement et installation inclus), et selon la taille des projets :

- D'au moins 4,5 M€ / MW pour les projets de tailles petite et moyenne (de quelques dizaines de MW jusqu'à 100 MW), nous identifions un premier repère de coûts sur les projets les plus matures, avec un ratio de l'ordre de 3,5 M€/MW pour des ouvrages dont la puissance installée électrique est de plusieurs centaines de MW, à l'image des nouveaux projets développés actuellement pour relancer la filière (Swansea Bay).
- L'effet d'échelle retenu par les contributeurs du GT permettent d'identifier un coût objectif de 2,5 M€/MW pour des ouvrages dépassant le GW installé, la digue représentant encore 60% de ce CAPEX global.

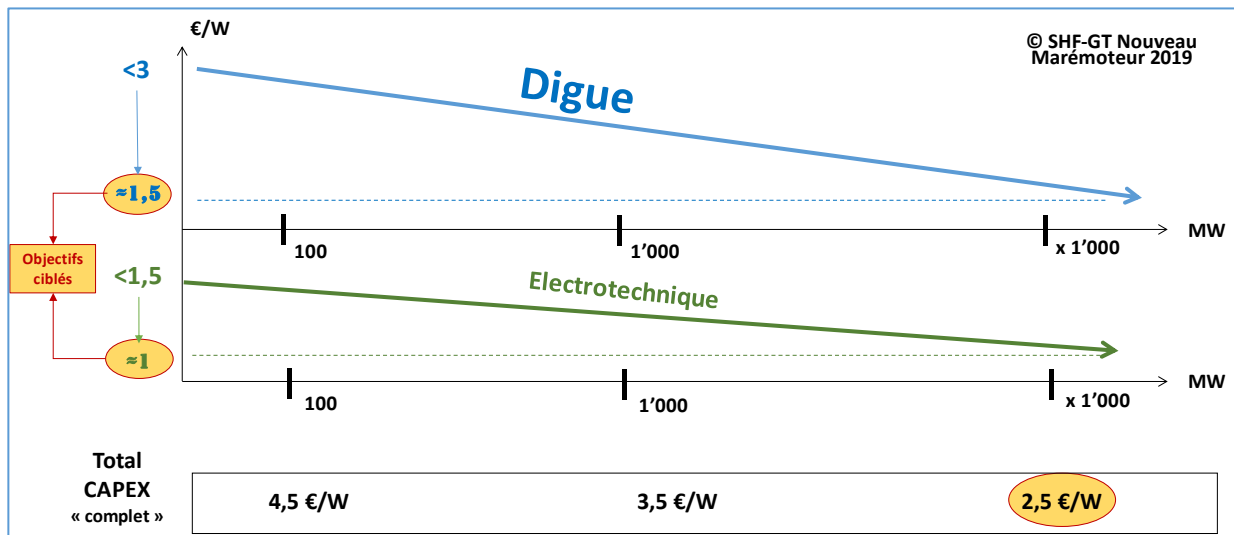


Figure 4 : Evolution des CAPEX selon 2 volets critiques et fonction de la taille des projets (sur la base du retour d'expérience) – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

NB1 : Le poids économique autour du coût de la digue est identifié comme l'un des leviers de baisse des coûts de l'électricité produite, notamment, au-delà des effets d'échelle ou des innovations concernant sa construction, par une ingénierie financière fondée sur les bénéfices apportés par de tels ouvrages sur d'autres activités que la seule production d'électricité (protection des côtes, mais pas seulement) ; ce point sera approfondi plus loin dans ce document (partie 7), afin d'identifier des

niveaux d'attractivité économique permettant d'anticiper un déploiement important de projets dans le monde dans les 10 à 20 prochaines années.

NB2 : Le chapitre 6.3 fournit des éléments permettant de prédéterminer plus précisément le coût d'un aménagement marémoteur en fonction de ses caractéristiques physiques.

2.2 Potentiel de marché et prospective à horizon 2030

2.2.1 De la nécessité de définir un potentiel techniquement exploitable ... pragmatique

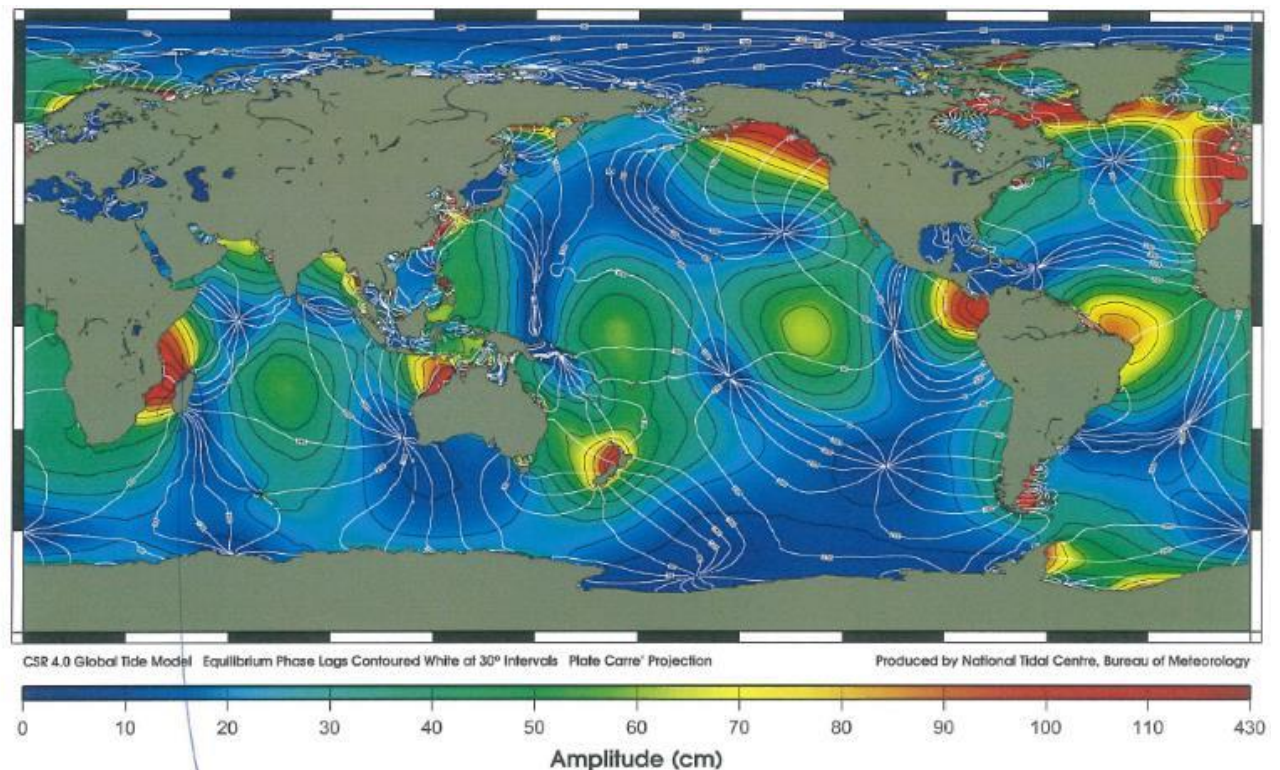


Figure 5 : Cartographie mondiale des gisements éligibles et des potentiels théoriques – Source : National Tidal Centre, Bureau of Meteorology

Note : le Potentiel Techniquement Exploitable sera nommé par la suite « PTE ».

Dans cette optique d'évaluer le potentiel de marché du marémoteur au niveau mondial, une première phase d'analyse a été initiée autour du référencement des potentiels théoriques ou de gisements « bruts » de production électrique par grandes zones géographiques. Ces derniers sont fondés sur les conditions météo-océaniques locales (marnage, vitesses des courants, espace disponible, ...), mais doivent ensuite être affinés en appréhendant notamment les performances des technologies marémotrices connues à ce jour et considérées dans la segmentation choisie (pour rappel : le marémoteur côtier, offshore, le marélien, mais hors fermes hydroliennes fluviales ou maritimes).

Dans ce sens, les acquis de l'état de l'art technique (productible et coûts d'un aménagement marémoteur – cf. partie 6) ont été utilisés pour caractériser la capacité à valoriser les ressources les

plus favorables de façon compatible avec les exigences technico-économiques du marché des énergies renouvelables au sens large, et ceci dans une vision prospective intégrant la dynamique d'innovation actuelle.

On citera ici à titre non exhaustif les principaux critères considérés :

- Compétitivité économique actuelle et future via l'évaluation dynamique du coût complet de production de l'électricité produite (LCOE – *levelized cost of energy*, en €/MWh)
- Maîtrise des risques sur l'ensemble du cycle de vie des projets (impact sur les exigences de rentabilité sur les capitaux investis, et donc sur le LCOE)
- Géographie des besoins énergétiques et de volonté de transition énergétique vs gisements les plus attractifs en termes de potentiel de production (MWh/an)
- Potentiel de contribution aux volumes de production appelés dans les 30 à 40 prochaines années dans les énergies renouvelables (MW – MWh/an)
- Acceptabilité sociale des projets de grande taille (susceptible de minimiser la multiplication de projets, y compris dans les zones les plus favorables)

L'objectif est de qualifier le potentiel de développement d'un marché pour par la suite élaborer des scénarii prospectifs. Plusieurs méthodologies peuvent être envisagées ; la plus robuste, retenue par les contributeurs du GT, repose sur une double approche convergente, avec :

- Une première démarche de type « top-down », fondée sur la qualification d'une partie des gisements bruts par des critères discriminants ou relatifs.
- Une seconde approche de type « bottom-up », par une analyse approfondie des projets développés et des intentions politiques affichées par une douzaine de pays clés.

Cette double approche a permis de confirmer les volumes de marchés considérés par la suite au sein d'un scénario de référence définissant le niveau de capacité installée et de production marémotrice mondiale à horizon 2035, cette perspective étant qualifiée par une évaluation du potentiel de réalisation probabilisé d'un « pipe » de projets en développement identifiés comme crédibles par le GT dans les 15 à 20 prochaines années.

Ainsi, la démarche consiste à :

- Evaluer le potentiel technique exploitable sur la base des considérations physiques uniquement (PTE brut)
- Eliminer les sites pour lesquels la rentabilité économique n'est pas acquise, et ne conserver que le potentiel technico économique exploitable Brut
- Eliminer les sites pour lesquels les conditions sociales et environnementales ne sont pas réunies, et ne conserver que le potentiel technico économique exploitable « pragmatique ». Potentiel désigné par l'acronyme PTE.

2.2.2 Qualification du potentiel du marémoteur au niveau mondial

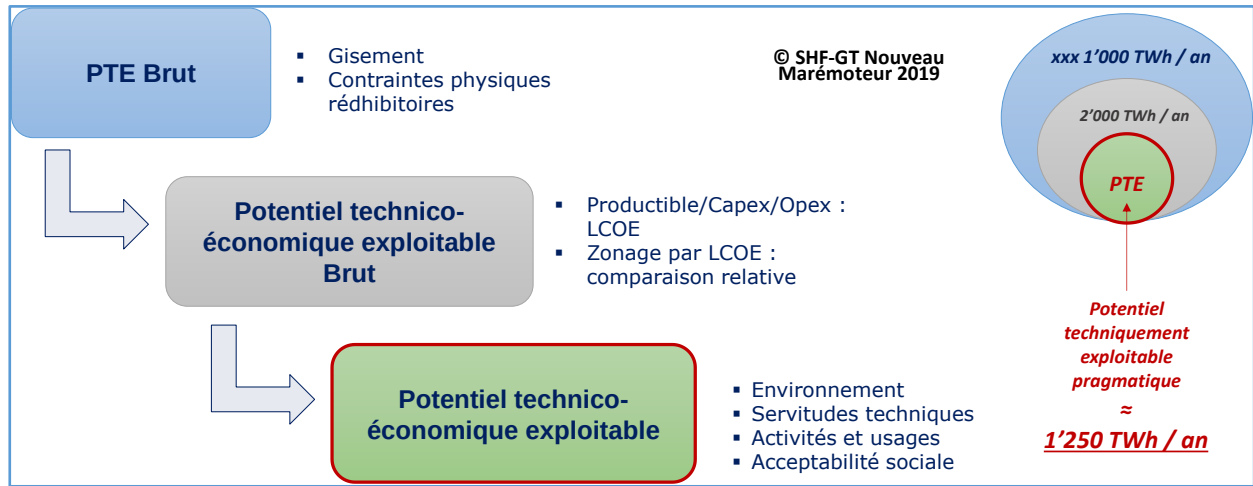


Figure 6 : Approche méthodologique pour évaluer le PTE du marémoteur au niveau mondial - Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

Au-delà des contraintes techniques ou juridiques, qui déjà peuvent évoluer en fonction des progrès technologiques ou de l'évolution du droit, ce sont davantage les éléments d'ordre économique et social qui ont pesé dans les **méthodes d'évaluation d'un PTE mondial** (Potentiel Technico-économique Exploitable).

Ce PTE représente ce que le GT marémoteur considère comme un volume de marché atteignable au regard du crible successifs des critères techniques, environnementaux & territoriaux et économiques, dans les 40 à 50 prochaines années, et permet *in fine* d'évaluer la contribution potentielle de la filière à la transition énergétique mondiale.

Le scénario « cible » du GT marémoteur retient un PTE de 1 250 TWh/an au niveau mondial, pour un potentiel théorique de l'ordre de 20 000 TWh/an.

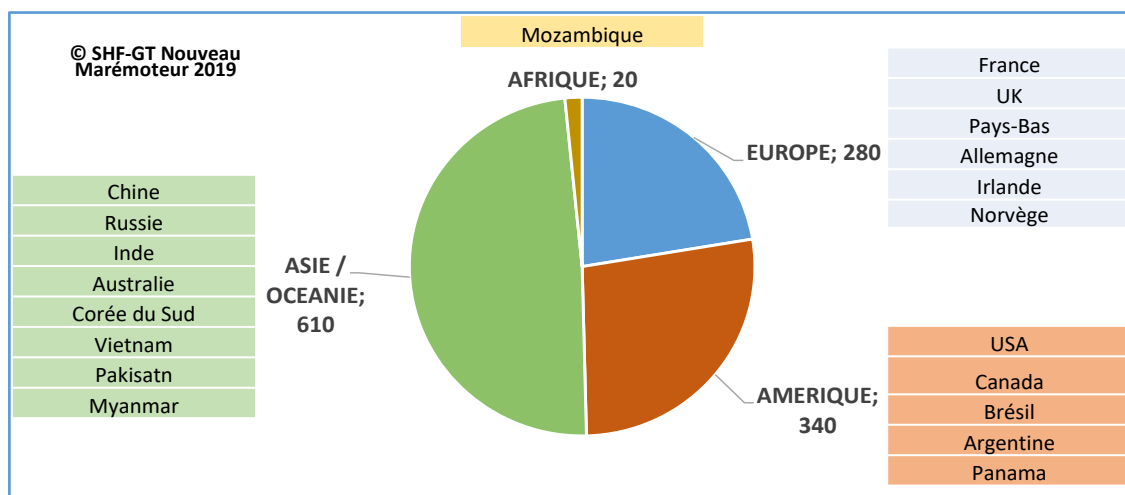


Figure 7 : Evaluation des PTE par grande zones géographiques via l'analyse des potentiels de 20 pays - Total : 1'250 TWh/an - Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

Cette première approche de type « top-down » permet d’anticiper, selon les repères connus aujourd’hui, ce qui pourrait être un objectif de long terme pour la contribution de la filière marémotrice à la transition énergétique mondiale.

Selon les trajectoires les plus consensuelles en termes d’évolution de la demande énergétique globale, ce PTE correspond à une contribution au mix électrique mondial à horizon 2050 de 3% à 4%, soit entre environ 15% et 20% du mix EMR – en faisant l’hypothèse d’une contribution au mix électrique mondial de 20% d’EMR à horizon 2050, toutes filières confondues (marémoteur, mais aussi éolien offshore posé et flottant ; hydrolien ; énergie thermique des mers ; houlomoteur ; ...).

2.2.3 Approfondissement de la dynamique de marché autour d’une douzaine de pays clés

Compte tenu des barrières et verrous de multiples natures provenant des considérations environnementales (partie 4) et d’usage (partie 5), le parti a été retenu d’approfondir l’analyse des perspectives de développement du marché par un référencement de données les plus complètes possibles autour des projets de développement d’un maximum de pays parmi les 20 pays identifiés plus haut, et ceci afin d’évaluer dans quelle mesure et de quel ordre la part du PTE mondial retenu pourra être valorisé dans une perspective de 15 à 20 ans, autrement d’ici à 2035.

L’analyse des projets en développement parmi les plus avancés et/ou les plus crédibles, a ainsi permis de rassembler des premiers éléments sur la dynamique des nouveaux projets en Europe et au-delà. L’évaluation de leur probabilité de réalisation dans les 15 à 20 ans a par la suite permis de dresser un panorama structuré d’une douzaine de pays considérés comme clés pour contribuer au redémarrage du marché mondial à court et moyen termes, avec une perspective à horizon 2035 et au-delà.

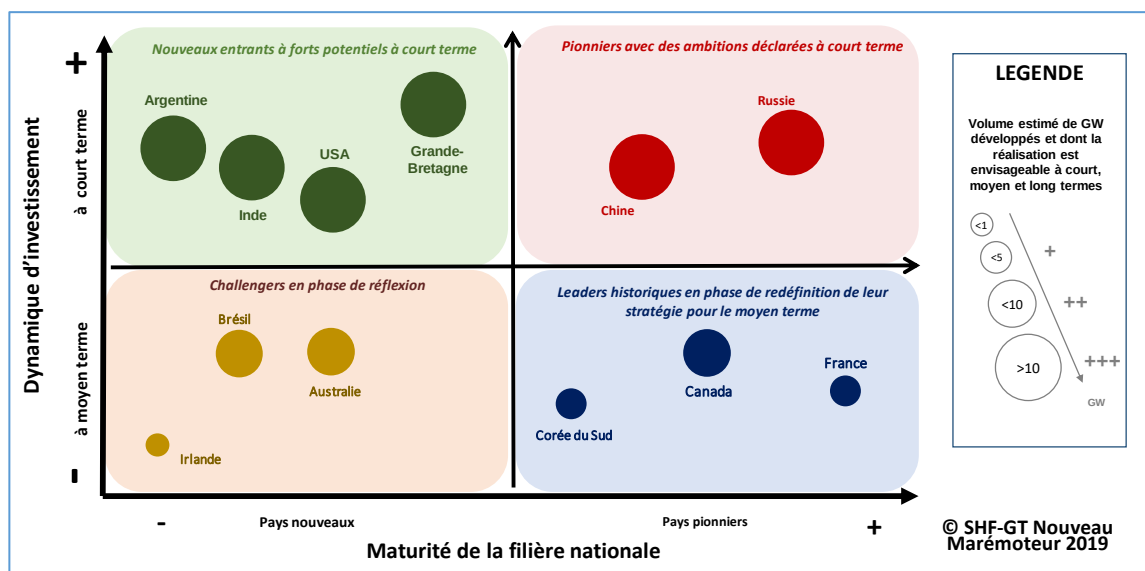


Figure 8 : Matrice des pays clés du marémoteur au niveau mondial - Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

On retient en particulier :

- Au sein des nouveaux entrants à forts potentiels : la Grande-Bretagne.
 - Le projet britannique de Swansea Bay aurait pu constituer un projet de reprise des investissements dans ce domaine ; le dimensionnement attendu correspond à une puissance installée qui pourrait dépasser les 300 MW, soit un investissement associé de l'ordre de 1 à 1.3 G€, doublant à lui seul l'investissement cumulé comptabilisé dans les 50 dernières années. Le soutien régional au projet est largement acquis. Un premier jalon avait été franchi dans ce sens en 2017 suite à l'audit positif réalisé par l'ancien Ministre de l'Energie Charles Hendry pour le compte du gouvernement. Toutefois, les conditions économiques du projet (prix du kWh) ont conduit en 2018 le gouvernement britannique à, pour l'instant, refuser son soutien au projet.
 - De même, on dénombre une multitude d'autres projets à l'étude plus ou moins avancés, dont par exemples :
 - Baie de Bristol, estuaire Severn (UK) : 5 à 6 projets de « Tidal Lagoon » côtiers
 - Façade Atlantique UK : études de projets Mersey, Solway, ...
- Au sein des pays historiques avec des intentions accessibles à court terme : la France, qui possède en termes de ressources un gisement particulièrement dense et attractif, avec un PTE de l'ordre de 50 à 200 TWh / an selon les scénarii étudiés.
 - Ce dernier est majoritairement structuré autour de quelques sites à très fort potentiels énergétiques, avec en particulier le Cotentin et Fécamp / Boulogne, où les marnages de premier ordre sont supérieurs en moyenne à 6 ou 7m.
 - Dans ce cadre particulièrement favorable au développement du marché, les technologies de turbines bulbes sont envisageables, tout autant que les systèmes de type marélien, éligibles en outre pour les sites de plus petite taille.
- D'autres pays ont pu être considérés dans l'analyse du marché mondial de façon privilégiée ; on retient notamment le Canada et son site stratégique de la Baie de Fundy, qui accueille de nombreux projets marémoteurs et hydroliens, sans toutefois faire clairement apparaître des niveaux d'investissements potentiels parmi les plus importants.

D'autres pays, dont les données ont été considérées comme moins fiables ou faisant simplement référence à des premières études amont (faisabilité, APS, ...), font toutefois apparaître des niveaux d'investissement potentiels importants (en volume) mais incertains (en probabilité) à terme, à l'image de l'Argentine, la Chine, l'Inde, la Russie, ou encore les USA.

Les autres pays considérés mais avec cependant des potentiels de projets moins avancés et / ou moins importants sont : Australie, Brésil, Corée du Sud, Irlande.

2.2.4 Synthèse du potentiel de marché accessible et prospective de marché

L'analyse des fondamentaux de chacun des 12 pays clés identifiés vis-à-vis des conditions de déploiement ou de redémarrage des investissements sur cette filière EMR, a été en dernier lieu couplée à l'évaluation de la maturité et des tailles de projets développés au niveau régional.

LEGENDE				Puissance (MW)	Production annuelle moyenne (MWh/an)	Facteur de charge (heures)	Facteur de charge (%)	Nombre de projets analysés
RANG	GW développés							
1	> 10	1	Argentine	31 645	63 670 000	2 012	23%	9
2	> 5	1	Russie	17 357	31 081 308	1 791	20%	7
3	> 1	1	Inde	15 621	28 380 000	1 817	21%	3
4	< 1	1	USA	15 284	38 070 436	2 491	28%	4
		1	UK	15 009	26 220 316	1 747	20%	7
		1	Chine	10 028	21 300 000	2 124	24%	8
		2	Australie	9 087	22 680 872	2 496	28%	7
		2	Canada	8 566	14 220 000	1 660	19%	3
		2	Brésil	5 873	13 894 436	2 366	27%	3
		3	France	3 639	7 480 436	2 056	23%	2
		3	Corée du Sud	1 480	2 750 000	1 858	21%	2
		4	Irlande	400	820 000	2 050	23%	1
© SHF-GT Nouveau Marémoteur 2019				133 990	270 567 804	2 019	23%	56

Figure 9 : 1^{er} traitement : bilan de l'analyse de données brutes de 56 projets identifiés dans le monde -
Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

Ainsi,

- Pour un PTE mondial estimé à 1'250 TWh/an et correspondant à un potentiel de marché à terme, le pipe des projets faisant l'objet d'un développement plus ou moins avancé, fait référence à une puissance cumulée de l'ordre de 135 GW, soit une production mondiale d'environ 270 TWh/an ; autrement dit un peu plus de 20% du PTE.
- La France, dans cette dynamique mondiale, pourrait accueillir plusieurs projets potentiels (entre 3 et 6 ont été considérés comme crédibles).

L'analyse de probabilité évaluant l'occurrence de voir effectives une partie des volumes de production ciblés d'ici à 2035, nous permet de **définir au nom du GT Marémoteur un scénario de référence** évaluant la production mondiale à cet horizon.

LEGENDE				Puissance probablisée (MW)	Production annuelle moyenne probablisée (MWh/an)
RANG	GW développés				
1	> 10	3	UK	4 503	7 866 095
2	> 5	3	Argentine	3 164	6 367 000
3	> 1	3	USA	3 057	7 614 087
4	< 1	3	Chine	2 006	4 260 000
		3	Russie	1 736	3 108 131
		3	Inde	1 562	2 838 000
		3	France	1 092	2 244 131
		4	Australie	909	2 268 087
		4	Canada	857	1 422 000
		4	Brésil	587	1 389 444
		4	Corée du Sud	444	825 000
		4	Irlande	80	164 000
© SHF-GT Nouveau Marémoteur 2019					
			Total	19 996	40 365 974

Figure 10 : 2nd traitement : bilan de l'analyse des volumes de production probablisées dans le monde - Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

En synthèse,

- Considérant la dynamique du marché actuelle et l'accélération des développements déjà initiés, ce sont d'ici à 2035 et dans une perspective prudente autour de 20 GW de nouveaux projets qui pourraient être développés.
- Cet objectif pragmatique est jugé raisonnable par le GT, et correspond à près de 15% des volumes de production cumulée issue du portefeuille de projets analysés dans les 12 pays clés, ou encore 3 % du PTE mondial.
- Face à cet objectif mondial, la France pourrait représenter une part non négligeable et de l'ordre de 5 à 10% autour de 1 à 2 projets structurants.

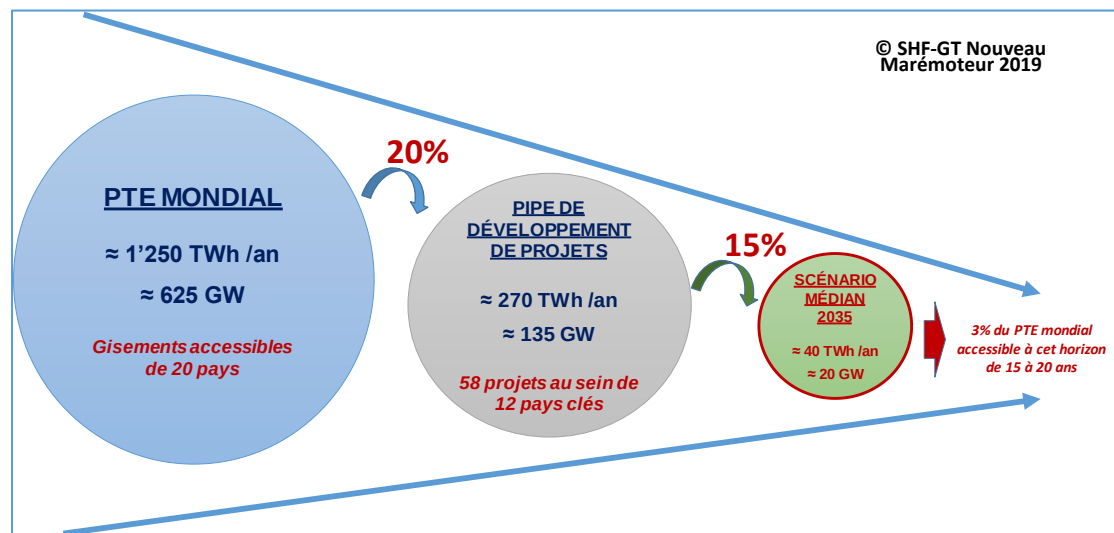


Figure 11 : Synthèse des chiffres clés entre le PTE et la prospective à horizon 2035 - Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

2.3 Annexe : Tableau de données qualifiées sur les projets les plus avancés au monde

Informations générales					Données volumes					Données valeur		
Nom projet	Segment	Pays d'implantation	Nature du projet	Année de démarrage	Puissance (MW)	Production annuelle moyenne (MWh/an)	Facteur de charge (heures)	Facteur de charge (%)	Production cumulée entre démarrage et 31/12/2016 (MWh)	CAPEX effectif (M€_valeur 2016)	CAPEX commentaires	CAPEX (M€/MW)
La Rance	Grand marémoteur	France	Production commerciale	1966	240	550 000	2 292	26%	27 500 000	816	Totalité ouvrage	3,40
	Grand marémoteur	Corée du Sud	Production commerciale	2011	252	490 875	1 948	22%	2 454 375	326	sans digue	1,29
Annapolis	Moyen marémoteur	Canada	Production commerciale	1984	20	45 000	2 250	26%	1 440 000	31	sans digue	1,53
Jiangxi 1G	Petit marémoteur	Chine	Démonstrateur	1980	1,1	3 000	2 727	31%	108 000			
Jiangxi 2G	Petit marémoteur	Chine	Démonstrateur	2007	2,1	6 500	3 095	35%	58 500			
Kislaya Guba 1G	Petit marémoteur	Russie	Démonstrateur	1968	0,4	1 200	3 000	34%	57 600			
Kislaya Guba 2G	Petit marémoteur	Russie	Démonstrateur	2006	1,5	2 000	3 000	34%	20 000			
					517	1 098 575	2 124	24%	31 638 475	1 173		2,1

A noter que ces données sont issues d'un travail de collecte et de qualification réalisé en séance de travail par les contributeurs du GT

Figure 12 : Données qualifiées par les contributeurs du GT sur les projets les plus avancés au monde - Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

3 L'ÉNERGIE MAREMOTRICE : PRINCIPES TECHNIQUES

3.1 L'énergie des marées, comment ça marche ?

Les mouvements gravitationnels de la lune et du soleil relativement à notre planète Terre engendrent des ondes à la surface des mers et des océans (on parle des ondes M1, M2, S1, S2), et des mouvements oscillants de masse d'eau, pouvant localement être perturbés et amplifiés par différents phénomènes :

- réflexion des ondes sur les côtes – ex. onde de marée dans la Manche et réflexion contre le littoral Ouest du Cotentin
- résonance dans des « bassins » de taille caractéristique – ex. le « bassin » de la Manche
- gonflement des ondes dû à la remontée des fonds marins – ex. La Baie de Fundy au Canada

Ces mouvements se concrétisent par des variations périodiques plus ou moins importantes des niveaux et des courants associés, selon des cycles diurnes ou semi-diurnes (cycles pleine et basse mer), et selon des cycles saisonniers lunaires (morte-eau et vive-eau) et même solaires-lunaires, liées aux positions relatives de la lune et du soleil (on parle de syzygies – cycle du Saros 18 ans 2/3 <https://fr.wikipedia.org/wiki/Saros>).

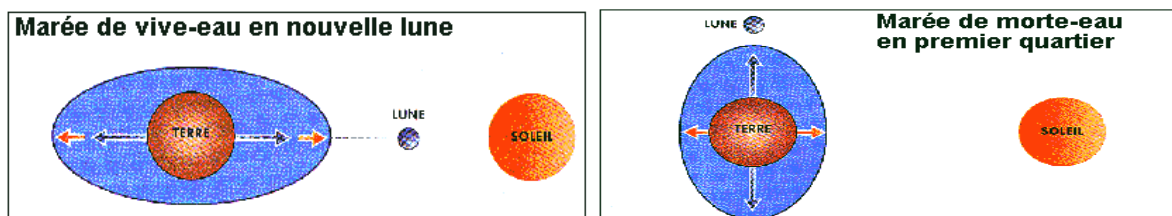


Figure 13 : Illustration des situations de marée

L'exploitation de l'énergie des marées repose :

- soit sur l'utilisation de l'énergie *potentielle* mobilisée par le stockage temporaire des masses d'eau dans un bassin : c'est le principe de l'énergie marémotrice
- soit sur l'utilisation directe de l'énergie *cinétique* portée par les courants de marée : c'est le principe des turbines hydroliennes en mer ouverte

Le présent document concerne les centrales marémotrices utilisant l'énergie potentielle, et donc basées sur des bassins clos par une digue et utilisant la dénivelée créée par cette digue entre mer et bassin. Il s'applique donc aux « Tidal Lagoons » étudiés en Grande-Bretagne et aux Maréliennes (Tidal Gardens), qui exploitent les courants de vidage des bassins, mais il ne concerne pas les hydroliennes en site ouvert naturel, qui exploitent directement l'énergie cinétique des courants associés à la marée.

Pour ces systèmes, l'énergie peut être extraite sur une seule partie (en général descendante) du cycle pleine-mer / basse-mer – on parle de simple effet (ou « simple action »), ou sur les parties montantes et descendantes du cycle – on parle alors de double effet (ou « double action »)

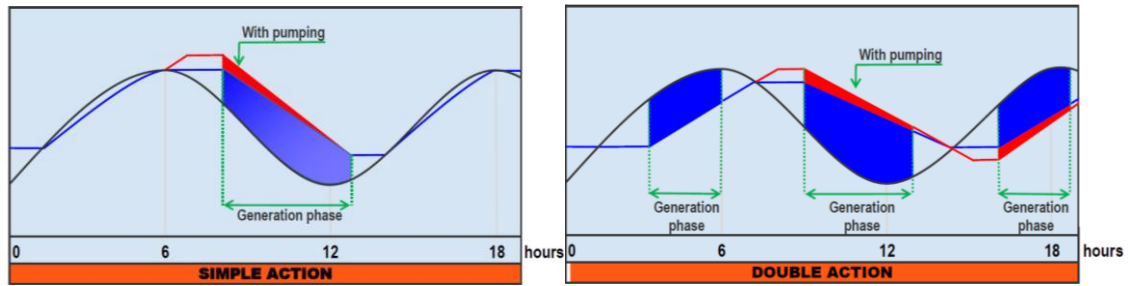


Figure 14 : Cycles d'utilisation de l'énergie potentielle des marées en bassin

La production d'énergie provient d'un décalage temporel de la cote en mer et de la cote dans le bassin, décalage induit par une modification du signal de marée dans le bassin par rapport au signal de marée en pleine mer. Le mode de fonctionnement, et donc le choix du signal de marée dans le bassin, résulte de la combinaison :

- d'une optimisation énergétique,
- du respect d'objectifs environnementaux, se traduisant en contraintes/limitations de cotes (min/max), de gradients de niveaux, de durées des étales, ...

L'énergie des marées est totalement renouvelable (cette énergie ainsi captée est sinon dissipée dans l'océan ou sur les côtes), et totalement prédictible comme le mouvement des corps célestes qui en sont à l'origine. Les solutions techniques de base (digues, turbines) sont industriellement matures.

3.2 Typologie d'aménagements : la configuration des bassins

Un aménagement marémoteur nécessite de créer un ou plusieurs « bassins », séparés de la mer par des digues. Ces bassins peuvent trouver des configurations variées.

3.2.1 Bassins d'estuaire

On appelle « bassins d'estuaires » les bassins essentiellement limités à l'estuaire lui-même.

Les bassins d'estuaire s'inscrivent dans la tradition historique des moulins à marée. Ils profitent d'une configuration topographique optimale : un grand bassin fermé par une digue courte en eaux peu profondes.



Figure 15 : deux bassins d'estuaires ; le moulin à marée de l'île d'Arz et l'usine de la Rance

La référence usuelle est la Rance. Le projet Mersey (Liverpool) est similaire, avec un estuaire 2,5 fois plus vaste.

L'avantage est l'économie de digue, l'inconvénient un problème d'environnement délicat, compte-tenu de la richesse écologique des estuaires, et en raison du fait que le fonctionnement de l'aménagement modifie la salinité des eaux dans le bassin, perturbe le transit sédimentaire et perturbe les écosystèmes par le barrage que constitue de fait la digue.

Le potentiel en France est limité.

3.2.2 Bassins offshore

Les sites offshore sont constitués de bassins fermés, en pleine mer. L'illustration ci-dessous correspond au cas d'un double bassin.

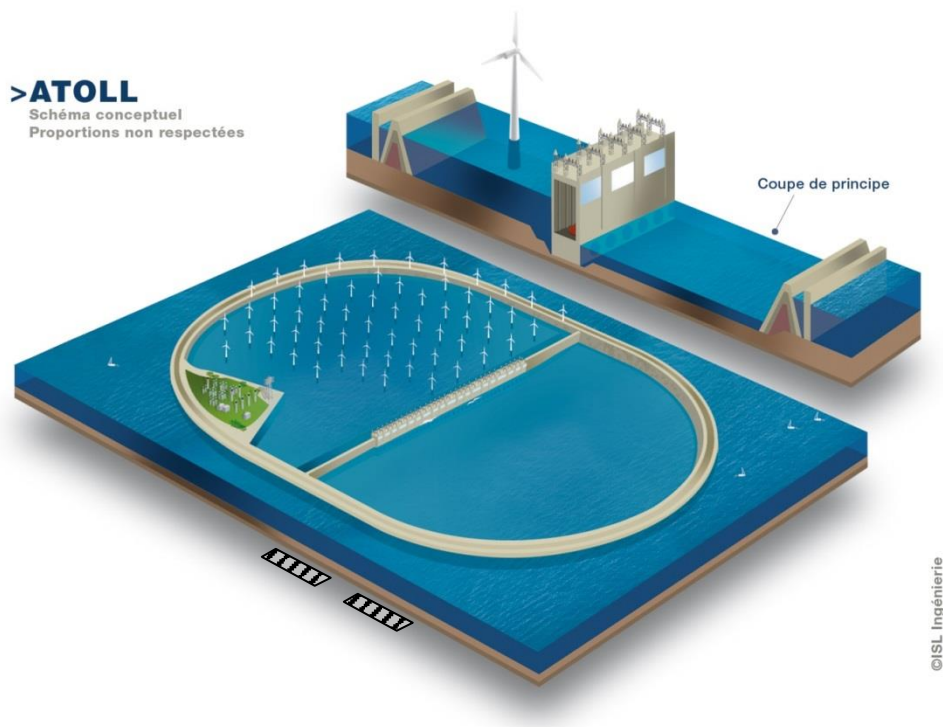


Figure 16 : Schéma conceptuel d'un bassin offshore - Source : ISL Ingénierie

Ces projets ont l'avantage d'avoir peu d'impact à la côte, à condition d'être assez éloignés de celle-ci. Ils ont l'inconvénient d'un coût élevé des digues par GWh, à la fois du fait de leur longueur, et de la profondeur des zones où elles sont implantées ; les études EDF de 2007 (Maréol) ont montré que ce coût est probablement prohibitif sauf peut-être pour des bassins de centaines de km² de l'ordre de 15 ou 20 km de diamètre.

Il existe peu de tels grands sites envisageables en raison de la topographie des fonds marins ; ces sites envisageables représentent au total moins de 10% du potentiel français et leur taille (donc le coût d'investissement associé) ne permet pas d'envisager une réalisation à court ou moyen terme.

3.2.3 Bassins côtiers

Les bassins côtiers sont adossés à la côte, sans être spécifiquement adossés à un estuaire. C'est par exemple le cas du projet de Swansea Bay Lagoon, illustré ci-dessous. L'avantage essentiel par rapport aux bassins d'estuaire est environnemental : le bassin côtier peut être développé dans un site moins sensible qu'en estuaire.



Figure 17 : Implantation envisagée pour le projet Swansea Bay

Une dizaine de sites côtiers sont à l'étude en Corée (sites d'environ 1 TWh) et en Grande-Bretagne, notamment à Swansea pour 0,5 TWh et Cardiff pour environ 4 TWh. Ces sites ont des marées moyennes de 6 à 8 m, des surfaces de 10 à 100 km².

En France, l'examen croisé des cartes des fonds marins et des hauteurs de marée indique que l'on peut physiquement envisager une quinzaine de sites côtiers comparables de 0,2 à 2 TWh/an sur plus de 500 km depuis Boulogne jusqu'à la Gironde. L'emprise d'un site à la côte peut être de l'ordre d'une dizaine de km, la distance des digues à la côte voisine de 5 km avec généralement des profondeurs sous digues de l'ordre de 10 m sous les basses mers. Ils peuvent en général exclure les estuaires.

Il est généralement préférable de maintenir à la côte des amplitudes de marée proches des amplitudes naturelles mais c'est peut-être moins impératif que pour les très grands sites et l'exemple de Sihwa montre qu'on peut préférer parfois modifier cette amplitude pour des raisons d'impact écologique ou économique.

3.2.4 Bassins côtiers de grande dimension

Dans la plupart des cas, là où un bassin côtier peut être physiquement implanté, les fonds marins sont tels qu'un bassin côtier de très grande envergure peut également être envisagé. Ces très grands sites, une petite dizaine, concentrent la majeure partie du potentiel français, avec des bassins de 500 à 1.000 km². Ils présentent trois avantages :

- Un coût au MWh réduit par une longueur de digue relativement faible (de l'ordre de 0,1 km par km² de bassin) et par l'effet de série.

- Une faible visibilité, les digues étant à 15 ou 20 km de la côte (donc en pratique invisibles), les retours à terre très espacés avec un grand choix possible de leur implantation.
- Des opportunités d'utilisation complémentaire de ces très grands bassins à l'abri des tempêtes et des hautes eaux exceptionnelles (protection de la côte, éolien, STEPs, ...).

Le schéma ci-dessous illustre un bassin côtier de grande taille. Ce schéma intègre des particularités qui ne sont pas nécessairement communes à tous les projets : production par chenaux de maréliennes, implantation d'une STEP et d'éoliennes à l'intérieur du bassin.

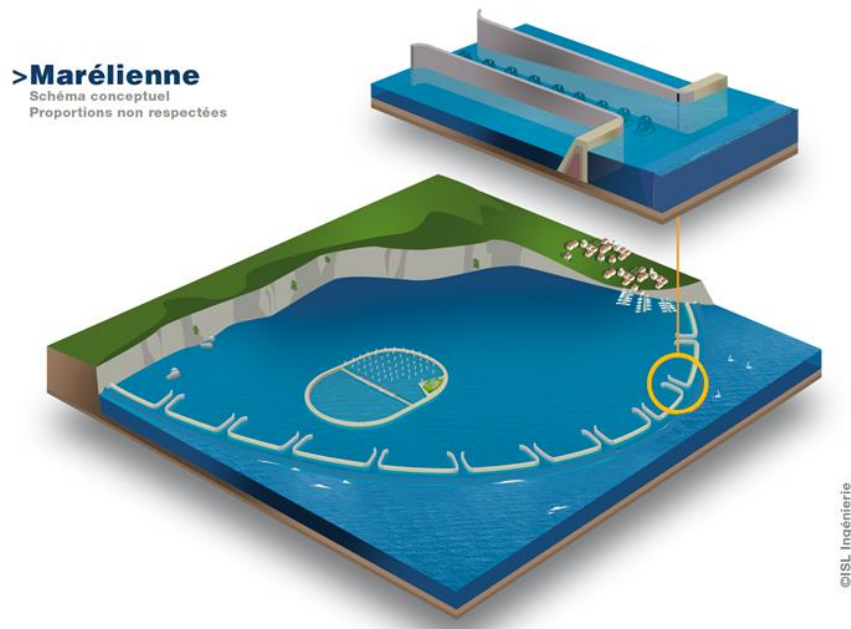


Figure 18 : Schéma conceptuel pour un bassin côtier de grande taille, équipé en marélienne - Source : ISL Ingénierie

Parmi les facteurs qui peuvent influencer sur l'acceptation de ces sites, il peut être avantageux de privilégier ceux pour lesquels :

- la gestion permet de garder sur les grandes emprises à la côte une forme et une amplitude des marées proches des marées naturelles ; ce qui réduira l'impact sur les estuaires inclus,
- ils sont également valorisés pour d'autres effets positifs d'aménagement du territoire, par exemple protection contre les submersions marines, les tempêtes et l'érosion du trait de côte, aménagement touristique ou industriel, aquaculture, éoliennes, STEPs...

Le problème essentiel de ces bassins est l'investissement unitaire très important, à l'échelle de celui des investissements nucléaires ; il est peu probable que des investissements aussi lourds soient envisagés sans réalisation préalable de projets plus petits, qui produiront un MWh plus cher. .

Les études de détail correspondantes ne sont pas urgentes mais il peut être intéressant de préciser le potentiel et d'analyser dès à présent l'importance des impacts environnementaux et socio-économiques et des opportunités offertes : il n'est pas exclu que le bilan soit plus positif que négatif et que ces ouvrages soient moins contestés que les alternatives de même capacité de production électrique.

Quatre études préliminaires de sites de cette importance ont été faites : la Severn, site d'estuaire contesté notamment pour un changement important de l'emprise des marées à l'intérieur de l'estuaire, Kalpasar en Inde, Mezen près de la Mer Blanche basé sur les turbines russes à axe vertical et les études GEDEM en France par EDF vers 1980 orientées sur la garantie de puissance et le stockage d'énergie plus que sur la production maximale. Toutes ces études correspondent à des sites de l'ordre de 20 TWh, trop importants pour une réalisation proche.

3.2.5 Petits sites ou sites de démonstration

3.2.5.1 Petits sites

Dans le cas où des concepts ou des équipements novateurs sont utilisés, il pourrait être nécessaire de commencer par des sites plus petits, donc moins économiques.

Dans le cas d'ouvrages à construire entièrement, et pour que l'économie des projets reste favorable, il faut envisager des bassins d'environ un ou plusieurs km², une puissance de quelques dizaines de MW, un investissement de 100 ou 200 millions d'euros.

Quelques sites abrités (rades, baies, ...) sont peut-être favorables tels que Boulogne, Le Crotoy, Cherbourg, la Rade de Brest, ...

3.2.5.2 Bassins existants

Il est tentant de vouloir profiter de bassins existants, pour d'une part limiter les coûts d'investissement et d'autre part limiter les incidences environnementales. De tels bassins existent : lagunes fermées, bassins portuaires.

Ce souhait peut se heurter cependant à divers obstacles, notamment :

- Les bassins existants sont souvent déjà gérés avec des contraintes de côtes et de variations de niveaux incompatibles avec une utilisation marémotrice,
- Les incidences du changement éventuel de salinité doivent être examinées.

Certaines infrastructures peuvent cependant se prêter à des aménagements complémentaires, notamment les infrastructures de protection des côtes. C'est par exemple le cas des bassins fermés par des barrières de protection contre les submersions marines : aux Pays-Bas, une des passes de la barrière Oosterschelde (photographie ci-dessous) a été équipée récemment avec un groupe de turbines totalisant 1,2 MW.



Figure 19 : barrière Oosterschelde (PB) récemment équipé d'un groupe de turbines expérimental

Pour la France, où il n'existe pas encore de grandes infrastructures de protection des côtes, cette piste de l'équipement de bassins existants est probablement limitée à la recherche de sites de démonstration.

3.3 Energie envisageable - Puissance installée

La hauteur des marées et la superficie des bassins déterminent le potentiel énergétique.

3.3.1 Energie envisageable

L'énergie envisageable pour un aménagement marémoteur est exprimée ici en GWh/an en fonction de la surface S des bassins en km^2 et d'amplitude moyenne³ de la marée (haute mer – basse mer, pour un coefficient 70) H_m en m, sous certaines hypothèses simplificatrices⁴.

L'énergie potentielle théorique est voisine de $2 S H_m^2$. Ce résultat correspond à un turbinage théorique double sens, avec remplissage et vidange « instantanés » du bassin aux moments des basse mer et pleine mer. Le volume d'eau moyen utilisé à chaque demi-cycle de 6h est alors $S H_m$, sous une charge moyenne de $0,5 H_m$.

Le retour d'expérience montre qu'il est difficile de produire en réalité plus de $1 S H_m^2$ (c'est la cible du projet Swansea Bay Tidal Lagoon) et montre que la rentabilité des projets est généralement médiocre en dessous de $0,5 S H_m^2$.

³ Dans tout ce document, H_m = marnage moyen = marée moyenne = amplitude moyenne de la marée = haute mer – basse mer pour les conditions de marée moyenne, coefficient 70.

⁴ Notamment : superficie du bassin indépendante de la hauteur d'eau ; non prise en compte des effets de courants d'approche et des courants dans le bassin.

Pour une valeur habituelle de $0,8 \text{ S Hm}^2$, la production annuelle par km^2 est donc :

pour $\text{Hm} = 7 \text{ m}$	environ	40 GWh/ km^2
$\text{Hm} = 5 \text{ m}$	environ	20 GWh/ km^2
$\text{Hm} = 3,5 \text{ m}$	environ	10 GWh/ km^2

En France, Hm dépasse 7 m entre Saint-Brieuc et Flamanville, est de 5 à 6 m de Fécamp à Boulogne, de l'ordre de 4 m en face du Calvados, autour de la Bretagne et entre Loire et Gironde, moins de 3 m au sud de la Gironde.

En première approximation, le volume d'eau utilisé en 12 heures en marée moyenne peut être voisin de $2 \times 0,9 = 1,8 \text{ Hm S}$, la charge maximale de $0,8 \text{ Hm}$, la charge moyenne de $0,45 \text{ Hm}$.

3.3.1.1 Ordre de grandeur du potentiel techniquement envisageable en France

Le potentiel techniquement envisageable (PTE brut au sens du §2.2.1) peut s'évaluer très sommairement en limitant les bassins aux zones où la profondeur sous les basses mers n'est pas excessive pour les digues (de l'ordre de 20 à 30 m) et de préférence une dizaine de m. C'est en général le cas jusqu'à une vingtaine de km de la côte, mais plus près pour une grande partie de la Bretagne. Les études peuvent donc porter sur près de 10.000 km^2 avec une amplitude moyenne de l'ordre de 5 m, donc sur des centaines de TWh/an.

3.3.1.2 Puissance installée

Par définition, la puissance brute est le produit $P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot \text{Hm}_{\text{max}}$, où Q est le débit d'équipement (m^3/s) et Hm_{max} la plus grande dénivelée turbinable entre mer et bassin (m).

La puissance installée, en MW, est la puissance brute, diminuée des pertes hydrauliques, mécaniques et électriques.

Le ratio Energie annuelle moyenne / Puissance installée s'exprime en heures, et correspond au nombre annuel théorique d'heures de fonctionnement à pleine puissance. Ce nombre d'heures, divisé par 8760 (nombre d'heures dans une année) correspond au facteur de charge, en %. Celui-ci n'excède pas 35 à 40 %.

Pour un même bassin marémoteur, plusieurs équipements peuvent être envisagés, avec des débits d'équipement, et donc des puissances différentes ; avec également des modes d'exploitation et des facteurs de charge différents. Le § 3.3.2 décrit plusieurs modes d'exploitation possibles.

3.3.2 Fonctionnement hydraulique d'un bassin marémoteur simple en marée moyenne

3.3.2.1 Rappel sur la définition des marées-types

Le SHOM définit 5 marées-types et leur associe des coefficients.

Ces marées-types sont les suivantes :

- Marée de Vive-Eau Exceptionnelle (VEE – coef. 120),
- Marée de Vive-Eau Moyenne (VEM – coef. 95),
- Marée Moyenne (MM – coef. 70),

- Marée de Morte-Eau Moyenne (MEM – coef. 45),
- Marée de Morte-Eau Exceptionnelle (MEE – coef. 20).

On peut calculer par interpolation le marnage associé à chaque coefficient entre 20 et 120 .

3.3.2.2 Notions

Les différents modes de fonctionnement hydraulique d'un ouvrage marémoteur simple doivent s'adapter à la variabilité du marnage des marées, des vives eaux aux mortes eaux.

Le fonctionnement d'une centrale marémotrice se caractérise par une succession de phases :

- Étale
- Vidage
- (Éventuellement) sur-vidage⁵
- Étale
- Remplissage
- (Éventuellement) sur-remplissage
- Étale

La succession de ces phases peut maximiser l'énergie sous les contraintes de l'exploitation future, en prenant en compte les spécificités d'un site (courbe de capacité, profil des marées).

Les transferts de volume sont assurés par :

- Les turbines en marche couplée au réseau, en mode turbinage ou pompage (mode énergétique).
- Les turbines en mode orifice (non couplée) et les vannes.

Afin de maximiser l'énergie produite à chaque cycle, l'objectif est de maximiser le volume échangé entre mer et bassin. C'est pourquoi, il est rentable de sur-remplir, éventuellement sur-vider, grâce au pompage.

En fonction des coefficients de marée, l'optimisation énergétique peut alterner les cycles de simple et double effet, et décider de l'intérêt de sur-remplir ou sur-vider par pompage.

- Simple effet ou sens unique :
 - remplissage non énergétique du bassin en marée montante et vidage par turbinage du bassin en marée descendante ; les turbines ne produisent alors que dans un seul sens,
 - ou l'inverse, remplissage énergétique (Siwha TPP) et vidage non énergétique.
- Double effet ou double sens, les turbines pouvant fonctionner dans les deux sens : remplissage et vidage.

⁵ « sur-vidage » (et, par analogie mais dans l'autre sens, « sur-remplissage ») : le principe est de pomper de l'eau en fin du vidage, hors du bassin, lorsque la mer est basse, ce qui exige peu d'énergie au pompage car le dénivelé est faible. Puis, quelques heures après, on remplit le volume ainsi libéré lorsque la mer est haute, donc avec un dénivelé important : le différentiel énergie récupérée au turbinage - énergie consommée au pompage est important. Cf. §3.6.2.

La question des modes de fonctionnement et des sens d'écoulement produisant de l'énergie est essentiellement liée à des facteurs physiques, techniques et environnementaux :

- La courbe d'évolution de la superficie en fonction du niveau d'eau dans le bassin.
- Les éventuelles contraintes de niveau dans le bassin (maximum, minimum).
- La conception des turbines (symétrie, réversibilité).
- L'ensemble des facteurs et contraintes d'environnement qui déterminent les modes d'exploitation.

Par exemple, dans le cas de La Rance, la surface du bassin (et donc le volume emmagasiné pour une variation de hauteur de 1 m) varie d'un facteur 6 entre niveau minimum et maximum d'exploitation. Les grands volumes d'eau emmagasinés, synonymes d'énergie disponible, se trouvent donc à retenue haute. Or, lorsque les coefficients de marée sont modestes (95 et en-dessous), ces cotes hautes ne sont pas naturellement atteintes : d'où l'intérêt alors de sur-remplir..

La figure ci-dessous illustre le fonctionnement à double sens de l'usine de la Rance (source : EDF), avec les différentes phases d'échanges hydrauliques. Davantage de détails sont donnés au §3.6.

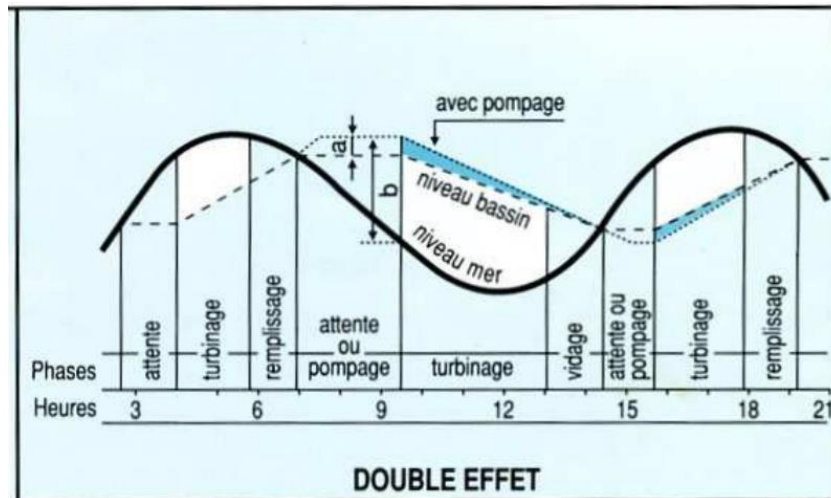


Figure 20 : Fonctionnement typique de l'usine de La Rance

Le fonctionnement hydraulique choisi a une incidence sur l'énergie produite.

Pour une configuration donnée, c'est-à-dire amplitude de marée et superficie de bassin fixés, la production théorique maximale d'énergie est obtenue avec une installation du plus grand débit d'équipement possible : les durées de turbinage sont réduites au minimum, et se font lorsque les écarts de niveaux entre mer et bassins sont au maximum.

Cette production d'énergie maximale n'est cependant pas la configuration optimale :

- Puisqu'il faut faire passer de grands débits, le coût de l'usine est très élevé,
- A l'intérieur du bassin, le cycle de marée est fortement perturbé : remplissage et vidange sont très rapides (forts gradients de montée et baisse des eaux), et séparés par des phases longues d'attente.

3.4 Principaux types de fonctionnement

Quatre principes de fonctionnement typique sont décrits dans ce document.

	Mode de fonctionnement	Exemple type
A	Opération dans un seul sens	Sihwa ; moulins à marée ; Rance
B	Opération dans les deux sens, sous chute élevée	Rance
C	Opération dans les deux sens, sous charge moyenne	Maréliennes
D	Opération dans les deux sens, au fil de l'eau	Maréliennes sans vannes

La description est simplifiée : elle est faite pour la seule marée moyenne.

3.4.1 Type A - Opération dans un seul sens

Ce mode de fonctionnement est décrit par la figure ci-dessous. La figure décrit :

- Les niveaux en mer (en noir) et dans le bassin (en rouge) pour un cycle moyen de marée
- La production associée

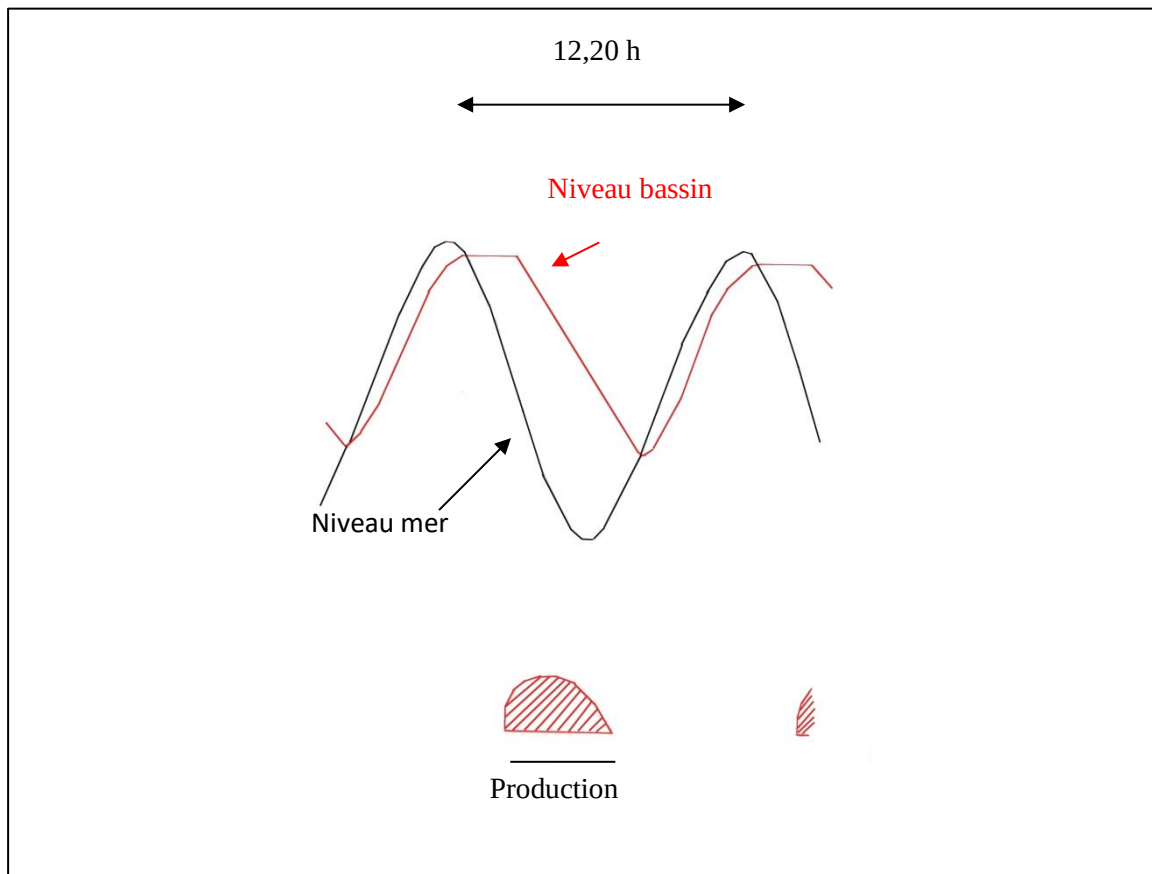


Figure 21 : Option A, pour la marée moyenne. Illustration des niveaux respectifs en mer et dans le bassin, et de la période de production d'énergie

L'opération dans un seul sens utilise pour 12 heures de marée un volume proche de 0,7 Hm S sous une charge moyenne voisine de 0,6 Hm. Cette solution est adaptée à des groupes bulbes simples qui peuvent opérer principalement sous une charge de 0,6 Hm en marées moyennes et 0,9 Hm en vives eaux, c'est-à-dire de 0,7 ou 0,8 Hm en moyenne : environ 5 m pour les zones à fort marnage.

Elle est aussi utilisable pour des maréliennes qu'il est cependant préférable d'utiliser en option B, C ou D (dans les deux sens).

Cette solution a trois inconvénients :

- Une assez faible utilisation du potentiel du bassin, ce qui est acceptable économiquement si le coût des digues est peu élevé ; à Sihwa les digues existaient, et à la Rance il n'y a pratiquement pas de digues.
- Une opération 4 heures sur 12.

- Un grand changement des marées dans le bassin (hauteur et phase), ce qui était souhaité et favorable à Sihwa mais probablement inacceptable pour beaucoup de sites importants, en particulier en France, et a été très contesté pour le grand site de la Severn.

Cette solution produit plus si on turbine du bassin vers la mer que dans le sens inverse, option qui a néanmoins été préférée à Sihwa pour l'objectif d'aménagement foncier souhaité (cf. figure ci-dessous). On peut associer électriquement deux bassins opérant en sens opposé, ce qui répartit mieux la production.

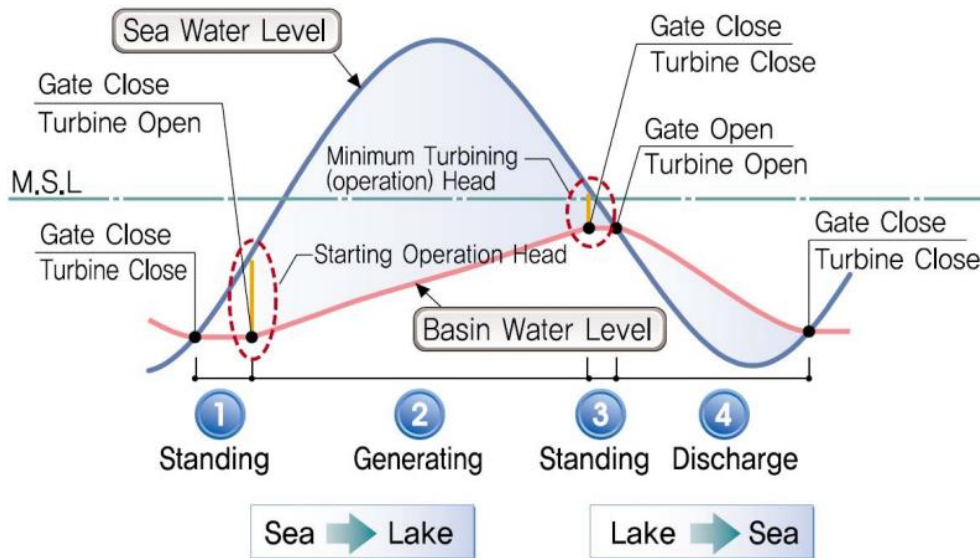


Figure 22 : Fonctionnement typique de l'usine de Sihwa

3.4.2 Type B - Opération à double sens sous charge élevée

Ce mode de fonctionnement est décrit par la figure ci-dessous, avec des durées d'attente typiques de 3h30.

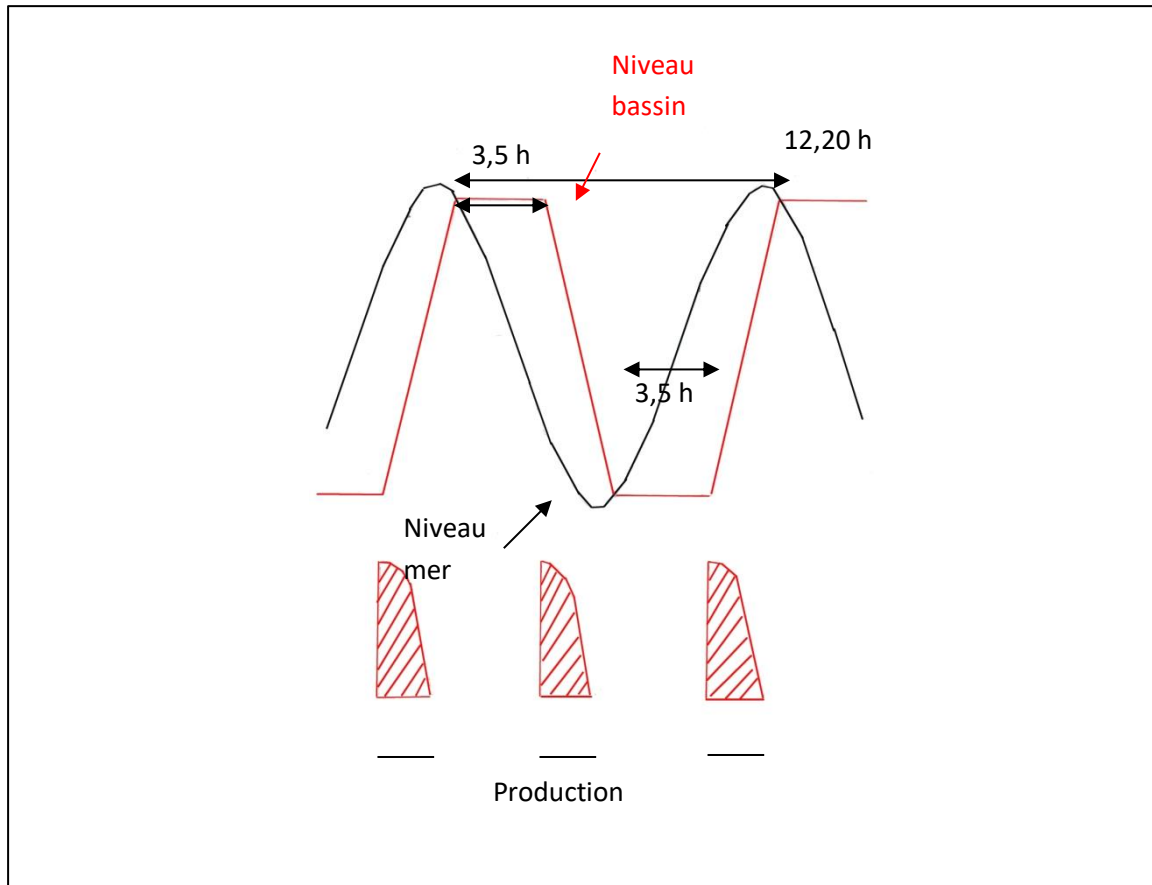


Figure 23 : Option B, pour la marée moyenne. Illustration des niveaux respectifs en mer et dans le bassin, et de la période de production d'énergie

Dans cette option, le volume d'eau utilisé en 12 heures en marée moyenne est voisin de $2 \times 0,9 = 1,8$ Hm S, la charge maximale de 0,8 Hm, la charge moyenne de 0,45 Hm.

Cette solution permet le fonctionnement des groupes bulbes 2 fois 2 heures par marée de 12 heures dont la moitié du temps sous charge supérieure à 0,5 Hm. Soulignons toutefois que les performances des groupes bulbes dans le sens inverse sont moins bonnes que dans le sens direct (les turbines bulbes classiques sont hydrauliquement optimisées pour un sens, et elles sont placées dans le sens du vidage du bassin).

En marée de vive eau on peut commencer la production plus tôt, et plus tard en morte eau. On peut par ailleurs pomper pour sur-remplir ou sur-vider le bassin ; le turbinage se fait en très grande partie sous une charge comprise entre 0,6 Hm et Hm, 4 à 7 m pour les sites de fort marnage. C'est la solution étudiée pour Swansea et Cardiff.

Cette option est celle qui utilise le mieux le potentiel du bassin pouvant atteindre une production annuelle en GWh proche de $1,1 \text{ S Hm}^2$ (étude de Swansea) mais elle nécessite une puissance installée importante, pour exploiter au maximum les fortes dénivelées, pendant un temps court. Le nombre équivalent d'heures de fonctionnement à la puissance nominale est, pour Swansea, $550 \text{ GWh/an} / 320 \text{ MW} \approx 1700 \text{ h}$, ce qui est faible. La production est concentrée sur une faible durée pour la plupart des marées : ce n'est pas l'idéal pour le réseau électrique pour de grands sites.

Les courbes de marée dans le bassin sont proches des courbes naturelles, ce qui est généralement mieux accepté que l'option A. Cependant l'étalement dans le bassin est assez long.

Pour des marnages moyens supérieurs à environ 6 m, cette solution est, comme l'option A, bien adaptée à l'utilisation de groupes bulbes opérant dans les 2 sens. Ce sont d'ailleurs les solutions qui ont trouvé des applications industrielles ou qui sont envisagées sur les projets les plus avancés.

Ce mode opératoire peut aussi utiliser la solution (en développement) des chenaux de maréliennes, sans l'avantage du pompage. L'emploi de maréliennes conduit à une production un peu plus faible pour les marnages élevés mais permet aussi l'équipement de sites de marnage moyen entre 3 et 6 m. Pour les marnages de plus de 6 m, on peut comparer le coût au MWh des usines bulbes et des chenaux de maréliennes, et éventuellement les associer.

Cette option est inadaptée comme l'option A aux turbines orthogonales russes (cf. §6.1.2.3) dont l'utilisation est envisagée entre 1 et 3 m de charge.

3.4.3 C - Opération à double sens sous charge moyenne

Ce mode de fonctionnement est décrit par la figure C ci-dessous, avec des durées d'attente typiques de 2h30, un peu plus faibles donc que dans l'option B.

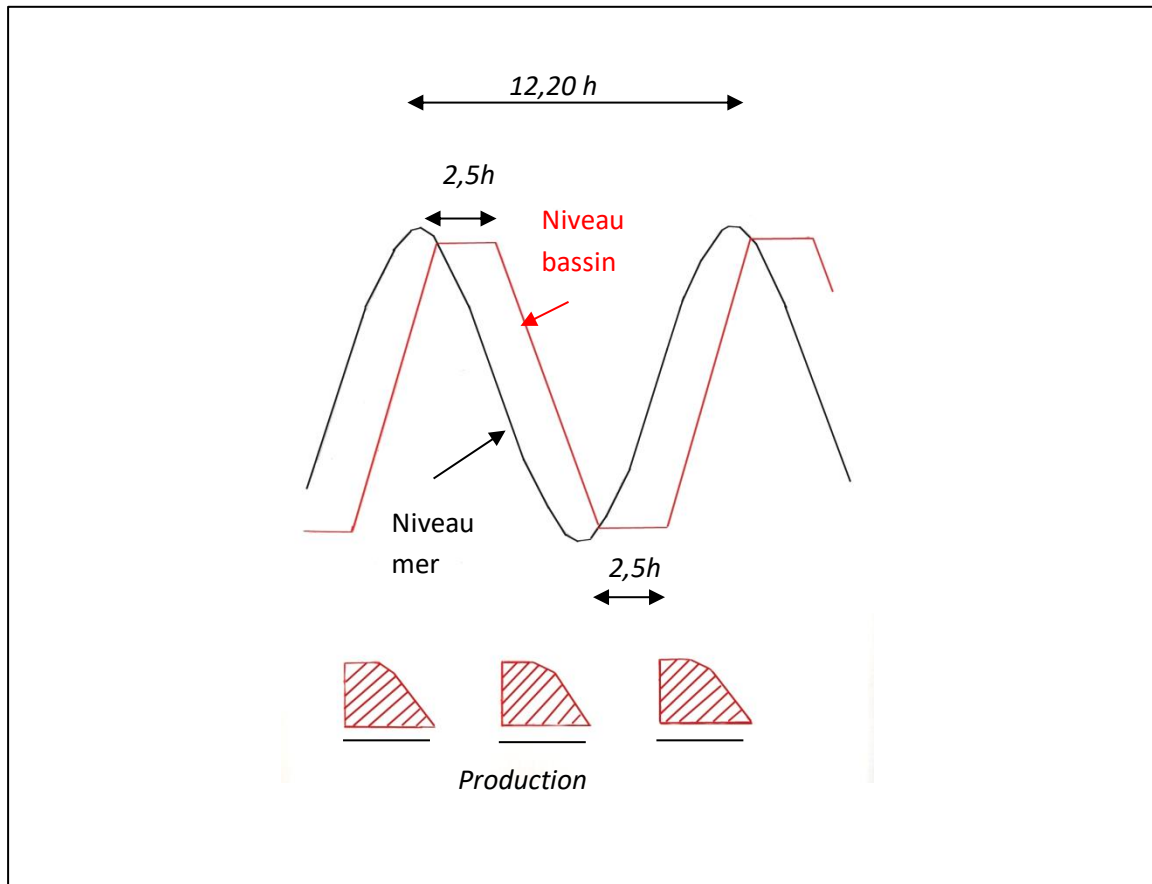


Figure 24 : Option C, pour la marée moyenne. Illustration des niveaux respectifs en mer et dans le bassin, et de la période de production d'énergie

L'option C est basée sur le même mode d'exploitation que l'option B mais en commençant la production environ 1 heure plus tôt que dans l'option B. Cette différence peut paraître minime mais la charge maximale est limitée à 0,5 Hm, le débit d'équipement est nettement plus faible, la puissance nécessaire est divisée par 2 ; la charge moyenne et la production sont un peu réduites.

La production est plus étalée dans le temps que pour la solution B et la durée de l'étalement est un peu réduite. Les courbes de marée à l'intérieur du bassin sont proches de l'option B.

Cette solution ne semble bien s'appliquer aux groupes bulbes (cf. § 6.1.1) que pour les marées de vives eaux de zones de fort marnage, ces groupes étant moins bien adaptés à des charges de moins de 3 à 4 m.

Cette option s'applique bien aux solutions (en développement) qui s'accommodent d'une charge plus réduite ou plus variable ; les chenaux de maréliennes pour tout marnage moyen de 3 à 8 m en adaptant le nombre de rangées d'hydroliennes ; les turbines orthogonales pour les charges maintenues basses.

Comme dans le cas de l'option B, le début de production dans une demi-marée est avancé pour les marées de vives eaux et retardé pour les marées de morte eaux.

3.4.4 Type D - Opération au fil de l'eau

Ce mode de fonctionnement est décrit par la figure D ci-dessous. Il consisterait à supprimer tout temps d'attente, et à enclencher la production dès que la charge (dénivelée entre mer et bassin), même faible, le permet.

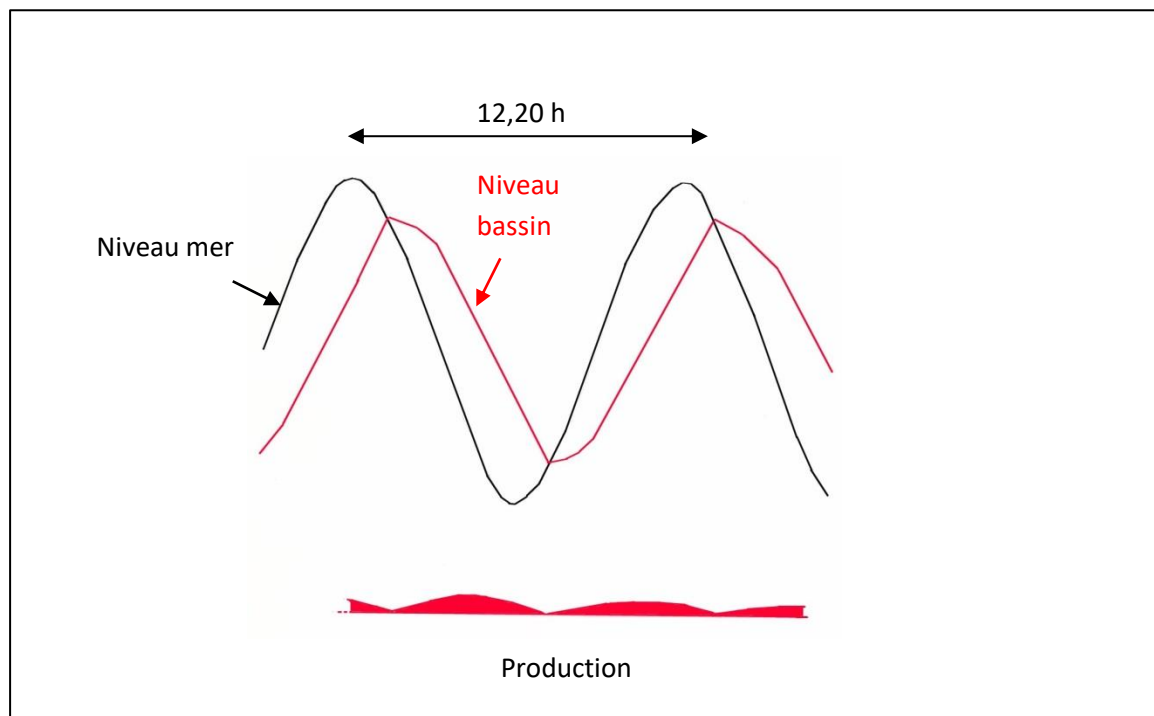


Figure 25 : Option D, pour la marée moyenne. Illustration des niveaux respectifs en mer et dans le bassin, et de la période de production d'énergie

Dans cette option, la différence de niveau entre mer et bassin est provoquée par le fait que les débits turbinés sont maintenus plus faibles que dans les autres options.

Cette option ne peut s'envisager qu'avec les solutions (en développement) qui s'accommodent de faibles charges : maréliennes par exemple.

Les différences avec les options B et C sont sensibles :

- Puissance installée plus faible. Le coût de l'usine (turbines + génie-civil) au kWh installé est le plus faible. Mais si les digues sont importantes, le coût total au kWh peut être plus élevé.
- Moins grande valorisation énergétique du potentiel du bassin, mais fourniture du courant plus régulièrement que B ou C.
- Le cycle des marées dans le bassin est sensiblement différent : gradients de variation de cotes plus faibles que pour les options B et C ; étales plus courtes ; et amplitude des marées diminuée par rapport aux amplitudes en pleine mer.

Cette solution n'a pas fait l'objet dans le passé de développement industriel ni d'étude approfondie. Mais elle pourrait présenter un intérêt (technique, économique, et peut-être environnemental) dans certains cas notamment pour des sites de taille modérée.

On peut également envisager une solution intermédiaire entre C et D, par exemple en équipant un chenal sur deux de vannes.

On peut enfin imaginer l'équipement d'un site en plusieurs phases : commencer par la solution D, au fil de l'eau, et ajouter des vannes par la suite.

3.4.5 Comparaison des différentes options

Une comparaison entre les différentes options peut se faire par exemple pour le site de Swansea où la marée de plus de 6 m en moyenne permet les diverses solutions sur une surface d'une dizaine de km².

Les chiffres de la solution B (retenue pour le projet) résultent de l'étude officielle de Swansea, ceux des autres solutions sont des estimations préliminaires.

Pour la comparaison, ont été retenus : en opération de type A, des turbines bulbes ; en opération de type C ou D, des maréliennes.

Les puissances et productions de C et D dépendent des choix et optimisations des turbines de la solution « maréliennes » ; elles diffèrent légèrement des évaluations plus fines proposées au §6.

	Puissance installée (MW)	Production annuelle (GWh)	Facteur de charge
A (bulbes)	150	330	25%
B (bulbes)	320	550	20%
C (maréliennes)	150	450	35%
D (maréliennes)	80	300	40%

Ce tableau montre le résultat suivant : pour un site naturel donné, des solutions très variées peuvent être envisagées, et il n'est pas facile a priori de dégager une « meilleure option ».

En effet :

- La solution B permet la plus forte production annuelle mais avec un faible facteur de charge. Sa production est concentrée sur une heure ou deux par demi-marée de 6 heures pour la plupart des marées et sur 3 ou 4 heures pour les marées de vives eaux. Cette solution est la plus coûteuse en termes de turbines (et équipements associés), mais la plus économique en termes de digues.
- Les solutions C et D ont le meilleur facteur de charge et la meilleure répartition de la production. Meilleur facteur de charge signifie plus bas coût au MWh pour les turbines et les usines associées. Mais la production annuelle est plus faible et donc le coût des digues par MWh plus élevé que pour la solution B.

D'ailleurs, des solutions variées ont été retenues dans le passé :

- Les groupes bulbes peuvent utiliser les solutions A et B. Le site de Sihwa en Corée utilise l'option A avec des groupes simples sans pompes, le site est sous équipé.
- Le projet de Swansea est basé sur des groupes plus complexes à vitesse variable turbinant et pompant dans les 2 sens ; le site est utilisé au maximum avec la solution B.
- Le site de la Rance combine les 2 options A et B ; le site est sous équipé et les groupes (étudiés il y a 60 ans) ont un rendement assez faible pour les charges de moins de 5 m.

En première approche on pourrait considérer que :

- La solution standard classique est l'option B, avec groupes bulbes. Notons que l'utilisation des groupes bulbes est également possible avec les options C et D, mais elle serait coûteuse.
- Les maréliennes peuvent être utilisées avec les 4 options mais les options C et D paraissent les plus favorables ainsi que des solutions intermédiaires entre B et C ou entre C et D. Sur un site donné, il peut être judicieux de comparer Bulbes en solution B et maréliennes en solution C (ou D).
- Enfin, les différentes solutions peuvent également utiliser un mix : usines bulbes + chenaux de maréliennes.

3.5 Fonctionnement hydraulique pour les autres types de marée

3.5.1 Modulation du fonctionnement

Le fonctionnement d'un bassin marémoteur est adapté à l'amplitude des marées, pour optimiser la production électrique, et s'adapter aux contraintes spécifiques du site.

L'optimisation de la production électrique conduit à piloter les différentes phases (turbinage, équilibrage, pompage, attente) en fonction de l'amplitude des marées, et éventuellement en fonction de la demande en électricité.

D'un autre côté, la prise en compte des contraintes de site peut amener à s'écarter de l'optimum économique.

Ainsi, il peut y avoir, de manière permanente ou dans certaines circonstances particulières, des modifications des consignes de gestion pouvant avoir par exemple pour objectifs :

- Le maintien d'une cote minimale ou maximale à l'intérieur du bassin (cas de Sihwa notamment),
- Le respect d'une consigne de gradient de variation de hauteur d'eau dans le bassin,
- Le respect de durées d'ouverture faisant librement communiquer le bassin et la mer.

Le §3.6 illustre cela dans le cas de la Rance.

3.5.2 Bassins associés

Les études théoriques du fonctionnement des bassins marémoteurs montrent les avantages d'associer deux bassins.

Entre 1950 et 2000 de nombreuses études ont associé hydrauliquement deux bassins de très grands sites : études Caquot et EDF pour Chausey, Etudes GEDEM puis MAREOL pour EDF, étude de Kalpazar en Inde. Avec deux bassins, il est possible de maintenir pendant plus longtemps des différences de charge significatives, permettant de turbiner. Ces solutions n'augmentent pas la production par km² mais la répartissent mieux dans le temps et leur utilisation est plus flexible.

Pour les bassins côtiers ou en estuaire, ces options ont l'inconvénient de modifier beaucoup les marées le long de la côte. Ainsi, la solution de bassins associés hydrauliquement est une optimisation qui pourrait être étudiée dans une phase ultérieure (deuxième génération de projets ou modifications d'infrastructures existantes) car leur intérêt paraît limité à de très grands sites.

Mais l'association *électrique* de plusieurs bassins simples peut s'étudier facilement dès maintenant : il s'agit principalement de tenir compte du décalage horaire des marées le long des côtes. C'est un atout dans le cas de la France, où un tel décalage existe : les différents sites marémoteurs ne produiraient pas tous en même temps, et les déphasages lissent la production électrique.

3.6 Un retour d'expérience : l'usine de La Rance

L'usine marémotrice de la Rance est située à l'embouchure de la rivière du même nom, entre Saint-Malo et Dinard. Construite entre 1960 et 1966, elle a été mise en service le 26 novembre 1966. Elle est restée, jusqu'en 2011⁶, la plus grande usine marémotrice au monde ; elle reste aujourd'hui, après 50 ans d'exploitation, une source unique d'expérience dans le domaine du marémoteur et la seule équipée de groupes turbines réversibles. Elle produit davantage que Shiwa.

⁶ Année de mise en service de l'usine marémotrice de Sihwa en Corée du Sud.

3.6.1 Description de l'aménagement

Le site de la Rance a été retenu pour ses caractéristiques propices à l'exploitation de l'énergie marémotrice : un marnage important, un estuaire large et profond, un emplacement favorable pour le barrage (étroit, protégé de la houle).

L'ensemble de l'aménagement se compose (de la rive droite à la rive gauche) de : 6 pertuis de vannage, équipé de 6 vannes de 10 x 15 m (radiers à la cote -4 m CM) ; 1 digue de 163 m de long, avec noyau central en béton et enrochements⁷ ; 1 usine de 330 m de long, abritant les 24 groupes bulbes (radiers des conduits à la cote -10 m CM) ainsi que des travées de montage et la salle de commande ; 1 écluse de 13 m de large et 65 m de long (radier à la cote +2 m CM).

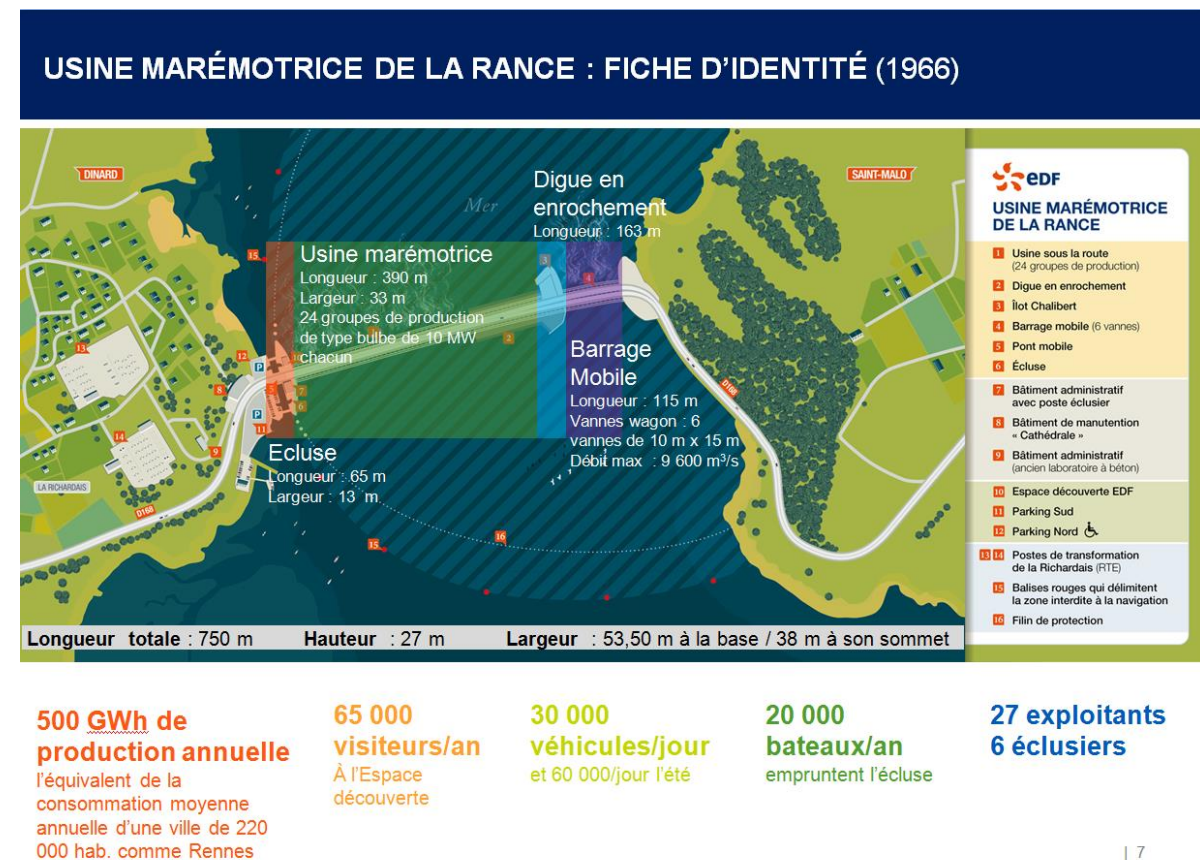


Figure 26 : Extrait de documentation EDF

Les groupes bulbes ont fait l'objet de nombreuses études et expérimentations, menées, dès 1943, par la S.E.U.M (Société d'Etudes des Usines Marémotrices) et Neyrpic. Plusieurs prototypes ont été testés (voir Annexe). Le choix du nombre de groupes a fait l'objet de nombreuses études : des projets à 32, voire 40, groupes ont été étudiés. L'équipement actuel (24 groupes) est dimensionné pour les marées inférieures à un coefficient 94 (il y a une relation linéaire entre énergie nette et marnage) ; pour les marées de coefficient supérieur, les groupes atteignent les limites de leur performance (cavitation, rendement réduit). Une usine à 32 groupes serait dimensionnée pour toutes les marées ; cependant, à l'époque, cette configuration semblait économiquement moins intéressante. Un projet de suréquipement de 2 groupes de 20 MW a été évoqué, mais pas approfondi (faisabilité technique et gain économique).

⁷ Enrochements provenant des fouilles exécutées pour la construction de l'usine proprement dite.

3.6.2 Les modes de fonctionnement

La conduite de l'usine a évolué au fil du temps et de l'expérience acquise. Aujourd'hui (2016), deux modes de fonctionnement sont utilisés : le Simple Effet et le Double Effet. Si les turbines sont conçues pour fonctionner selon les 4 sens possibles (turbinaison directe ou inverse, pompage direct ou inverse), le Pompage Inverse a été rapidement abandonné et l'utilisation du Turbinaison Inverse restreinte aux grands coefficients de marée.

Le mode Simple Effet

Le mode Simple Effet sous-entend une utilisation des groupes bulbes en Turbinaison Directe (TD) uniquement, c'est-à-dire une production d'énergie uniquement au vidage de l'estuaire (jusant).

Le remplissage est donc non-énergétique et s'opère au moyen de toutes les vannes et tous les groupes en mode orifice ; il est suivi du sur-remplissage réalisé au moyen des groupes utilisés en pompage direct (PD).

L'optimisation du Simple Effet consiste à maximiser la différence entre l'énergie brute produite en Turbinaison Directe avec celle consommée en pompage ; pomper consomme mais contribue à augmenter significativement le turbinage qui s'ensuit. En moyenne, 1 MWh pompés représentent 2 MWh turbinés soit un rendement de cycle supérieur à 1, (seul cas au monde !). Ce rapport est bien sûr variable selon le coefficient de marée. En termes de productible⁸ annuel et en ordre de grandeur, l'énergie brute produite en TD représente environ 600 GWh, l'énergie consommée en PD environ 50 GWh et donc l'énergie nette produite 550 GWh.

Le remplissage de l'estuaire par les groupes et vannes disponibles présente un caractère fatal dans le sens où tous les organes restent ouverts du début à la fin (pas de réglage, ni de manœuvre).

L'optimisation du Simple Effet (maximisation de l'énergie nette) peut être appréhendée unitairement, cycle (de marée) par cycle : ceci permet d'envisager une fonction de conduite simple de mise en œuvre, précise, proche du temps réel, ou du moins du court terme, et donc à même de maximiser l'énergie effective nette produite.

Le Mode Double Effet

Le Double Effet est une extension du Simple Effet avec les groupes couplés en Turbinaison Inverse (TI) lors du remplissage (les vannes sont également utilisées). La phase de TI est intéressante lors des grandes marées, périodes favorables à l'augmentation du marnage, avec des niveaux estuaire plus bas, favorables à l'écologie de l'estuaire.

Afin d'augmenter l'énergie produite en TI, il est avantageux de sur-vider l'estuaire en fin de production TD (vannes ouvertes éventuellement avant l'arrêt des turbines, puis, groupes en mode Orifice Direct après la phase d'arrêt). De même, afin d'augmenter l'énergie produite en TD au cycle de marée suivant, le remplissage s'effectue en combinant groupes turbines en Turbinaison Inverse et vannes (puis groupes en mode Orifice Inverse après le Turbinaison Inverse).

L'optimisation du fonctionnement en Double Effet présente une réelle difficulté de réalisation technique en termes de planification et d'exploitation, incluant le contrôle du niveau minimum estuaire et de son évolution au fur et à mesure des cycles.

En conclusion, le Double Effet, s'il n'a pas d'intérêt fort sur le plan énergétique, peut augmenter les coûts de maintenance mais est néanmoins nécessaire pour des raisons environnementales ou le multi-usage du plan d'eau. Encore une fois, l'énergie totale produite entre Simple Effet et Double Effet reste équivalente au pourcent près, par vase communicant entre TD et TI⁹.

⁸ Energie théorique pouvant être produite (hors pertes ...).

⁹ En réalité, les deux sont très voisins en termes de productible avec la contrainte actuelle de niveau haut à 12,00 m. Si cette contrainte est levée, avec en outre, la possibilité de faire de la surpuissance à 11 MW, le Simple Effet sera définitivement gagnant (hors aspect tarifaire de l'énergie et hors contraintes écologiques sur les niveaux bas dans l'estuaire).

3.6.3 Exploitation et contraintes

Entre 1967 et 2007 (soit 40 ans de fonctionnement), l'usine a fonctionné environ 223 000 heures, et produit 21 600 GWh, soit, en moyenne, 520 GWh de production brute par an. L'année 1985 a permis d'établir le record de production brute avec 603 GWh injectés sur le réseau (pour 118 GWh consommés en pompage). L'année 1998 détient le record de production nette avec 515 GWh produits.

Les contraintes d'exploitation résultent des multiples enjeux liés à l'exploitation d'une usine marémotrice dans un environnement aux usages nombreux.

3.6.3.1 Sûreté/Sécurité

Le fonctionnement de l'usine induit des mouvements de masse d'eau pouvant impacter les autres usagers de l'estuaire : des forts courants aux abords de l'ouvrage lors de certaines phases de fonctionnement (survidage, remplissage à forte marée,...), la maîtrise des niveaux dans l'estuaire – en particulier des niveaux hauts – en fonctionnement normal ou lors d'épisodes de crue de la rivière Rance¹⁰, les intumescences – oscillations d'amplitude non négligeable mais relativement lentes du niveau d'eau - parfois observées, en particulier en queue d'estuaire, lors de l'arrêt des groupes. Ces phénomènes conduisent à des contraintes pour la conduite de l'usine qui ont un impact sur le productible.

En pratique, les contraintes sont les suivantes :

- limitation du niveau haut – 12 m en temps normal ou 10,50 m en crue,
- limitation des gradients de débit ou niveau – 180 m³/s/min ou 4 m/h (ou encore 1 m en 10 min),
- interdiction d'ouverture des vannes pour des niveaux bassin inférieurs à 5,50 m ou des niveaux mer inférieurs à 2,50 m,
- mise en place de signalisation (mât avec cônes, niveaux prévisionnels diffusés sur Internet et par boîte vocale) et de mesures de réduction des risques (zone interdite à la navigation, filins de protection¹¹).

3.6.3.2 Environnement (hors gestion sédimentaire)

La première contrainte de fonctionnement est de reproduire au mieux les cycles de marée dans l'estuaire, ce afin de préserver le caractère maritime de l'estuaire et limiter l'impact sur le milieu naturel (faune/flore). Une grande partie de l'estuaire a été classée comme une zone Natura 2000 (Directive européenne Habitats). Par ailleurs, l'équilibre écologique de l'estuaire est garanti par la fréquence annuelle des niveaux bas. Le fonctionnement normal de l'usine¹² ne permettant pas d'atteindre des niveaux inférieurs à 6 m, des périodes de fonctionnement en Double Effet sont mises en œuvre afin d'atteindre des niveaux inférieurs très bas¹³. Ces variations du niveau bas sont progressives (écart limité entre deux niveaux bas consécutifs).

¹⁰ La maîtrise des niveaux dans l'estuaire permet de protéger la ville de Dinan des inondations.

¹¹ Les filins de protection ont été mis en place en 1973 et rénovés en 2015.

¹² Fonctionnement en Simple Effet.

¹³ Le niveau bas est par ailleurs borné à 4,50 m CM par des contraintes de navigabilité.

3.6.3.3 Gestion sédimentaire

Suite aux concertations entre l'Administration, la région, l'exploitant (EDF), les collectivités territoriales ou encore les associations environnementales, plusieurs opérations ont été menées depuis plusieurs années l'efficacité de pièges à sédiments : après une première expérience en 1996 à Lyvet (10 000 m³ extraits), les extractions furent réitérées au début des années 2000 à Lyvet et Mordreuc (180 000 m³ extraits). En 2014-2015, l'expérience s'est poursuivie avec la construction d'une zone de séchage pour stocker les sédiments extraits du piège de Lyvet (projet « Lyvet 2 » - de nouveau 65 000 m³ extraits).

3.6.3.4 Réseau

L'usine produit au fil de l'eau (maximisation de la production par rapport à la ressource disponible et aux contraintes environnementales). Exceptionnellement, les cycles de Pompage (Direct) peuvent être supprimés (échanges contractualisés avec RTE).

3.6.3.5 Usage partagé

L'écluse permet le passage de 20 000 bateaux par an ; le pont-route couvrant l'écluse permet la circulation de 60 000 véhicules par jour. Le respect des périodes de fonctionnement de ces deux organes constitue une contrainte, en particulier pour la maintenance. Par ailleurs, la fermeture de l'estuaire a permis l'essor de toute une activité économique (chantiers navals, ...) ou de loisir (nautisme, plongée, ...) ; aujourd'hui ces activités sont prises en compte dans les programmes de l'usine.

3.6.3.6 Intérêt pour l'économie locale

La gestion de l'aménagement représente environ 60 emplois directs et de nombreux sous-traitants (par exemple, en 2013, 60 entreprises sont intervenues sur le site, dont la moitié d'entreprises locales, pour 76 000 heures de travail et un montant de 11 M€). Les taxes payées représentent environ 2,5 M€ par an.

3.6.3.7 Personnel d'exploitation

L'usine est exploitée par 33 agents d'exploitation et maintenance courante rattachés au Groupement d'Usines Rance-Vezins, dont 6 éclusiers en charge du fonctionnement de l'écluse et travaillent en 3/8. En outre, vingt agents, rattachés au Groupement Mécanique Hydraulique, sont en charge des travaux de maintenance importants. Enfin, pour les travaux importants, des sous-traitants peuvent être également présents sur site.

3.6.4 La maintenance

3.6.4.1 Groupes bulbes

De par la conception des groupes, les pièces délicates ou soumises à usure (coussinet de palier, patins et joints d'étanchéité) peuvent être démontées sans avoir à démonter des ensembles importants ou à vidanger le conduit du groupe. De même, on peut démonter quelques pôles et enroulements statoriques, voire dégager le rotor de l'alternateur pour intervenir sur les bobinages du stator. Cependant, l'alternateur, situé dans l'ogive du bulbe, est maintenu dans une atmosphère d'air légèrement en surpression (refroidissement de la machine) ; cette pressurisation s'avère être une forte contrainte d'exploitation/maintenance. Les pales de la roue peuvent également être remplacées séparément (après vidange du puits).

Chaque groupe est sollicité à hauteur de 1500 cycles de fonctionnement par an. Le taux de disponibilité annuel varie entre 80 et 96 %. Les indisponibilités programmées sont planifiées en périodes de mortes-eaux¹⁴.

3.6.4.2 Pertuis (groupes et vannes)

Les pertuis de groupes peuvent être coupés avec des vannes de coupure (côté mer) et des batardeaux (côté estuaire). Les vannes de coupure sont mobiles (manutention par un pont roulant) ; l'usine ne dispose que de 6 jeux de vannes : cela est considéré par l'Exploitant comme une des faiblesses de l'usine (le temps d'installation pouvant être long). Le batardeau côté bassin est lui déposé une fois le conduit coupé.

La colonisation des pertuis (de groupe ou de vanne) par le benthos (moules, balanes, algues) impose un décapage préalable à toute intervention lors de la vidange d'un pertuis (émission d'ammoniac lors de la décomposition entraînant un risque d'asphyxie pour les intervenants).

3.6.4.3 Projet de rénovation (2011-2025)

Un projet de fiabilisation et rénovation des groupes et du contrôle-commande de l'usine a été engagé en 2011 pour garantir la rentabilité de l'aménagement jusqu'à la fin de la concession de l'aménagement (2043). Cette maintenance préventive inclut : la fiabilisation de 15 groupes non rénovés depuis l'origine¹⁵ ; le traitement des faiblesses génériques sur les alternateurs (reconstruction de 5 stators dont l'isolation est considérée à risque, refretage de 22 rotors) ; le remplacement du matériel informatique obsolète (régulateur, contrôle commande, moyen de communication, surveillance vidéo, contrôle d'accès, mesures de niveau, auxiliaires continu et alternatif, protection cathodique...).

3.6.4.4 Durabilité

3.6.4.4.1 Groupes

Trois approches ont été mises en œuvre pour lutter contre la corrosion : utilisation de matériaux résistant naturellement à la corrosion¹⁶, emploi de revêtements pour les surfaces en contact avec l'eau de mer (sauf les pales), protection cathodique à soutirage de courant^{17 18}. A ce jour, aucune corrosion majeure n'a été détectée.

Le pilotage des groupes tient compte des contraintes de cavitation et permet d'éviter l'occurrence du phénomène. Les pales présentent peu de signe d'usure due à la cavitation.

3.6.4.4.2 Génie Civil

Le constat est que l'aménagement bénéficie d'une bonne étanchéité (quelques fuites observées mais pas d'évolution notable) grâce à une conception et une réalisation soignée, ainsi qu'à des traitements réalisés avant la mise en eau sur les joints et parements. Peu de pathologies ont été

¹⁴ Cependant, si l'indisponibilité doit s'étaler sur plusieurs semaines, ce choix est compensé par l'alternance des cycles de mortes et vives eaux.

¹⁵ 9 groupes ont été rénovés dans les années 90.

¹⁶ Aciers inoxydables avec forte teneur en chrome et avec molybdène ou bronzes d'aluminium

¹⁷ Compte tenu de l'efficacité de la protection cathodique mise en place sur les groupes, les vannes ont aussi été équipées d'une protection cathodique en 1972.

¹⁸ Les éléments équipés de protection cathodique ont aussi l'avantage de ne pas présenter de dépôts de concrétions, effet positif qui n'avait peut-être pas été envisagé à l'époque.

relevées depuis la construction. Les recommandations basées sur le retour d'expérience de l'usine de la Rance peuvent se résumer en quelques points clés : couler l'usine et le barrage mobile en plusieurs plots et mettre en place des joints (Waterstop) entre les plots, prévoir des galeries de drainage et drains de fondation dès la conception, éviter les ancrages passifs dont la tenue dans le temps n'est pas garantie, imposer un enrobage des armatures minimum de 5 cm.

4 INCIDENCE DES PROJETS SUR L'ENVIRONNEMENT MARITIME ET LITTORAL

4.1 Résumé exécutif de cette partie

Quel que soit leur type (bassin d'estuaire, bassin côtier ou bassin offshore), les projets marémoteurs nécessitent des infrastructures lourdes et modifient de manière importante l'environnement marin et côtier.

Ces *effets* potentiels peuvent concerner l'amplitude et le marnage de la marée, sa phase, les courants associés, les flux et les débits de cours d'eau, la salinité, les états de mer, le transport sédimentaire, la bathymétrie, la connectivité écologique, le bruit...

Ces effets peuvent être associés à des *incidences* notables sur les écosystèmes, leurs fonctionnalités, les espèces marines et les habitats, qui peuvent être modifiés profondément. Ces incidences dépendent non seulement du type de projet et de ses dimensions, mais aussi beaucoup de la zone géographique concernée : par exemple, alors que certaines zones recèlent essentiellement des écosystèmes communs (donc, dont la modification n'aurait pas conséquences environnementales importantes au-delà de l'échelle locale), d'autres régions abritent des écosystèmes exceptionnels, dont la disparition ou même la modification aurait des répercussions bien au-delà du périmètre du projet.

L'application du principe « ERC » (Eviter – Réduire – Compenser) conduit naturellement d'abord à éliminer les sites où des modifications importantes de l'environnement sont inacceptables.

L'identification des sites potentiels au regard de ce critère éliminatoire devrait être conduite au niveau de la stratégie et de la planification et non du projet ; elle devrait s'appuyer sur une *évaluation environnementale stratégique* (EES¹⁹). La planification correspondante (par exemple zones « interdites », « favorables », « acceptables sous condition ») devrait être portée en France par les « Documents Stratégiques de Façade » (DSF), dont la première version est en cours d'élaboration.

Dans les sites potentiels issus de cette première sélection, une *étude d'impact* conduite selon la réglementation doit permettre de *réduire les incidences négatives* sur l'environnement, et de proposer le cas échéant des compensations²⁰. Cette phase doit être conduite en gardant à l'esprit que par leur principe même (une modification importante des conditions hydrologiques est nécessaire pour y prélever de l'énergie) et *quelles que soient les mesures de réduction adoptées* (« R » de la séquence ERC : ex. modalités de pilotage) les projets marémoteurs ne peuvent être développés sans impacts environnementaux résiduels importants : aux environs du projet, l'environnement initial et les écosystèmes associés sont inévitablement fortement modifiés, ce qui

¹⁹ Directive 2001/42/CE concernant l'évaluation des incidences des plans et programmes

²⁰ La réglementation inclut dans l'étude d'impact les incidences socio-économiques liées aux impacts environnementaux, qui sont traitées ici dans une partie séparée.

ne correspond d'ailleurs pas nécessairement à un environnement dégradé au plan écosystémique (fonctionnalités, biodiversité)²¹.

Des mesures de compensation environnementale peuvent alors être mobilisées pour améliorer encore le fonctionnement. Une large gamme de mesures peut être envisagée, en mettant en particulier à profit le relatif isolement du lagon, dont l'environnement « contrôlé » peut constituer par ailleurs un laboratoire pour le développement de mesures de compensation et de réhabilitation des écosystèmes marins.

Au bilan :

- Du fait de la nature même des projets marémoteurs, il est illusoire d'espérer éviter des impacts environnementaux importants : l'environnement marin et littoral autour de ces projets est forcément *profondément modifié, et pour très longtemps* compte tenu de la durée de vie théorique de ces projets ;
- Même si le nouvel environnement constitue un écosystème parfaitement fonctionnel, ces modifications peuvent conduire à la disparition ou l'affaiblissement de composantes ou de fonctions importantes de l'écosystème marin, les effets locaux pouvant se traduire par des impacts bien au-delà du projet ;
- Il importe donc, grâce à une planification fondée sur une EES, de définir les régions potentiellement favorables et en particulier d'identifier les « zones interdites » au regard d'enjeux environnementaux jugés importants ;
- Les projets implantés dans des zones où l'environnement marin et littoral est soit dégradé, soit menacé, offrent en revanche un potentiel réel de réhabilitation ou de protection ;
- L'évaluation environnementale des projets marémoteurs ne devrait donc pas se concentrer sur les seules modifications de l'environnement préexistant, mais devraient viser à évaluer, en vue de l'améliorer par des mesures compensatoires, la qualité du nouvel environnement créé par le projet.

Recommandation : les premiers projets marémoteurs de nouvelle génération pourraient être développés dans des zones où l'environnement marin et littoral est déjà dégradé ou menacé, et de manière à créer ou recréer ou protéger un environnement riche et fonctionnel, et/ou dans des zones où il existe d'autres enjeux environnementaux importants (par exemple liés aux risques littoraux).

4.2 Objectifs et méthodologie de l'étude

Les *incidences environnementales des projets* sont désormais des éléments majeurs dans les décisions, que ce soit au niveau des politiques, des stratégies ou des plans qui encadrent le développement de ces projets, ou au niveau des projets eux-mêmes (choix techniques, autorisations).

²¹ Ainsi, un lagon marémoteur peut isoler les eaux de pollutions terrestres, ou d'activités maritimes impactantes, ou créer un effet « réserve » pour des espèces menacées

A ce stade préliminaire de la réflexion, il n'est évidemment pas possible d'étudier en détail les incidences sur l'environnement des projets marémoteurs eux-mêmes ; celles-ci dépendent en effet de multiples facteurs, parmi lesquels :

- La nature et l'importance du projet, et les modalités de sa réalisation et de son exploitation ;
- La zone d'implantation, et les caractéristiques de l'environnement marin et littoral dans cette zone ;
- Les activités dépendant de l'environnement marin et littoral et susceptibles d'être affectées par le projet.

A ce stade, en effet, *aucune zone particulière* n'est désignée, et seules les caractéristiques *génériques* de la famille de filières technologiques associée aux projets marémoteurs peuvent être prises en compte, à l'exception de toute solution particulière.

Il est néanmoins possible d'évaluer ces incidences à un niveau stratégique, en vue de produire des éléments utiles à la décision. Cette évaluation relève de l'approche de « l'évaluation environnementale stratégique » (ESS) qui est notamment formalisée dans la *directive européenne 2001/42/CE*²² *relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement* qui vise à assurer que ces incidences de la mise en œuvre des plans et des programmes sont prises en compte durant l'élaboration et avant l'adoption de ces derniers.

La méthodologie diffère nécessairement de celle applicable aux études d'impact²³ (« EIE »), qui prend pour point de départ un projet particulier, analyse les effets possibles et leurs interactions avec l'environnement (incidences), puis évalue ces incidences, examine les moyens d'éviter les impacts, de les réduire, ou à défaut de les compenser, soit lors de la conception du projet, soit lors de sa réalisation ou de son exploitation opérationnelle.

L'approche adoptée pour conduire cette évaluation est la suivante :

- à partir de la *typologie des projets et des modes de fonctionnement associés*, une liste générique d'effets potentiels est établie
- à partir des normes environnementales, les *enjeux environnementaux* potentiellement concernés par ces effets sont identifiés
- les *incidences* potentielles associées aux effets recensés sont évaluées (niveau stratégique) par type de projet et pour chaque enjeu environnemental, tout au long du cycle de vie des projets ;
- les mesures susceptibles d'éviter, réduire ou compenser les *incidences négatives* (impacts) aux divers stades du cycle de vie sont recensées et leur potentiel évalué
- dans le cas où des *incidences positives* existent, elles sont identifiées et évaluées (notamment quant au potentiel de renforcement de ces incidences positives) ;
- des conclusions et des recommandations sont formulées.

²² <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001L0042&from=FR>

²³ Directive 2011/92/CE concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement

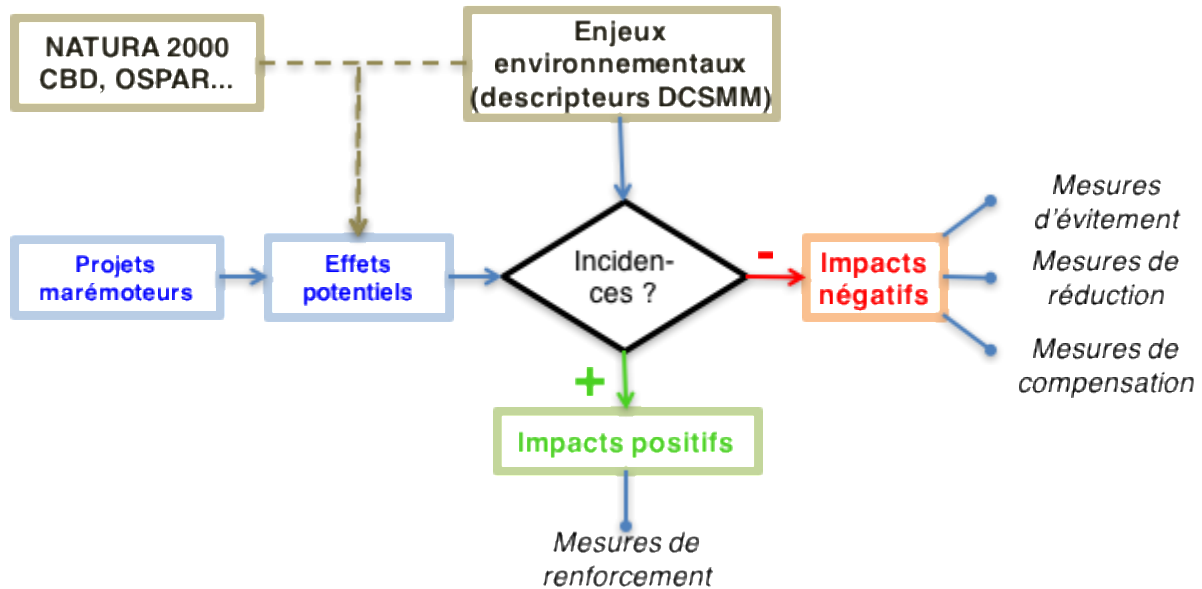


Figure 27 - Approche générale de l'évaluation stratégique des incidences sur l'environnement

4.2.1 Typologie des projets marémoteurs

En vue de disposer d'une typologie des incidences potentiellement associées aux projets marémoteurs, il est nécessaire de disposer d'une typologie au moins sommaire des projets marémoteurs, de manière à caractériser :

- Les principales composantes des projets (digues ou barrages : longueur et hauteur, turbines : type et nombre, dimensions, portes et écluses...)
- La taille des projets (dimensions et surface du ou des plans d'eau intérieurs, énergie prélevée ...)
- Enfin, les modalités de fonctionnement (ex : turbines opérant dans un sens, dans les deux sens, au fil de l'eau...), qui conditionnent notablement les effets (atténuation ou amplification des courants, amplitudes et variations de niveau...)

Sur la base du §3.2, on peut considérer les types « de projets suivants :

- a) Les sites marémoteurs en estuaire – type La Rance
- b) Les sites marémoteurs avec bassin ou lagon côtier existant (type Sihwa en Corée)
- c) Les sites marémoteurs avec bassin ou lagon côtier nouveau délimité côté mer par un ouvrage de fermeture (digue) – type projet Swansea Bay tidal lagoon au Pays de Galles (UK, estuaire de la Severn)
- d) Les sites marémoteurs offshore déconnectés de la côte – pas de projet réalisé à ce jour ; des études en 2007/2008 par EDF sur un projet Mareol

- e) Les sites maréliens : à la différence de la catégorie précédente, l'ouvrage côté mer est ouvert sur la mer via plusieurs chenaux, ces chenaux étant équipés de rangées d'hydroliennes, et cas échéant également équipés de vannes de régulation des débits entre mer et bassin

Enfin, les catégories de sites b) à d) voire e) ci-dessus pourraient également intégrer un ou des bassins complémentaires intérieurs, et ainsi offrir des possibilités de stockage et de lissage de production d'énergie. De plus, en restant sur le plan technique, des ajouts d'autres technologies de production d'énergie peuvent être envisagés pour mutualiser les infrastructures – typiquement installation d'éoliennes offshore sur les digues ou dans les bassins, ou de modules houlomoteurs dans les digues. On a considéré ici que ces variantes ne modifient pas fondamentalement les données du problème²⁴ en ce qui concerne l'environnement marin et littoral, principal objet de cette étude ; elles n'ont donc pas été prises en compte.

Mode de fonctionnement

Pour un projet donné, on peut dans certains cas imaginer plusieurs modes de fonctionnement (voir 3.4).

	Mode de fonctionnement	Exemple type
A	Opération dans un seul sens	Shiwa ; moulins à marée ; Rance
B	Opération dans les deux sens, sous charge élevée	Rance
C	Opération dans les deux sens, sous charge moyenne	Maréliennes
D	Opération dans les deux sens, au fil de l'eau	Maréliennes sans vannes

Au plan des incidences environnementales, cette possibilité de choix du mode de fonctionnement²⁵ relève essentiellement des mesures de réduction (voir plus bas).

Dans la pratique, l'étude qui suit se concentre sur les **sites marémoteurs avec lagon artificiel**, catégorie qui concentre le maximum de projets et de sites potentiels. On a considéré en priorité les lagons côtiers (digues reliées à la côte) équipés de turbines classiques (et non d'hydroliennes : « maréliennes ») : ce type de projet correspond en règle générale aux incidences environnementales maximales (zone intertidale, etc.), mais aussi on le verra aux possibilités les plus grandes de compensation (contrôle fort des flux et niveaux dans le lagon).

4.2.2 Cycle de vie des projets marémoteurs

Les interactions avec l'environnement devraient prendre en compte *tout le cycle de vie* des projets, de la conception et des études initiales (y compris levés, campagnes...) jusqu'au démantèlement éventuel total ou partiel, en passant par la construction et l'exploitation, quels qu'en soient les modes (nominal, dégradé...). Elles devraient aussi prendre en compte les événements accidentels potentiels susceptibles de modifier notablement le projet (par exemple la destruction partielle d'une digue).

²⁴ D'une part du fait que ces impacts additionnels sont désormais assez bien connus, d'autre part qu'ils apparaissent comme secondaires par rapport aux effets principaux associés aux projets marémoteurs : modifications hydrodynamiques, sédimentologiques, etc., ou de nature différente (oiseaux...)

²⁵ Qui peut bien sûr avoir des objectifs d'optimisation énergétique et économique

Dans la pratique, une partie de cette analyse est impossible au stade de l'évaluation environnementale stratégique, et relève de l'étude d'impact de chaque projet.

Une des caractéristiques génériques des projets marémoteurs, et spécifique à ce type de projet, est leur *durée de vie hors du commun* : ces projets sont conçus pour durer plusieurs décennies, et même plus d'un siècle ; cette durée peut être une donnée intrinsèque du projet, par exemple lorsque le modèle économique intègre une durée de vie de 80 ans (alors que la plupart des projets industriels, notamment dans le domaine de l'énergie renouvelable, ont une durée de vie bien moindre, et sont amortis en moins de 20 ans). Par ailleurs, on verra plus loin que tout projet marémoteur modifie profondément l'environnement.

Ceci amène à poser la question du **démantèlement** éventuel de l'ouvrage, et du retour à l'état antérieur. Le principe de base pour les projets bénéficiant d'une concession d'utilisation du domaine public maritime²⁶ est en effet le démantèlement à l'issue de la concession en vue du retour à un environnement aussi proche que possible de l'état initial avant le projet. Outre l'incertitude importante sur l'état futur de l'environnement dans un siècle même en l'absence de projet (changement climatique, dégradation de la biodiversité marine...), cette contrainte interdirait probablement le développement de la plupart des projets (obligés dans ce cas de couvrir par des garanties très longues des coûts de démantèlement très élevés).

Cette évaluation sommaire ne prend donc pas en compte le démantèlement des projets, mais seulement la partie « construction – exploitation » du cycle de vie.

4.2.3 Caractérisation de l'environnement marin

4.2.3.1 Cadrage de l'évaluation

A ce stade de l'évaluation stratégique, on ne connaît que peu de choses sur les régions et les sites où les projets marémoteurs pourraient se développer, au-delà d'une description générale. Pour limiter le champ de l'évaluation, ont seules été prises en compte les zones présentant les paramètres suivants (basés sur des critères techniques de construction et énergétiques de production) :

- zones de faibles profondeurs (0 – 30 m)
- zone où le marnage est supérieur à 3 m

4.2.3.2 Caractérisation de l'environnement marin dans les régions et sites potentiels

Compte tenu de la complexité des écosystèmes marins et du nombre élevé de composantes concernées de ces écosystèmes, il est indispensable d'en disposer d'une typologie utilisable pour l'évaluation des incidences.

La caractérisation de l'environnement marin dans cette étude est basée sur les composantes du **bon état écologique** (BEE), tel qu'il est défini par la directive européenne 2008/56/CE, « Directive cadre Stratégie pour le Milieu Marin » ou DCSMM, dont l'objectif est précisément de guider les Etats membres de l'Union européenne vers la préservation ou l'atteinte du « Bon Etat Ecologique » (BEE).

²⁶ Dont la durée ne dépasse d'ailleurs actuellement pas 40 ans : le développement de projets marémoteurs impliquera sans doute des modifications réglementaires pour permettre des concessions plus longues

La directive décrit le bon état écologique BEE à travers 11 descripteurs, présentés en annexe 1 :

N°	Descripteur
D1	Diversité biologique
D2	Espèces non indigènes
D3	Espèces exploitées
D4	Réseau trophique marin
D5	Eutrophisation
D6	Intégrité des fonds marins
D7	Conditions hydrographiques
D8	Contaminants dans l'environnement
D9	Contaminants dans les produits de la mer
D10	Déchets marins
D11	Energie et bruit

La DCSSM donne aussi, à titre indicatif, une liste de caractéristiques, pressions et impacts (voir Annexes 2 et 3) qui peuvent être associés aux activités humaines. Il est intéressant d'utiliser autant que faire se peut cette typologie assez complète.

Caractéristiques

Caractéristiques physiques et chimiques
Types d'habitats
Caractéristiques biologiques
Autres caractéristiques

Pressions et impacts

Perte physique
Dommages physiques
Autres perturbations physiques
Interférences avec des processus hydrologiques
Contamination par des substances dangereuses
Rejet systématique et/ou intentionnel de substances
Enrichissement par des nutriments et des matières organiques
Perturbations biologiques

4.2.4 Typologie des régions susceptibles d'accueillir des projets marémoteurs

Il peut être intéressant de réfléchir à une éventuelle *typologie des environnements* dans les zones potentiellement favorables à l'implantation de projets marémoteurs.

Les projets marémoteurs ont vocation à s'implanter dans des zones où la dynamique associée est dominée par la marée ; mais cette situation peut correspondre à de très nombreux environnements-types, en Europe mais aussi dans de nombreuses autres régions du monde, caractérisés par des écosystèmes, habitats et espèces très divers.

Plutôt donc que de tenter de définir une typologie des écosystèmes marins et littoraux, on peut proposer une typologie en termes de **sensibilité** et de **valeur écologique** de ces écosystèmes :

- *Ecosystèmes « ordinaires »* : écosystèmes en bon état ou en état acceptable, de dimensions importantes vis-à-vis de celle des projets, ne renfermant pas d'habitats ou d'espèces particulièrement importants, ou dont le fonctionnement n'est pas susceptible d'être modifié autrement que localement par un projet marémoteur ;
- *Ecosystèmes exploités intensivement* : écosystèmes ordinaires, mais où se concentrent des activités importantes essentiellement dépendantes de l'environnement et potentiellement sensibles à ses changements : par exemple pêche, mais aussi sports nautiques (ex. : surf et vagues) ou tourisme littoral ;
- *Ecosystèmes de haute valeur* : renfermant des habitats ou des espèces dont la conservation est jugée importantes (par exemple au regard des directives NATURA 2000 « habitats » « oiseaux », de fonctionnalités écosystémiques : zones de reproduction, de migration...), et qui risqueraient d'être affectées notablement par un projet marémoteur
- *Ecosystèmes dégradés* : notamment par des activités humaines (activités maritimes : ex. : dragage, extractions, chalutage... ; aménagements littoraux, activités terrestres (ex : pollutions agricoles, industrielles, urbaines), déchets, ou le cas échéant par des phénomènes naturels (érosion...)

NB : cette typologie n'a comme seul objectif que de structurer l'analyse stratégique des incidences environnementales des projets marémoteurs.

4.3 Typologie des effets potentiellement associés aux projets marémoteurs

4.3.1 Analyse des effets

A partir de la typologie des projets marémoteurs, on peut identifier les effets potentiels suivants :

- Modification de l'amplitude et du marnage des marées
 - Forme du cycle
 - Durée de l'étalement (haute, basse)
 - Niveau maxi/mini au cours du cycle
 - Niveaux extrêmes
- Modification des courants dans les bassins et à proximité des infrastructures
 - Vitesse, direction
 - Distribution géographique des courants
 - Cycles de courant
- Modification des flux, des débits et volumes échangés
 - Eau de mer
 - Nutriments
 - Polluants
 - Eau douce/eau salée
- Modification de la salinité
- Modification de l'état de la mer dans les bassins et à proximité des infrastructures (vagues, houle)
- Modifications du transport sédimentaire dans les bassins et à proximité des infrastructures
- Modification de la bathymétrie dans les bassins et à proximité des infrastructures
 - Remblais, déblais lors de la construction de l'ouvrage
 - Variations au cours de la vie du projet

- Vagues et houle : modifications permanentes, modification pendant une partie du cycle
- Modification des fonds (nature, profondeur) dans les zones d'extraction des matériaux marins utilisés pour la construction des infrastructures
- Création d'obstacles maritimes
 - De la faune et de la flore
 - Des navires
- Création de connexions nouvelles
 - Terrestres : ponts...
 - Maritimes : canaux...
- Bruit (extraction de matériaux ; phase de construction ; turbines en fonctionnement, démantèlement éventuel)

On considère à ce stade que *seuls les effets physiques sont notables*, les matériaux et systèmes utilisés dans les projets marémoteurs n'étant pas susceptibles d'entraîner des effets chimiques ou biologiques directs à grande échelle. Ce point de vue peut-être discuté (ex : antifoulings et substances biocides utilisées pour éviter les salissures d'origine biologique, ou dispositifs antocorrosion : anodes consommables).

4.3.2 Evaluation préliminaire des effets potentiels

Pour chacun des types de projet marémoteur considérés, on a essayé d'évaluer l'importance des effets sur une échelle allant de 0 (effet limité ou nul) à +++ (effet très important) (/ : non évalué ; + : notable ; ++ : important).

Les tableaux ci-dessous présentent, soit à dire d'expert, soit à partir des études d'impact (*ex ante* ou *ex post*) disponibles, la description sommaire des effets et une estimation de leur importance.

Projet en estuaire

EFFET	Evaluation
Amplitude et marnage	Modification importante à très importante du cycle de marée et du marnage dans l'estuaire (++ à +++)
Courants	Modifications importantes à très importantes des courants dans l'estuaire (intensité, cycle, distribution) (++ à +++)
Flux et débits	Modifications notables à importantes des flux (+ à +++)
Salinité	Modification importante de la salinité dans l'estuaire (++)
Etat de mer	Modification très importante (pas de propagation des vagues et de la houle) (+++)
Transport sédimentaire	Effet très important sur le transport sédimentaire (blocage) (+++)
Bathymétrie	Modification notable (sédimentation) (+)
Obstacles	Effet très important - Création d'un obstacle physique permanent (+++)
Connexions	Création d'une connexion routière entre les rives de l'estuaire (+++)
Bruit	Bruit notable au moment des travaux, faible en phase d'exploitation (0 à +)

Lagon offshore ou côtier

EFFET	Evaluation
Amplitude et marnage	Modification importante du cycle de marée et du marnage dans le lagon (++)
Courants	Modifications notables des courants au voisinage des passes, faibles à l'extérieur (intensité, cycle, distribution) (+)
Flux et débits	Modifications notables ou importantes des flux (+ à ++)
Salinité	Pas de modification ou modification faible de la salinité dans le lagon (0) (sauf cas de projet implanté en voisinage d'estuaire (++)
Etat de mer	Modification importante (propagation des vagues et de la houle) (++)
Transport sédimentaire	Effet faible ou nul sur le transport sédimentaire hors lagon (0), notable à important dans le lagon (++)
Bathymétrie	Modification notable dans le lagon (+) (sédimentation) – Très importante si matériaux dragués dans le lagon (++) , importante si dragage hors lagon
Obstacles	Obstacle physique permanent pour les espèces et les flux (++)
Connexions	Pas de création de connexion pour la biodiversité (0) mais pour les humains (++)
Bruit	Bruit notable au moment des travaux, faible ou nul en phase d'exploitation (0 à +)

A ce stade, on peut appeler l'attention sur les points suivants :

- Effets liés à l'extraction de matériaux marins : pour des raisons techniques et économiques, la plupart des projets envisagent que la construction des digues utilise des matériaux marins extraits par dragage (techniquement et économiquement, l'extraction sur place est généralement la solution préférée, et elle permet d'augmenter la capacité des bassins si les matériaux y sont extraits); ces effets peuvent entraîner des incidences environnementales importantes pour plusieurs descripteurs de l'environnement, mais qui peuvent concerner des zones relativement éloignées du projet si les matériaux ne sont pas extraits sur place ;
- Le nombre, la disposition et le type d'ouvertures dans les digues (portes, écluses, turbines classiques, chenaux et hydroliennes) ont probablement une influence importante, et les incidences associées sont difficiles à caractériser pour une situation type.

4.4 Incidences potentielles

Les *effets* associés aux projets (physiques, chimiques...) peuvent entraîner des *incidences environnementales*, c'est-à-dire des changements significatifs de l'environnement.

La méthode retenue pour évaluer ces incidences potentielles consiste à évaluer pour chacun des descripteurs de l'environnement (voir 4.2.3.2) l'importance des incidences potentiellement associées à chacun des effets possibles des projets marémoteurs.

4.4.1 Incidences potentielles en fonction des descripteurs environnementaux

A partir de la connaissance des effets associés à chaque type de projet marémoteur, il est possible soit à dire d'expert, soit sur la base des études existantes, notamment les études d'impact des projets en cours, le plus souvent études « *ex ante* », avant la réalisation du projet, plus rarement (La Rance) études « *ex post* » des incidences d'un projet déjà réalisé, de qualifier l'importance des incidences pour chacun des descripteurs environnementaux (descripteurs 1 à 11 de la DCSMM).

Seule l'importance des changements potentiels est ici évaluée, et non le caractère « positif » ou « négatif » de ces changements, qui nécessiterait une analyse détaillée de la situation de la zone du projet par rapport aux objectifs de « Bon Etat Ecologique » et des incidences sur ce BEE ; cette qualification n'est possible qu'au stade de l'étude d'impact du projet, et non à ce stade d'analyse stratégique.

Le tableau ci-dessous résume pour le cas des projets de lagon côtier (lagon marémoteur connecté au trait de côte) le résultat de cette évaluation préliminaire sommaire (3 niveaux d'incidences seulement sont considérés)

Tableau 1 - Echelle des intensités des effets

Négligeable ou nul	-
Notable	+
Important	++

Même sommaire, cette évaluation met en évidence le fait que *les incidences les plus importantes sont directement associées aux objectifs mêmes du projet*, puisqu'elles sont liées directement aux effets recherchés (modification des flux hydrodynamiques pour capter de l'énergie). Leur réduction conduirait donc inéluctablement à réduire les ambitions du projet en termes de production d'énergie. Ce point est illustré par la colonne « flux et débits », caractérisée par des incidences importantes sur pratiquement tous les descripteurs de l'environnement, alors que l'objectif même du projet est la modification des flux pour y capter l'énergie. C'est aussi le cas pour la colonne « obstacles », associée ici à la construction d'une digue isolant un bassin intérieur, qui entraîne nécessairement de profonds changements environnementaux. Ce dernier exemple permet d'illustrer la possibilité d'incidences positives : si la position des ouvertures des digues est bien choisie (par exemple loin des sources de pollution), cet obstacle peut permettre de réduire de manière importante les flux de polluants et de déchets dans le lagon.

Tableau 2 - Projet marémoteur de type "Lagon côtier" - Effets et incidences sur l'environnement : évaluation préliminaire

Effet Descripteur	Amplitude marnage (++)	Courants (+)	Flux et débits (+ à ++)	Salinité (0 à ++)	Etat de mer (++)	Transport sédimen- taire (+)	Bathymétrie (+) ²⁷	Obstacles (++)	Connexions (0)	Bruit
1 - Diversité biologique	++	++	++	++	+	+	+	++	-	-
2 - Espèces non indigènes	+	+	+	+	+	-	-	++	-	-
3 - Espèces exploitées	++	++	++	++	+	+	+	++	-	-
4 - Réseau trophique marin	++	+	++	++	+	+	+	++	-	+
5 Eutrophisation	+	+	++	-	-	-	-	+	-	-
6 - Intégrité des fonds marins	++	+	+	-	+	++	+	+		-
7 - Conditions hydrographiques	++	++	++	++	++	+	++	++	-	-
8 -Contaminants dans l'environnement	-	+	++	-	-	-	-	++	-	-
9 -Contaminants dans les produits de la mer	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-
10 - Déchets marins	-	+	++	-	+	-	-	++	-	-
11 - Energie et bruit	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-

²⁷ Matériaux de construction extraits en mer, dans le lagon ou en dehors (+)

4.4.2 Incidences en fonction du type d'écosystème

Sur la base de la typologie esquissée plus haut des écosystèmes dans les zones d'implantation potentielle des projets marémoteurs, on peut analyser sommairement les incidences potentielles de ces projets sur chaque type.

Tableau 3 - Incidences potentielles des projets marémoteurs

Type d'écosystème	Haute valeur	Ordinaire	Exploité intensivement	Dégradé
Incidences négatives	Risques de destruction d'habitats, de rupture des équilibres écologiques et de perte de fonctions écosystémiques	Impacts modérés sur l'environnement et sur les activités qui en dépendent	Impacts environnementaux modérés, socio-économiques importants sur les activités intensives dépendant de ces écosystèmes (ex. pêche)	Peu d'incidences négatives
Incidences positives	Protection contre activités humaines, pollutions, espèces envahissantes	Contribution à la régulation des activités impactantes, soutien à la transition	Contribution à la régulation des activités impactantes, soutien à la transition vers d'autres pratiques	Contrôle des pressions (activités, pollutions), possibilités d'actions de réhabilitation (confinement)

Les conclusions de cette analyse sommaire en termes de stratégie d'implantation sont les suivantes :

- Zones NATURA 2000 : il semble préférable d'éviter l'implantation des premiers projets marémoteurs (notamment les projets pilotes) dans des zones à *haute valeur écologique*, telles que les zones NATURA 2000 classées au titre de la directive « Habitats – faune - flore²⁸ » ; mais il existe peut-être des zones où des projets marémoteurs pourraient contribuer à protéger ces zones de menaces et de risques sérieux (ex : effets des pollutions terrestres, ou d'activités maritimes comme le dragage) ;
- A ce niveau de l'évaluation stratégique, rien ne justifie d'exclure a priori les parcs naturels marins²⁹ au regard des enjeux environnementaux : l'évaluation sur ce critère doit prendre en compte les caractéristiques et enjeux locaux, et les écosystèmes concernés ;
- Rien ne s'oppose sur le principe à l'implantation de projets marémoteurs dans les zones « ordinaires » où les effets du projet entraîneraient surtout des incidences locales ; dans les zones de ce type où l'écosystème est intensivement exploité (par exemple par la pêche), les impacts socio-économiques associés aux changements de l'écosystème et des modalités d'accès à ces zones devraient être compensés ;
- Il y aurait peu d'inconvénients sur le principe, et potentiellement on pourrait attendre des bénéfices notables, de l'implantation d'un projet dans des zones où l'environnement est très

²⁸ Directive 92/43/CEE

²⁹ Créés (Code de l'environnement, art. L334-3) « pour contribuer à la connaissance du patrimoine marin ainsi qu'à la protection et au développement durable du milieu marin »

dégradé, à condition que la réhabilitation de ces zones constitue un des objectifs prioritaires du projet.

4.4.3 Risques naturels

De nombreuses régions côtières sont exposées à des risques naturels liés directement ou indirectement à la mer : érosion côtière, submersions marines, inondations de zones basses aggravées par les phénomènes de surcote. L'importance de ces risques croît avec l'augmentation de l'aléa (« littoralisation » croissante des activités et de l'habitat) et avec l'augmentation de la probabilité d'occurrence d'événements extrêmes liée au changement climatique (tempêtes..), et de leur amplitude (élévation du niveau de la mer).

Ces risques concernent la *sécurité* et l'*économie* des régions concernées, mais aussi l'*environnement* lui-même : des écosystèmes fragiles peuvent ainsi être endommagés ou détruits à la suite d'événements extrêmes (ex : dunes), ou de leurs conséquences directes ou indirectes (ex. : colmatage, pollutions maritimes).

Sauf événement géologique majeur (par exemple tsunami associé à l'activité sismique ou à un glissement de terrain sous-marin), les **submersions marines** sont associées à des phénomènes de surcote d'origine météo-océanique (onde de tempête, effets de la houle...) éventuellement aggravés par des marées importantes

- En réduisant l'amplitude de la plupart des phénomènes générateurs (amplitude la marée, houle...), et donc des submersions associées, les projets marémoteurs peuvent contribuer notablement à la protection de l'environnement littoral.

L'érosion côtière est un enjeu important pour la sécurité des populations, mais aussi pour la préservation de certains écosystèmes importants (dunes...). L'érosion est aggravée par le changement climatique à grande échelle (élévation du niveau de la mer) mais aussi à l'échelle locale (modifications de la dynamique sédimentaire, exposition à la houle...).

- En réduisant les surcotes et les effets de la houle, les projets marémoteurs peuvent permettre de *réduire les effets de l'érosion côtière* et/ou de protéger les écosystèmes ou les habitats sensibles qu'elle menace.

Au bilan, il pourrait y avoir des bénéfices environnementaux à implanter un projet marémoteur dans une *zone où les risques littoraux sont très élevés et où les menaces concernent des écosystèmes littoraux fragiles ou importants*.

4.5 Mesures d'évitement, de réduction, de compensation

En matière d'incidences sur l'environnement, la doctrine (et désormais la loi) met en avant la démarche « ERC », Eviter, Réduire, Compenser, mesures appliquées dans cet ordre.

- « **Eviter** » vise à concevoir dès le début les projets (les filières ou les projets génériques, dans le cadre de cette évaluation stratégique) de manière à éviter des impacts potentiels, par exemple en choisissant des options techniques qui font disparaître ou rendent négligeables

des effets potentiellement associés à des incidences, ou en choisissant des sites où du fait des conditions environnementales ces effets ne sont pas susceptibles d'entraîner des incidences. L'évitement concerne tout particulièrement les enjeux environnementaux majeurs

- « **Réduire** » vise à réduire les incidences inévitables, par exemple en réduisant l'intensité ou l'extension géographique d'un effet, ou en le concentrant sur une zone où les enjeux environnementaux sont plus faibles, de manière à parvenir à *un coût acceptable* à des impacts résiduels les plus faibles possibles
- « **Compenser** » : les mesures compensatoires doivent viser à maintenir voire à améliorer la qualité environnementale des milieux naturels concernés à l'échelle territoriale pertinente (et ne peuvent donc être des mesures à finalité sociale ou économique).

Le ministère chargé de l'environnement a publié en janvier 2017 un guide générique sur la mise en œuvre de l'approche ERC³⁰ (*Évaluation environnementale - Guide d'aide à la définition des mesures ERC*) dont l'essentiel des recommandations peuvent s'appliquer aux projets marémoteurs, bien que le guide vise essentiellement les projets terrestres.

4.5.1 Evitement

Les mesures d'évitement relèvent principalement de trois approches principales :

- Evitement lors du *choix d'opportunité*, qui concerne essentiellement la décision de faire ou ne pas faire le projet ; en l'espèce, le choix pourrait consister à choisir une autre filière de production d'énergie renouvelable que le marémoteur : il ne sera donc pas développé ici... ;
- Evitement *géographique*, où les incidences majeures sont évitées par le choix de la localisation du projet. Une grande part des mesures d'évitement dans ce domaine devraient pouvoir être portées par la *planification stratégique*, qui devrait exclure le développement de projets marémoteurs (tous, ou certains types) dans les zones où des incidences majeures sont probables ; au niveau du projet, il reste encore des possibilités d'évitement dans ce domaine (es : localisation exacte ou conception du projet) ;
- Enfin, l'évitement *technique*, qui repose sur le choix des options techniques.

L'évitement d'opportunité devrait être porté au moins en partie par la planification stratégique de l'énergie, au niveau national (PPE) et régional (plans et schémas).

La planification stratégique maritime et littorale (Stratégie Nationale pour la Mer et le Littoral, SNML et Documents Stratégiques de Façade (DSF), peut porter au niveau stratégique les principales mesures d'évitement géographique, en définissant les zonages pertinents (par exemple « zones interdites » aux projets marémoteurs, « zones favorables », « zones possibles sous condition »), ou les critères applicables à ce zonage.

L'essentiel des mesures d'évitement technique relèvent du projet lui-même et des choix techniques associés.

30

<http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9matique%20-%20Guide%20d%E2%80%99aide%20%C3%A0%20la%20d%C3%A9finition%20des%20mesures%20ERC.pdf>

4.5.2 Réduction

Les mesures de réduction sont mises en œuvre au niveau du projet.

Leur champ est limité : les principales incidences (notamment sur les descripteurs associés aux écosystèmes et à leur fonctionnement : D1, D3, D4...) sont liées à des effets directement liés à la technique de production elle-même, et les mesures de réduction risquent d'être associées à des incidences du second ordre par rapport au premier ordre de ces effets.

Ceci n'exclut pas évidemment d'explorer la gamme des mesures de réduction envisageables, telles que (liste purement indicative, qui ne préjuge pas de leur faisabilité technique ou économique) :

- Conduite des travaux en évitant les périodes de sensibilité particulière de l'environnement ;
- Utilisation de matériaux d'origine terrestre ou de matériaux marins prélevés dans une zone maritime peu sensible ;
- Choix de modes de fonctionnement limitant les incidences négatives (ouverture de portes, fonctionnement des turbines, variation du niveau et niveaux extrêmes dans le lagon³¹...) : voir chapitre 3.

Néanmoins, la conclusion de cette analyse « stratégique » sommaire (qui rejoint les conclusions des études d'impact des projets étudiés ou développés, qu'il s'agisse d'évaluations « ex ante » lors des études d'impact, ou « ex post » après quelques années ou quelques décennies de fonctionnement (la Rance) est la suivante : même si la zone d'implantation d'un projet marémoteur a été choisie soigneusement en évitant les régions sensibles, les *impacts résiduels du projet* (en tenant compte *des mesures de réduction*) resteront importants. Il n'est pas envisageable de développer un projet marémoteur de quelque importance sans accepter une **empreinte environnementale importante**.

4.5.3 Compensation

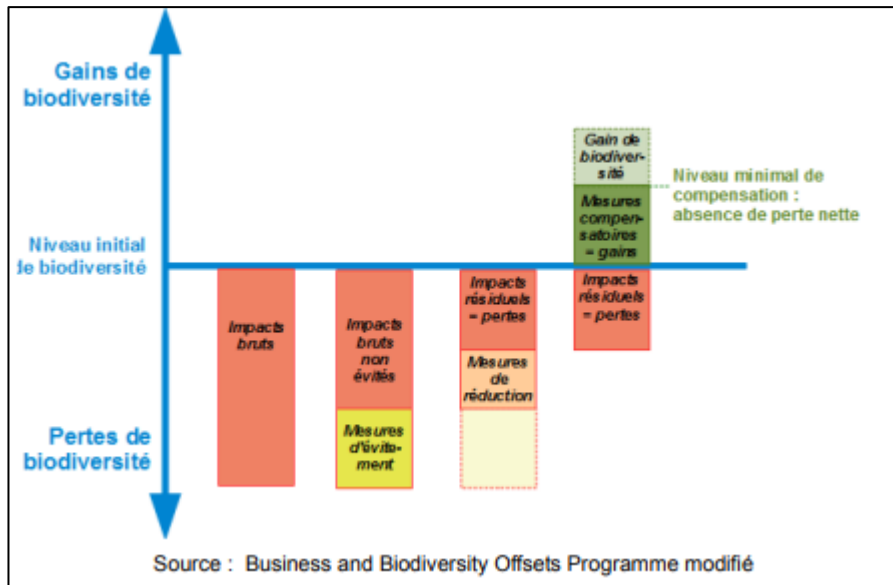
La réglementation définit ainsi les mesures compensatoires :

« Les mesures compensatoires ont pour objet d'apporter une contrepartie aux effets négatifs notables, directs ou indirects du projet qui n'ont pu être évités ou suffisamment réduits. Elles sont mises en œuvre en priorité sur le site endommagé ou à proximité de celui-ci afin de garantir sa fonctionnalité de manière pérenne. Elles doivent permettre de conserver globalement et, si possible, d'améliorer la qualité environnementale des milieux ».

Ces mesures doivent être mises en œuvre en respectant :

- *l'équivalence écologique avec la nécessité de « compenser dans le respect de leur équivalence écologique » ;*
- *l'« objectif d'absence de perte nette voire de gain de biodiversité », illustré par la figure suivante*

³¹ Par exemple, le respect des cycles de marée originaux, moyennant un simple déphasage par rapport à l'extérieur



- la proximité géographique avec la priorité donnée à la compensation « sur le site endommagé ou, en tout état de cause, à proximité de celui-ci afin de garantir ses fonctionnalités de manière pérenne » ;
- l'efficacité avec « l'obligation de résultats » pour chaque mesure compensatoire ;
- la pérennité avec l'effectivité des mesures de compensation « pendant toute la durée des atteintes ».

Précisément du fait de leur *forte empreinte environnementale*, les projets marémoteurs pourraient contribuer à la réhabilitation de milieux marins dégradés. Néanmoins, compte tenu des faibles connaissances existant à ce jour en matière de compensation environnementale en milieu marin, il conviendrait évidemment d'adopter en l'espèce une approche de précaution, par exemple en réservant cette approche à des *zones très dégradées* et où un projet marémoteur présenterait un potentiel notable d'amélioration (par exemple en zone côtière exposée à des pollutions importantes d'origine terrestre, ou des activités maritimes impactantes).

La *réduction des risques naturels* (voir plus haut) peut aussi participer des mesures de compensation environnementale.

Comme évoqué plus haut (typologie des zones d'implantation possible), il existe en effet un certain nombre de zones maritimes notamment côtières où l'environnement marin est particulièrement dégradé, généralement du fait d'activités terrestres (ex : pollutions d'origine agricole, industrielle ou urbaine), d'aménagements littoraux ou d'activités maritimes. Dans de telles zones, des incidences importantes ne sont pas nécessairement synonymes de dégradation, mais au contraire elles peuvent être mises à profit pour *réhabiliter un environnement déjà dégradé*, et se rattachent alors au volet « compensation » de la séquence ERC.

4.6 Synthèse, conclusions

De cette étude sommaire et incomplète des incidences environnementales des projets marémoteurs, il ressort un certain nombre de conclusions.

- 1) Quelle que soit la solution technique retenue, un projet marémoteur reste un projet majeur qui modifiera en profondeur et pour très longtemps l'environnement marin dans un grand nombre de ses composantes dans l'emprise du projet et à ses environs ;
- 2) Le retour à l'état initial ne peut pas raisonnablement être imposé dans le cahier des charges : ce retour est impossible à garantir, pas plus qu'il n'est possible de prédire l'état de l'environnement au voisinage du projet à l'issue d'une exploitation qui pourrait dépasser le siècle ;
- 3) Dans l'application de la séquence « ERC » :
 - la *planification stratégique* est essentielle en termes d'évitement, en permettant d'identifier (EES) et d'éviter les zones où les enjeux environnementaux sont incompatibles avec un projet marémoteur ;
 - les possibilités de *réduction des incidences* environnementales existent, mais elles sont *limitées*, à moins de réduire très notablement les capacités de production énergétique ;
 - il existe de *nombreuses possibilités de compensation*, du fait justement que le projet peut apporter des modifications importantes mais contrôlées de l'environnement ; elles peuvent concerner la protection (risques : érosion, submersions marines, biodiversité...) ;
- 4) Par rapport aux projets maritimes moins structurants, un projet marémoteur permet potentiellement de créer un *environnement très modifié* (lagon peu connecté, flux contrôlés). Il existe d'ores et déjà des zones littorales où l'environnement a été profondément anthropisé et où les écosystèmes sont très appauvris, et l'implantation d'un projet marémoteur dans une telle zone peut permettre d'envisager une réhabilitation de l'écosystème, qui pourrait finalement être plus riche et en meilleure santé que l'écosystème initial avant projet.

Au plan de l'environnement, une fois exclues les *zones interdites* et identifiées les *zones favorables* à la production d'énergie marémotrice, il y aurait donc sans doute intérêt, plutôt que de rechercher les zones d'implantation où les incidences seraient limitées, à viser les zones où les projets peuvent entraîner des incidences positives pour l'environnement et les enjeux associés (risques littoraux, activités humaines)

4.7 Annexes

4.7.1 Liste des descripteurs de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM)

Descripteurs qualitatifs servant à définir le bon état écologique

Descripteur		
1	Diversité biologique	La diversité biologique est conservée. La qualité des habitats et leur nombre, ainsi que la distribution et l'abondance des espèces sont adaptées aux conditions physiographiques, géographiques et climatiques existantes.
2	Espèces non indigènes	Les espèces non indigènes introduites par le biais des activités humaines sont à des niveaux qui ne perturbent pas les écosystèmes.
3	Espèces exploitées	Les populations de tous les poissons et crustacés exploités à des fins commerciales se situent dans les limites de sécurité biologique, en présentant une répartition de la population par âge et par taille qui témoigne de la bonne santé du stock.
4	Réseau trophique marin	Tous les éléments constituant le réseau trophique marin, dans la mesure où ils sont connus, sont présents en abondance et diversité normales et à des niveaux pouvant garantir l'abondance des espèces à long terme et le maintien total de leurs capacités reproductives.
5	Eutrophisation	L'eutrophisation d'origine humaine, en particulier pour ce qui est de ses effets néfastes, tels que l'appauvrissement de la biodiversité, la dégradation des écosystèmes, la prolifération d'algues toxiques et la désoxygénation des eaux de fond, est réduite au minimum.
6	Intégrité des fonds marins	Le niveau d'intégrité des fonds marins garantit que la structure et les fonctions des écosystèmes sont préservées et que les écosystèmes benthiques, en particulier, ne sont pas perturbés.
7	Conditions hydrographiques	Une modification permanente des conditions hydrographiques ne nuit pas aux écosystèmes marins.
8	Contaminants	Le niveau de concentration des contaminants ne provoque pas d'effets dus à la pollution.
9	Questions sanitaires	Les quantités de contaminants présents dans les poissons et autres fruits de mer destinés à la consommation humaine ne dépassent pas les seuils fixés par la législation communautaire ou autres normes applicables.
10	Déchets marins	Les propriétés et les quantités de déchets marins ne provoquent pas de dommages au milieu côtier et marin.
11	Energie et bruit	L'introduction d'énergie, y compris de sources sonores sous-marines, s'effectue à des niveaux qui ne nuisent pas au milieu marin.

4.7.2 Liste indicative de caractéristiques, pressions et impacts (source : DCSMM)

Tableau 1

Caractéristiques

Caractéristiques physiques et chimiques	- Topographie et bathymétrie des fonds marins - Régime annuel et saisonnier de température et couverture de glace, vitesse du courant, remontée des eaux, exposition aux vagues, caractéristiques de mixage, turbidité, temps de résidence - Répartition spatio-temporelle de la salinité - Répartition spatio-temporelle des nutriments (DIN, TN, DIP, TP, TOC) et de l'oxygène - Profils de pH et de pCO₂, ou information équivalente permettant de mesurer l'acidification du milieu marin
Types d'habitats	- Type(s) d'habitat(s) dominant(s) des fonds marins et de la colonne d'eau et description des caractéristiques physiques et chimiques, telles que profondeur, régime de température de l'eau, circulation des courants et autres masses d'eau, salinité, structure et composition des substrats du fond marin - Recensement et cartographie des types d'habitats particuliers, notamment ceux que la législation communautaire (directive «Habitats» et directive «Oiseaux») ou les conventions internationales reconnaissent ou définissent comme présentant un intérêt particulier du point de vue de la science ou de la diversité biologique - Habitats qui méritent une mention particulière en raison de leurs caractéristiques, de leur localisation ou de leur importance stratégique. Il peut s'agir de zones soumises à des pressions extrêmes ou spécifiques ou de zones qui nécessitent un régime de protection spécifique
Caractéristiques biologiques	- Description des communautés biologiques associées aux habitats dominants des fonds marins et de la colonne d'eau : cette description devrait comprendre des informations sur les communautés de phytoplancton et de zooplancton, y compris les espèces, et la variabilité saisonnière et géographique - Informations sur les angiospermes, macroalgues et la faune invertébrée benthique, y compris la composition taxinomique, la biomasse, et la variabilité annuelle/saisonnière - Informations sur la structure des populations ichtyologique, y compris l'abondance, la répartition et la structure âge/taille des populations - Description de la dynamique des populations, de l'aire de répartition naturelle et réelle et du statut des espèces de mammifères et de reptiles marins présentes dans la région/sous-région marine - Description de la dynamique des populations, de l'aire de répartition naturelle et réelle et du statut des espèces d'oiseaux marins présentes dans la région/sous-région marine - Description de la dynamique des populations, de l'aire de répartition naturelle et réelle et du statut des autres espèces présentes dans la région/sous-région marine qui sont couvertes par

	la législation communautaire ou par des accords internationaux - Relevé détaillé de l'évolution temporelle, de l'abondance et de la répartition spatiale des espèces non indigènes, exotiques ou, le cas échéant, de formes génétiquement distinctes d'espèces indigènes présentes dans la région/sous-région marine
Autres caractéristiques	- Description de la situation en ce qui concerne les substances chimiques, y compris les substances chimiques problématiques, la contamination des sédiments, les points chauds, les questions sanitaires et la contamination des biotes (en particulier des biotes destinés à la consommation humaine) - Description de toute autre particularité ou caractéristique typique ou distinctive de la région ou sous-région marine

Tableau 2

Pressions et impacts

Perte physique	- Étouffement (par exemple, par la mise en place de structures anthropiques ou l'évacuation de résidus de dragage) - Colmatage (dû, par exemple, à des constructions permanentes)
Dommages physiques	- Modifications de l'envasement (dues par exemple à des déversements, à une augmentation des ruissellements ou au dragage/à l'évacuation de résidus de dragage) - Abrasion (due par exemple à l'impact sur les fonds marins de la pêche commerciale, de la navigation, du mouillage) - Extraction sélective (due par exemple à l'exploration et à l'exploitation de ressources biologiques et non biologiques sur les fonds marins et dans le sous-sol)
Autres perturbations physiques	- Sonores sous-marines (dues, par exemple, au trafic maritime et aux équipements acoustiques sous-marins) - Déchets marins
Interférences avec des processus hydrologiques	- Modifications importantes du régime thermique (dues par exemple à des déversements des centrales électriques) - Modifications importantes du régime de salinité (dues par exemple à la présence de constructions faisant obstacle à la circulation de l'eau, ou au captage d'eau)
Contamination par des substances dangereuses	- Introduction de composés synthétiques (par exemple substances prioritaires visées dans la directive 2000/60/CE présentant un intérêt pour le milieu marin, telles que pesticides, agents antisalissures, produits pharmaceutiques issus par exemple de pertes provenant de sources diffuses, de la pollution des navires et de l'exploration et de l'exploitation pétrolière, gazière et minérale ou de retombées atmosphériques) et substances biologiquement actives - Introduction de substances et de composés non synthétiques (par exemple métaux lourds, hydrocarbures provenant par exemple de la pollution des navires et de l'exploration et de l'exploitation pétrolière, gazière et minérale, retombées atmosphériques, apports fluviaux) - Introduction de radionucléides
Rejet systématique et/ou intentionnel de	- Introduction d'autres substances, qu'elles soient solides, liquides ou gazeuses, dans les eaux marines, du fait de leur rejet systématique

substances	et/ou intentionnel dans le milieu marin, autorisé conformément à d'autres actes communautaires et/ou aux conventions internationales
Enrichissement par des nutriments et des matières organiques	- Apports d'engrais et d'autres substances riches en azote et en phosphore (par exemple émanant de sources ponctuelles et diffuses, y compris l'agriculture, l'aquaculture, les retombées atmosphériques) - Apports en matières organiques (par exemple égouts, mariculture, apports fluviaux)
Perturbations biologiques	- Introduction d'organismes pathogènes microbiens - Introduction d'espèces non indigènes et translocations - Extraction sélective d'espèces, y compris les prises accidentelles et accessoires (due à la pêche commerciale et récréative par exemple)

5 OPPORTUNITES MULTI-USAGES

5.1 Résumé exécutif

Les projets marémoteurs interagissent fortement avec l'environnement socio-économique de la région où ils sont développés : non seulement avec *l'environnement maritime* (interactions avec les activités maritimes s'exerçant sur le même espace et les usagers qui les pratiquent), mais aussi *l'environnement marin et littoral* dans son ensemble (interactions directes ou indirectes avec le cadre de vie et les activités touristiques, par exemple). En fonction notamment du type de projet (ex : en estuaire, lagon raccordé au trait de côte, lagon isolé...) et du type d'activité socio-économique considéré (maritime ou terrestre, existante ou future), ces interactions peuvent être positives (synergies), neutres ou négatives.

L'intégration des projets marémoteurs dans un territoire littoral dépend par ailleurs de sa capacité à répondre aux attentes des populations littorales, ou à leur proposer un projet stratégique auquel elles puissent adhérer. En effet, quel que soit son type, un projet marémoteur constitue un élément structurant du paysage socio-économique du territoire.

L'analyse des interactions potentielles entre territoire et projet marémoteur montre qu'au plan socio-économique le bilan est globalement positif, avec des impacts négatifs potentiels, surtout sur des activités existantes (comme la pêche professionnelle), susceptibles d'être atténués ou même compensés par des évolutions raisonnables, et des synergies et surtout des possibilités accrues de développement de « l'économie bleue » et du *capital maritime* territorial susceptible d'attirer de nouvelles activités.

Finalement, il apparaît que les principaux obstacles potentiels de nature socio-économique à l'implantation d'un projet marémoteur sont liés à sa relation au territoire ; un projet à finalité essentiellement énergétique porté par un acteur extérieur au territoire serait exposé à un risque fort de rejet, alors qu'un projet porté par le territoire lui-même, répondant à des attentes concrètes de sa population et développé avec elle, serait très probablement plus facilement approprié et porté par les acteurs locaux, pour peu qu'il leur apporte des bénéfices concrets et mesurables.

De cette analyse, on peut conclure que :

- Il ne semble pas exister en France de risque de conflit fondé sur des impacts socio-économiques objectifs importants et incontournables³² ; toutes les activités potentiellement impactées peuvent évoluer avec un soutien modéré, ou être relocalisées
- compte tenu de son caractère très structurant, ce type de projet ne peut être porté que par le territoire qui l'accueille, et non par un acteur extérieur ou même par l'Etat ;
- ceci implique que le projet intègre dès sa conception les enjeux territoriaux importants (ex : risques littoraux...) et ou socio-économiques (synergies, co-développement, production de valeur locale).

³² Ceci n'exclut pas, comme le montre l'expérience des parcs éoliens offshore, des oppositions systématiques par des acteurs socio-économiques, mais souvent pour des raisons plus sociales qu'économiques

Par ailleurs, il est indispensable pour permettre l'émergence de projets sur les territoires d'en avoir envisagé ou planifié le développement dans les politiques nationales pertinentes (en particulier bien entendu dans la politique énergétique et la programmation pluriannuelle de l'énergie, et dans la stratégie nationale pour la mer et le littoral) ainsi que dans leurs déclinaisons territoriales (plans et *schémas régionaux* pour l'énergie, *documents stratégiques de façade* pour la mer et le littoral) ; il est aussi indispensable que des débats publics préalables (incluant l'exploitation du potentiel marémoteur) aient eu lieu à ces niveaux.

Enfin, par la *variété des enjeux* qu'ils peuvent concerner et la *diversité des projets* maritimes et littoraux qu'ils peuvent porter, soutenir ou accompagner, les projets marémoteurs (particulièrement les projets basés sur un lagon littoral) s'inscrivent parfaitement dans la nouvelle dynamique de l'économie bleue, qui vise à valoriser notamment pour les territoires littoraux les ressources marines et l'espace maritime.

Il semble que les instruments existants tant d'ingénierie territoriale que d'ingénierie financière permettent d'envisager ce type de partenariat public-privé, afin de permettre à ce type de projet structurant et ambitieux techniquement et institutionnellement de bénéficier du meilleur des deux mondes : capacité des *acteurs territoriaux* à fédérer les acteurs locaux autour d'un projet à finalités multiples, capacité des *acteurs techniques* à conduire des projets complexes, capacité des *instruments financiers* à porter des projets de long terme et très coûteux mais qui garantissent des rendements raisonnables avec des risques faibles.

Recommandations :

- Intégrer les potentiels associés au nouveau marémoteur dans les projets de *planifications stratégiques* de l'énergie (PPE) et de la mer et du littoral (SNML, DSF), et conduire une *évaluation environnementale stratégique* (EES) et un *débat public* sur ces projets ;
- Soutenir un *projet pilote dans une région volontaire* : projet porté par les collectivités concernées, associant largement les populations et les acteurs potentiellement concernés, en *partenariat avec des acteurs techniques et financiers*, conçu pour répondre à la fois à des *enjeux importants du territoire* (risques et/ou développement économique) et aux besoins de *production d'énergie* ;
- Au-delà des enjeux énergétiques et locaux, ce projet devrait être conçu comme un *projet pilote pour le développement de l'économie bleue* visant à maximiser les bénéfices potentiels pour le territoire de cette infrastructure majeure.

5.2 Introduction

5.2.1 Objectifs de l'étude

Cette étude vise à évaluer les interactions entre les futurs projets marémoteurs « nouvelle génération » et les activités maritimes et terrestres, et à formuler des recommandations pour valoriser au mieux les synergies possibles en vue de favoriser au minimum l'acceptation des projets, et si possible la co-construction de projets multi-usages.

L'étude se situe au niveau stratégique des projets génériques : aucun projet spécifique (site, technologie) n'est analysé, l'étude vise à formuler des recommandations pour optimiser la prise en compte des enjeux économiques et sociaux dans le choix, la conception, la réalisation et l'exploitation des projets marémoteurs.

Les objectifs particuliers sont les suivants :

- évaluer les *incidences* potentielles des projets marémoteurs sur les activités maritimes et littorales existantes et futures
- identifier les *incidences négatives* potentielles et les mesures susceptibles de les éviter, les réduire ou les compenser ;
- identifier les *incidences positives* et les mesures susceptibles de créer ou renforcer des synergies avec d'autres activités, à l'échelle du projet ou du territoire (projets multi-usages, contribution à un projet de territoire ;
- évaluer l'acceptabilité des filières et des projets au regard de ces impacts et synergies/bénéfices potentiels ;
- évaluer les problèmes potentiels d'acceptation des filières et des projets par les décideurs, les acteurs économiques et la population ;
- formuler des recommandations sur ces points.

5.2.2 Approche choisie

L'approche adoptée est la suivante :

- à partir de la typologie des projets (§3.2) et des modes de fonctionnement associés (§3.4), une liste générique d'interactions potentielles a été établie, accompagnée d'une évaluation « stratégique » sommaire des types d'impacts positifs et négatifs qui pourraient être associées à ces interactions
- une liste d'activités susceptibles (par leur localisation ou leurs pratiques) d'entrer en interaction avec ces projets est établie
- une fiche spécifique à chaque activité a été établie pour recenser :
 - les interactions spécifiques pour cette activité, en fonction du type de projet
 - les impacts potentiels
 - les synergies potentielles
 - les approches susceptibles de permettre de minimiser les interactions (si possible), de limiter les impacts potentiels (si les interactions sont inévitables) et de promouvoir les synergies potentielles.

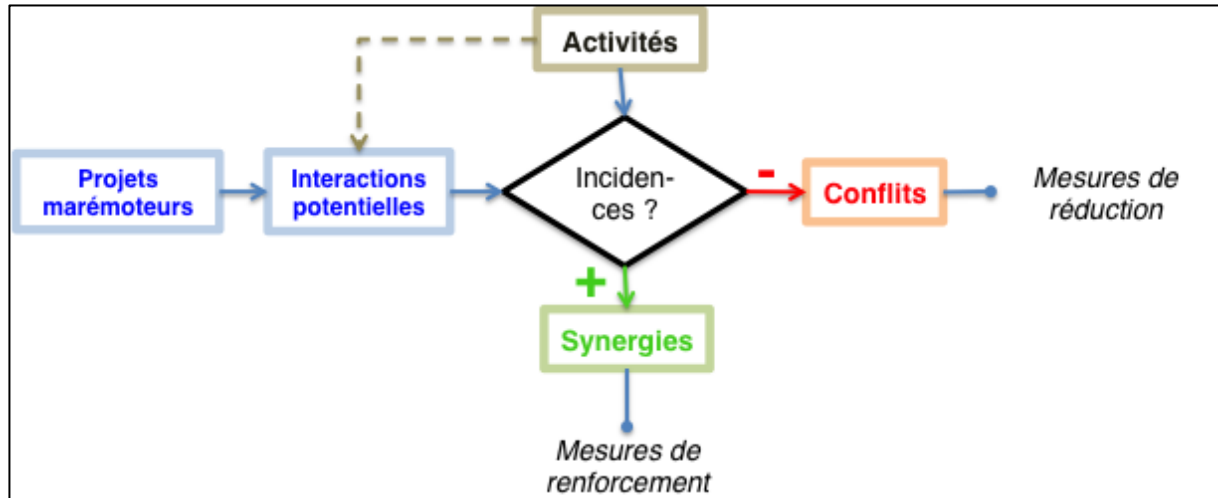


Figure 28 - Approche générale de l'étude des incidences sur les activités

5.3 Interactions avec les autres activités, impacts, synergies

5.3.1 Interactions avec les activités

Les projets marémoteurs occupent ou mobilisent de l'espace, et nécessitent des infrastructures conséquentes en mer ou sur le littoral ; par ailleurs, ils modifient profondément l'environnement. Ils ont donc des interactions potentielles directes avec quasiment toutes les activités maritimes et littorales dans la zone.

Ces interactions peuvent être associées à des *impacts* - *positifs ou négatifs* - (conséquences permanentes du fonctionnement normal des installations et de conditions normales d'exercice des activités), ou à des *risques* (impacts négatifs liés à des situations anormales et non désirables que le projet peut aggraver ou rendre plus probables ; par exemple collisions). On peut aussi imaginer des interactions liées à des *menaces* (impact négatif liés à des situations redoutées créées volontairement par malveillance (ex : ouverture de vannes...))

A ces interactions directes s'ajoutent des interactions indirectes, de diverses natures avec l'« anthroposystème » ou le « socio-écosystème ». Une partie de ces interactions impliquent l'environnement, notamment lorsqu'un projet marémoteur entraîne des modifications de l'environnement qui impactent (ou sont susceptibles d'impacter) des activités humaines non concernées par des interactions directes. Ainsi, en plus des conséquences directes d'un projet sur les activités qui existent dans la zone du projet, il faut prendre en compte les possibles *déplacements d'activités* (par exemple le déplacement d'une flottille vers une autre zone de pêche) ou les modifications ou déplacements de la *faune marine* qui pourraient avoir une influence par exemple sur l'activité de pêche hors de la zone du projet.

Les interactions potentielles peuvent être positives, dans une logique « gagnant-gagnant » où une activité pourrait bénéficier directement des modifications associées à un projet (ainsi par exemple, la tranquillisation d'un lagon protégé de la houle et des vagues peut être favorable à des activités de loisir). On peut parler dans ce cas de *synergies*. Elles peuvent être *neutres*, soit par absence d'effet

mesurable, soit à travers des mesures de compensation vis-à-vis des autres activités. Enfin, les interactions peuvent être négatives : *impacts* (cas où une activité serait modifiée de manière notable).

De ces interactions peuvent donc naître des *opportunités* (de collaboration, de coopération, de projets conjoints et de synergies) mais aussi des *conflits* ; ce sujet est traité plus loin.

L'analyse des interactions devrait couvrir tout le spectre des activités existantes, mais aussi (dans la mesure du possible³³) des activités futures, qui pourraient se développer indépendamment du projet marémoteur ou en synergie avec lui...

Activités avec lesquelles des incidences sont possibles

Activité	Observations
Transport maritime	Transport de marchandises et de passagers (lignes régulières, activités saisonnières, y compris transport maritime urbain ou péri-urbain), mouillages d'attente
Tourisme maritime et littoral	Croisière (y compris méga-yachts) Tourisme littoral (baignade, randonnée)
Pêche professionnelle	Toutes pratiques (arts dormants, arts traînants)
Biotechnologies marines	Exploitation des ressources génétiques (pharmacie, cosmétique, chimie, alimentation...)
Cultures marines	Pisciculture, conchyliculture, algoculture...
Plaisance et sports nautiques	Y compris pêche de plaisance Navigation de plaisance (voile ou moteur) Engins nautiques (kite surf, kayak...) Surf Plongée sous-marine
Extractions	Matériaux (sable, gravier...), substances dissoutes (sel...)
Activités de défense	Exercices (tir...), déminage
Activités régaliennes	Sécurité, sûreté Police, sauvetage, interventions en mer
Gestion et protection	Aires marines protégées
Production d'énergie en mer	Eolien (posé, flottant), hydrolien, énergie thermique (PAC), houlomoteur, solaire photovoltaïque
Câbles et pipelines	Télécommunications, transport d'énergie
Activités portuaires	Dragage, remorquage, pilotage
Rejets en mer	Emissaires eaux usées, eau de refroidissement (centrales thermiques ou thermonucléaires...)
Utilisation d'eau de mer	Pompage : réfrigération, production d'eau douce, thalassothérapie, pompes à chaleur...
Surveillance, communications	Surveillance des activités (radar, AIS...), Surveillance de l'environnement (stations côtières, bouées...) Télécommunications (VHF, GSM...)
Activités aériennes maritimes	Survol du plan d'eau, zones d'approche, zone de posé d'hydravions...
Recherche	Campagnes, levés...

³³ compte tenu de la durée de vie particulièrement longue envisagée pour les projets marémoteurs, typiquement supérieure à 100 ans

5.3.2 Analyse des interactions : impacts, synergies avec les activités

Dès lors qu'une interaction a été identifiée avec une activité, elle peut s'analyser en termes d'incidences potentielles négatives (impacts) ou positives (synergies).

On trouvera en annexe 1 une analyse détaillée des interactions possibles des projets marémoteurs avec les principales activités recensées ci-dessus, dont une synthèse est présentée dans le tableau ci-dessous.

NB : les interactions indirectes par l'environnement (qualité de l'eau, paysage, biodiversité...) sont traitées dans la partie « environnement »

5.3.2.1 Synthèse des impacts et synergies potentiels

Activité	Impacts possibles	Synergies possibles
Transport maritime	Difficultés de navigation, limitations d'accès, allongement de routes, risques (collisions)	Plan d'eau tranquillisé, infrastructures partagées, transport maritime littoral ou urbain, fourniture d'énergie renouvelable
Tourisme maritime et littoral	Limitations d'accès, envasement sites de baignade	Croisières et escales, plages et baignades, tourisme industriel, pistes cyclables sur digue...
Pêche professionnelle	Perte de zones de pêche, limitations d'accès, techniques interdites dans ou au voisinage du lagon	Effet récif, effet réserve, contrôle d'accès, association (surveillance), partage d'infrastructures (port, quais, mouillages...), fourniture d'énergie renouvelable
Cultures marines	Limitations des surfaces accessibles, modification des conditions hydrologiques ou biologiques	Zones abritées, surfaces réservées, protection (pollutions marines continentales), développement de nouvelles zones offshore
Plaisance et sports nautiques	Limitations d'accès, risques (courant, tourbillons, collisions)	Plan d'eau tranquillisé, cales, ports et mouillages dans le lagon, événements, surveillance ; extension des zones et des périodes de pratique ; loisirs à partir des digues (plages, pêche de loisir...)
Extractions	Limitations d'accès	Dragage des matériaux de construction du projet
Activités de défense	Limitations d'accès	Accès aux infrastructures
Activités régaliennes	Limitations d'accès	Moyens partagés (sauvetage), partage des infrastructures (ports, quais, mouillages...)
Production d'énergie en mer	Atténuation houle (diminution ressource houlomotrice)	Partage d'infrastructures (éolien posé, houlomoteur sur digue, solaire PV sur infrastructures)
Câbles et pipelines	Superposition avec routes de câbles, risques (construction opération)	Partie sous-marine remplacée par câble sur digue
Activités portuaires	Limitation d'accès, pilotage, zones d'attente, chenaux	Partage du dragage, infrastructures partagées (quais, mouillages...), plan d'eau tranquillisé
Rejets en mer	Modification de la diffusion ou de la bathymétrie	Emissaires sur digue
Utilisation d'eau de mer	Modification des conditions hydrologiques ou de la qualité	Eloignement des zones polluées

Activité	Impacts possibles	Synergies possibles
Surveillance, communications	Masquage (radar, AIS, visibilité), limitations d'accès	Plates-formes et moyens partagés, moyens déportés (ex : radar sur digue...)
Activités aériennes maritimes	Limitations d'accès	Zone d'écopage sur plan d'eau contrôle et tranquilisé
Recherche	Limitations d'accès	Programmes de recherche conjoints, participation à la surveillance, moyens partagés
Activités littorales et habitat		Protection (submersion, érosion...)

5.3.2.2 Impacts et synergies : conclusions

Les impacts génériques des projets marémoteurs sur les activités maritimes sont assez limités; sauf dans le cas de sites très spécifiques, *ces projets n'excluent aucune activité existante* (même s'ils entraînent parfois des modifications notables de leurs conditions d'exercice ou de pratiques) ; ils ouvrent en revanche à la plupart des activités des possibilités réelles de *développement supplémentaire* (ex : extension des périodes de pratique, des zones de pratiques...) ; enfin, ces projets offrent des conditions favorables au développement *d'activités nouvelles*.

Sur la base de cette analyse générique et stratégique, il apparaît que les **bénéfices globaux** (qu'ils soient économiques, en termes de valeur ajoutée produite, ou sociaux, par exemple en termes d'emplois permanents à temps plein) associés à un projet marémoteur peuvent très facilement dépasser les impacts socio-économiques négatifs.

En revanche, même s'il est probable que toutes les activités existantes puissent au minimum être préservées, un certain nombre d'entre elles subiront, quelles que soient les mesures de réduction adoptées, des impacts résiduels qui ne pourront être compensés que par des **adaptations de ces activités** (ex : modification des pratiques de pêche ou des pratiques de loisir).

5.4 Acceptabilité vis-à-vis des activités

Sur la base des analyses précédentes, on peut essayer d'évaluer l'acceptabilité des projets ou des filières.

L'acceptabilité n'est pas le seul critère pour l'acceptation d'un projet, qui dépend des acteurs, de leurs stratégies collectives ou individuelles, et notamment de leur représentation du territoire terrestre et maritime où se développera le projet, mais aussi des modalités de consultation ou d'association au projet.

5.4.1 Acception des projets : des enjeux multiples

Comme tous les grands projets d'aménagement, les projets marémoteurs soulèvent des oppositions soit de principe, soit d'opportunité. Il n'est pas nécessaire ici d'en dresser une liste exhaustive ;

toutefois, les enjeux suivants sont plus ou moins spécifiques à la mer et au littoral et méritent d'être considérés dans ce chapitre.

Energies marines renouvelables (EMR) : en plus des multiples enjeux génériques associés aux ENR (opinions, croyances ou convictions), les EMR portent un certain nombre d'enjeux supplémentaires, liés par exemple à la conviction d'un certain nombre de militants que la mer est encore un *espace naturel exempt d'activités humaines industrielles*, et qu'il est légitime de s'opposer à leur développement ; d'autres acteurs estiment que la production d'énergie ne devrait pas être envisagée en mer tant que toutes les ressources terrestres n'ont pas été exploitées.

Biodiversité marine : au-delà des évaluations objectives sur lequel se fondent les décisions, de nombreuses oppositions « environnementales » s'appuient se fondent surtout sur leur ignorance de la nature et des enjeux de la biodiversité marine et des menaces auxquelles elle est soumise actuellement et de leur importance respective (l'essentiel de ces menaces est lié aux pollutions d'origine terrestre, notamment agricole, et non à la pêche ou aux pollutions liées au transport maritime) ;

« *Propriété de la mer* » : résultat sans doute d'une communication bien menée, une grande partie de la population (et des élus) reconnaît aux pêcheurs professionnels (et plus généralement aux activités présentées comme « traditionnelles ») sinon la pleine propriété de la mer, au moins un droit de regard et souvent de veto sur les autres activités maritimes, et un droit inaliénable à indemnisation de la part des activités nouvelles. On leur reconnaît même souvent une légitimité supérieure en matière d'environnement marin aux autorités publiques et même aux organismes scientifiques qui les conseillent ;

Usages de la mer : les usages actuels et encore plus potentiels de la mer (espace et ressources) et leur spécificité (très peu d'activités permanentes ou inféodées à des espaces déterminés) échappent à l'essentiel des acteurs des territoires littoraux, population et décideurs.

5.4.2 Les obstacles potentiels à l'acceptation des projets

En matière de projets maritimes et littoraux en général, et de projets d'énergie marine en particulier, les conflits potentiels (concernant la construction, l'exploitation ou le démantèlement éventuel) sont de plusieurs natures, ou relèvent de plusieurs dynamiques, telles que :

- conflits liés à l'environnement (cités ici pour mémoire – voir analyse des incidences environnementales)
 - o biodiversité
 - o qualité de l'eau
 - o paysage (littoral et maritime)
- conflits liés à des intérêts socio-économiques
 - o conflits directs (compétition, concurrence, pertes directes...)
 - o conflits indirects (crainte de pertes économiques liées au développement de projets) : tourisme, immobilier...
 - o conflits liés au partage des bénéfices socio-économiques des projets
- conflits liés à la gouvernance des projets

- manque de concertation
- pilotage par des acteurs financiers ou extérieurs au territoire
- conflits liés à l'énergie
 - opposition aux énergies renouvelables en général
 - opposition aux projets marémoteurs en général
 - conflits liés à l'organisation du système énergétique
 - conflits liés au coût de l'énergie
- conflits liés à des intérêts particuliers
 - paysage, tranquillité..
- autres conflits
 - refus de l'industrialisation ou de la privatisation de la mer
 - conflits d'appropriation
 - risques systémiques (ex : sécurité maritime...)
 - risques spécifiques

Un certain nombre de ces conflits ne sont pas spécifiques aux projets marémoteurs.

5.4.3 Mesures de réduction des impacts

Pour réduire les conflits et donc en principe³⁴ améliorer l'acceptabilité des projets, la première approche à adopter est évidemment celle de *l'évitement*, à mettre en œuvre dès la conception du projet, et lorsque c'est possible dès le choix du site.

Il est possible à ce stade d'éviter quelques impacts potentiels majeurs, généralement ciblés (ex : éviter les routes maritimes ou les chenaux...).

Lorsque l'évitement est impossible, des *mesures de réduction* des impacts doivent être mises en œuvre. Elles peuvent viser la réduction (permanente ou temporaire) de certains *effets* (ex : courant maximal, niveaux minimal et maximal du plan d'eau...). Les mesures destinées à éviter des impacts purement économiques devraient systématiquement faire l'objet d'une *analyse coût-bénéfice* (le coût d'une mesure, par exemple en termes de réduction du productible, devrait être en rapport avec les pertes économiques attendues³⁵ ; à défaut, il est raisonnable de favoriser des mesures d'un autre type (compensation financière, ou coopération, par exemple ; voir plus loin).

Activité	Compensations possibles
Transport maritime	Balisage, partage de coûts de dragage, partage d'infrastructures (quais, mouillages...)
Tourisme maritime et littoral	Création de nouvelles infrastructures touristiques
Pêche professionnelle	Aide à l'adaptation (changement de zone de pêche, changement de technique de pêche) Fourniture d'énergie renouvelable
Cultures marines	Réservation d'espace pour les cultures marines dans le lagon
Plaisance et sports nautiques	Aménagement de sites alternatifs

³⁴ au moins pour les oppositions basées sur des impacts objectifs

³⁵ c'est actuellement très rarement le cas pour les projets maritimes : câbles sous-marins, parcs éoliens offshore... où le coût des mesures demandées est souvent sans rapport avec les pertes économique évitées – lorsque ces pertes existent, ce qui est très rarement démontré

Activité	Compensations possibles
Extractions	Participation des entreprises concernées à la fourniture des matériaux de construction du projet
Activités de défense	Accès aux infrastructures ou aux installations du projet pour des activités d'entraînement
Activités régaliennes	Financement d'installations
Production d'énergie en mer	-
Câbles et pipelines	Financement du déplacement de câbles
Activités portuaires	-
Rejets en mer	Financement de la modification des émissaires
Utilisation d'eau de mer	-
Surveillance et communication	Mise en place de systèmes additionnels de surveillance ou de télécommunications
Activités aériennes maritimes	-
Recherche	Programmes de recherche communs ou financés par le projet

En se basant sur l'expérience des projets maritimes et littoraux (notamment les projets de câbles sous-marins, d'hydroliennes ou d'éoliennes), on ne peut que recommander que les procédures de réduction des impacts soient *transparentes* pour tous les acteurs, depuis l'évaluation des impacts jusqu'à la définition des mesures (réduction, compensation, indemnisation), au risque sinon d'entraîner des conflits nouveaux (inégalité de traitement...) et généralement une fuite en avant des demandes « d'indemnisation » (de pertes non démontrées) ou de « compensation » (parfois sans rapport avec les impacts évoqués), qui peuvent entraîner des surcoûts élevés sans produire toujours de gain réel en termes d'acceptabilité. L'analyse devrait aussi prendre en compte les inévitables évolutions des activités concernées, et la difficulté à les apprécier pour un projet dont la durée de vie est très importante vis-à-vis des cycles des autres activités (ex : pêche, plaisance ...).

5.4.3.1 Mesures de compensation

On devrait réserver le terme de « compensation » aux cas où les mesures de réduction des impacts ne seraient pas jugées suffisantes pour annuler ou rendre acceptables les impacts d'un projet sur une autre activité. En toute rigueur, les compensations consenties à une activité devraient se limiter à recréer des conditions acceptables pour cette activité, ou à compenser les pertes économiques correspondantes (indemnisation). Elles ne devraient donc concerner que des *activités existantes*.

Souvent présentées comme des mesures compensatoires, les autres mesures (ex : financement d'études sur les ressources halieutiques, d'infrastructures sans rapport avec le projet ou les activités existantes...) souvent définies bilatéralement avec des acteurs susceptibles de s'opposer au projet et dans le but de lever leur opposition, devraient en toute rigueur être traitées séparément des mesures de compensation.

Dans la pratique, il semble souhaitable de penser les compensations en termes de *secteur économique* plutôt que d'activité spécifique ; il est en effet souvent assez facile de proposer des évolutions de l'activité au sein d'un même secteur (ex : changement de technique de pêche), mais difficile de déplacer une activité que le projet rendrait impossible ou de recréer ailleurs les conditions favorables à cette activité (techniquement ou économiquement).

5.4.3.2 Indemnisations

L'indemnisation est consentie en contrepartie d'une perte (financière ou non), démontrée et impossible à réduire à un niveau acceptable, lorsqu'aucune mesure de compensation acceptable ne peut être proposée. L'indemnisation peut être financière ou non. Si l'indemnité concerne une activité exploitant l'espace ou les ressources marines, elle ne devrait pas pouvoir constituer une rente pour l'utilisateur indemnisé³⁶, mais un soutien à l'adaptation (donc, limité dans le temps).

5.4.4 Association d'autres acteurs au projet marémoteur

On se place pour cette analyse dans le cas d'un *projet industriel dont la finalité principale unique est la production d'énergie*.

Dans cette configuration, il est possible d'envisager un certain nombre d'approches susceptibles de faciliter l'acceptation du projet par les acteurs directement impactés.

5.4.4.1 Optimisation des synergies

5.4.4.1.1 Synergies basées sur les effets

Les synergies les plus faciles à développer sont celles qui s'appuient sur les effets directs des projets. Les projets marémoteurs modifient le régime des marées, les hauteurs d'eau, les cycles de marée, les courants ; les conditions météo-océanographiques sont modifiées dans les bassins.

Activités avec lesquelles des synergies de ce type pourraient être trouvées :

- Protection du littoral, défense de la côte : atténuation de la houle et réduction des surcotes, réduisant le recours à des digues littorales ou les cotes de sécurité...
- Loisirs nautiques (y compris baignade) : un plan d'eau abrité augmente le potentiel de ces activités (réduction de la saisonnalité, développement de nouveaux loisirs...)
- Plaisance : la réduction de la houle favorise les activités nécessitant un plan d'eau abrité
- Cultures marines (plan d'eau abrité, courants et niveaux contrôlés...)

Les synergies liées aux effets du projet peuvent aussi bénéficier aux actions de lutte contre les pollutions marines, contre l'érosion côtière, contre les submersions marines...

5.4.4.1.2 Synergies basées sur les infrastructures

Tout projet marémoteur implique la création d'infrastructures maritimes et souvent terrestres littorales importantes. Ces infrastructures, éventuellement modifiées ou adaptées, peuvent contribuer à des synergies avec d'autres activités maritimes ou terrestres : création d'un lien routier (ex : La Rance), d'un terminal offshore, de plages artificielles, partage d'infrastructures...

Activités avec lesquelles des synergies de ce type pourraient être trouvées :

- Ports et activités portuaires : quais, mouillages, chenaux
- Autres activités de production énergétique (marine ou non : solaire, éolien)

³⁶ ce qui reviendrait à reconnaître des droits privés à cet usager sur un espace et des ressources publiques. Il conviendrait à ce sujet de s'interroger sur les fondements de la taxe sur l'éolien affectée à des usagers de la mer, et d'en éviter la généralisation à tous les projets de production d'énergie en mer...

- Loisirs nautiques : ports, mouillages
- Tourisme littoral et maritime (création d'accès, de routes ou pistes, ports ou appontements...)
- Cultures marines (plan d'eau éventuellement réservé en tout ou partie, protégé contre d'autres activités (dragage, chalutage...))
- Surveillance maritime et surveillance de l'environnement : stations de mesure déportées (radar, AIS, mesures de qualité de l'eau, météo-océanographiques, etc.)
- Télécommunications et télédiffusion : relais déportés en mer (GSM, VHF...)

Compte tenu de l'importance des infrastructures (longueur des digues, masse...) et de leur capacité à accueillir une grande variété d'installations actuellement uniquement terrestres, il serait intéressant d'envisager le maximum d'usages possibles dès la conception du projet et d'identifier ceux qui ont le meilleur rapport bénéfice potentiel/surcoût.

5.4.4.2 Association en amont : co-projets

Pour valoriser au maximum les synergies, on peut associer dès la conception et le développement du projet des acteurs d'autres secteurs qui peuvent en bénéficier. L'idée est de prendre en compte ces autres secteurs dès la conception du projet ; cette approche n'implique pas leur participation au financement, mais elle ne l'exclut évidemment pas (même si un tel financement ne peut être que marginal par rapport au coût du projet marémoteur).

Exemples : aquaculture, projets touristiques

5.4.4.3 Association aux bénéfices du projet

Les acteurs locaux soutiennent d'autant plus volontiers un projet qu'ils peuvent en tirer des bénéfices. Ces bénéfices peuvent concerner toute la *chaîne de valeur* du projet : recherche et études, financement, réalisation, exploitation, commercialisation de l'énergie produite, activités induites ou synergétiques...

5.4.4.3.1 Financement

L'origine du capital et les bénéfices associés sont souvent un objet de tension pour les projets d'infrastructures et les projets énergétiques. La participation des acteurs locaux au capital du projet, et donc aux bénéfices associés, est un moyen d'apaiser ces tensions et de transformer en soutien des oppositions initiales.

Compte tenu du coût très élevé des projets marémoteurs (milliards d'euros), les acteurs privés locaux ne peuvent en tout état de cause fournir qu'une faible partie des fonds propres du projet, et ne peuvent envisager par ce biais de prendre un rôle déterminant dans la gouvernance économique du projet ; mais ils pourraient éventuellement en espérer des bénéfices, ce qui pourrait contribuer à l'acceptation du projet.

5.4.4.3.2 Partage de moyens opérationnels

L'exploitation opérationnelles de parcs marémoteurs peut nécessiter la mise en œuvre de moyens opérationnels (ex : navires de maintenance, moyens de surveillance ou de sauvetage...) qui peuvent être partagés avec d'autres activités.

Activités avec lesquelles des synergies de ce type pourraient être trouvées :

- activités régaliennes (surveillance maritime, sauvetage..)
- surveillance de l'environnement
- recherche
- cultures marines (si co-localisation)

5.4.4.3.3 Synergies basées sur l'énergie

Les projets marémoteurs ont vocation à produire de l'énergie renouvelable ; toutes les activités maritimes et littorales ont besoin d'énergie, et l'énergie produite localement peut alimenter directement (et dans des conditions avantageuses) les activités locales existantes ou nouvelles.

Activités avec lesquelles des synergies de ce type pourraient être trouvées :

- pêche (alimentation en énergie des navires)
- plaisance (idem)
- cultures marines (algoculture, conchyliculture...)

5.5 Interactions avec les territoires littoraux

5.5.1 Des projets en interaction forte avec le territoire

Les interactions potentielles d'un projet marémoteur vont bien au-delà des interactions avec les activités maritimes et littorales, économiques ou non.

Ce type de projet est associé à des infrastructures très importantes, en grande partie maritimes, qui peuvent servir de support pour des activités multiples, dont certaines n'existeraient pas sans ces infrastructures. Les modifications associées des conditions environnementales (plan d'eau abrité, courants plus faibles...) sont favorables à une large gamme d'activités, soit nouvelles, soit existantes (réduction de saisonnalité...), et donc au développement économique de tout le territoire.

Les infrastructures du projet peuvent ainsi jouer un rôle assimilable à celui des *grands ports maritimes* : conçus, et pendant longtemps dessinés, pour remplir des fonctions essentiellement liées au transport maritime, ces infrastructures sont pour la plupart à l'origine de modifications profondes du territoire qui les accueillent, dont elles structurent la plupart du temps non seulement le projet à long terme, mais l'identité même.

Sous réserve de conserver une dynamique suffisante et de maîtriser l'envasement, les lagons marémoteurs littoraux pourraient jouer jusqu'à un certain point le même rôle que les lagunes naturelles, qui sont généralement des catalyseurs pour de nombreuses activités littorales.

Ces infrastructures peuvent enfin remplir des fonctions annexes au regard du projet énergétique, mais très importantes pour le territoire :

- protection contre des événements extrêmes, comme les submersions marines ou les crues
- protection contre les pollutions marines
- restauration de fonctionnalités écologiques
- contrôle de l'érosion côtière
- ouverture de zones nouvelles à l'aménagement, ou réhabilitation de zones défavorisées.

L'expérience de la Rance, mais aussi les études menées au Royaume-Uni dans la perspective du développement d'un ensemble de projets marémoteurs exploitant des lagons littoraux, confirment que *l'empreinte d'un projet marémoteur dépasse largement les domaines industriel et énergétique*.

Enfin, si l'on accepte que l'implantation d'un projet marémoteur soit associée à des modifications profondes de l'environnement, on peut imaginer d'aller jusqu'à *spécialiser le lagon pour une ou des activités particulières*, par exemple l'aquaculture ou la conchyliculture qui peut devenir à terme une activité dominante pour le territoire ; c'est de fait ce qui s'est déjà produit dans des lagunes ou bassins naturels comme l'Etang de Thau, Bassin d'Arcachon (conchyliculture), ou des baies comme la baie de St Brieuc (coquille Saint-Jacques).

5.5.2 Des projets structurants pour l'identité du territoire

Un projet marémoteur peut être vu comme un projet qui s'installe sur un territoire, au risque d'être considéré comme un corps étranger qui cherche à s'assimiler ; mais il peut donc aussi être vu comme une *composante à part entière d'un projet de territoire littoral*.

Comme toutes les grandes infrastructures littorales, un projet industriel marémoteur est tellement structurant pour un territoire littoral que, in fine, *c'est le territoire qui finit par se (re)construire autour du projet*, plus que le projet qui s'installe sur le territoire.

De nombreux éléments concourent à ce constat : *gigantisme* des infrastructures et des travaux nécessaires pour les réaliser (qui dépassent largement le coût et l'importance des infrastructures classiques), empreinte du projet sur *l'identité future* du territoire³⁷, importance potentielle des retours socio-économiques directs et indirects (pendant la phase de construction, puis pendant la phase d'exploitation), possibilité d'intégrer dans les objectifs du projet des *enjeux maritimes et littoraux importants pour le territoire*, nécessité de modifier profondément le *schéma de cohérence territoriale* et le plan local d'urbanisme pour accueillir le projet, etc. Le caractère structurant du projet est encore plus affirmé si on choisit de spécialiser pour une activité particulière le plan d'eau enclos par les digues du projet marémoteur.

Dès lors, plutôt que de chercher à minimiser l'importance ou la visibilité de ces infrastructures, il paraît préférable de les considérer dès la conception comme un élément futur du « capital maritime et littoral » du territoire.

5.5.3 Des projets porteurs pour l'économie bleue

Le concept d'économie bleue suscite un intérêt croissant, lié notamment aux perspectives de développement de nouvelles activités économiques exploitant les ressources et l'espace marins, et à la nécessité de préserver un environnement marin de plus en plus menacé par les conséquences des activités humaines.

³⁷ Voir l'exemple de la Rance

Au-delà de l'innovation technique, des enjeux économiques et environnementaux globaux, l'économie bleue porte aussi des enjeux d'économie circulaire, puisqu'elle vise notamment à utiliser localement les ressources locales, et à produire des bénéfices sur les territoires dont le « capital maritime et littoral » (espace et les ressources, patrimoine naturel et culturel, connaissances et infrastructures...) est exploité, par exemple en y localisant autant que possible les divers segments de la chaîne de valeur des activités associées.

Dans ce contexte, les projets marémoteurs apparaissent comme particulièrement pertinents, puisqu'ils permettent :

- De valoriser des espaces (maritimes et littoraux) locaux ;
- D'exploiter localement des ressources marines locales (énergie...)
- De contribuer à l'équipement du territoire en infrastructures, support potentiel d'autres activités
- De contribuer à la protection de l'environnement (pollutions, biodiversité...)
- D'acquérir des connaissances et de créer des savoirs locaux originaux ;
- De contribuer au renforcement du lien entre le territoire littoral et la zone maritime qui le borde.

Bien au-delà donc du simple « projet énergétique avec quelques retombées locales », ou même du « projet co-développé avec quelques autres activités économiques », il y a donc tout intérêt à concevoir les projets marémoteurs comme des catalyseurs de l'économie bleue sur le territoire qui les accueille.

5.6 Synthèse et conclusion sur l'intégration sociale et économique des projets marémoteurs

5.6.1 Incidences socio-économiques des projets marémoteurs

Du fait de leurs dimensions et des modifications qu'ils apportent à l'environnement dans toutes ses dimensions, les projets marémoteurs peuvent avoir des incidences notables sur toutes les activités maritimes et littorales dans leur zone d'influence : activités régaliennes (sécurité, sûreté, défense, police...), activités économiques maritimes et littorales (pêche, transport, cultures marines, extractions, plaisance, tourisme...), loisirs (loisirs nautiques, pêche de loisir...).

Ces incidences peuvent concerner des enjeux majeurs pour le territoire accueillant le projet (protection contre l'érosion ou les submersions...)

5.6.1.1 Incidences négatives : impacts, mesures de réduction ou de compensation

Sauf pour certains types de projets et certains sites (particulièrement ceux qui engloberaient un ou des estuaires, des ports de commerce ou de grands ports de plaisance dont les digues auraient des impacts forts sur l'activité opérationnelle), l'existence d'un projet marémoteur *ne semble pas incompatible avec la plupart des activités maritimes et littorales existantes*.

Les interactions avec les activités existantes sont généralement du domaine de la *perturbation* plus que de l'incompatibilité : les parcs marémoteurs impliquent ainsi des changements pour un grand

nombre d'activités maritimes et littorales, mais n'entraînent a priori la disparition d'aucune de ces activités.

Pour toutes ces perturbations, il existe par ailleurs des mesures susceptibles de les réduire à un niveau acceptable ; les opportunités supplémentaires d'activités nouvelles associées au projet marémoteur ouvrent par ailleurs des possibilités nombreuses de compensation socio-économique pour les activités impactées.

5.6.1.2 Incidences positives : synergies, mesures pour les renforcer

Les infrastructures associées aux projets marémoteurs de nouvelle génération (lagon artificiel) ouvrent des perspectives pour de nombreuses activités nouvelles, mais aussi souvent pour le développement des activités existantes.

Ces perspectives couvrent a priori *tout le champ des activités maritimes*, et notamment l'exploitation des ressources biologiques (pêche professionnelle et de loisir, aquaculture : conchyliculture, pisciculture ou algoculture ; biotechnologies), des ressources énergétiques (éolien, houlomoteur, solaire photovoltaïque...), transport (notamment urbain et littoral), tourisme, loisirs nautiques et plaisance. Même les *activités régaliennes* peuvent bénéficier de ce type de projet (partage d'usage des infrastructures...)

Si l'environnement le permet (absence d'enjeux importants, ou compensation possible), il semble possible de *spécialiser le plan d'eau* associé au projet marémoteur (par exemple pour la production aquacole), ce qui ouvre la voie à des co-projets portés par exemple par un opérateur du domaine de l'énergie et un opérateur spécialisé dans les cultures marines ou l'exploitation industrielle de la biomasse marine.

5.6.2 Enjeux socio-économiques : neutralité impossible, oppositions inévitables

Les projets marémoteurs seront forcément confrontés à des oppositions fondées sur les impacts environnementaux, des oppositions de principe (auxquelles se trouvent confrontés tous les grands projets), et des oppositions de nature socio-économique de la part des usagers impactés. Les projets marémoteurs devraient être exemplaires en termes d'évaluation et de traitement des incidences environnementales et socio-économiques.

Compte tenu de la dimension des projets, il est néanmoins vain d'espérer que les impacts négatifs pourront être tous réduits à un niveau acceptable ou pleinement compensés : l'acceptabilité des projets marémoteurs ne devrait pas pouvoir se fonder sur l'atteinte d'une impossible « *neutralité* » vis-à-vis de l'environnement ou des usages en termes d'impacts (négatifs), neutralité qui ne suffirait de toute manière pas à entraîner l'acceptation, même passive, de projets qui ne peuvent manquer de modifier considérablement le territoire sur lequel ils s'implanteraient.

Comme tous les grands projets, un projet marémoteur ne peut espérer l'unanimité, les oppositions essentielles pouvant provenir désormais d'acteurs extérieurs au territoire : il est donc important (voir plus bas) de conduire le débat public de manière à faire apparaître la nature des oppositions, en particulier les oppositions de principe par rapport à celles qui sont liées à un territoire particulier ou une activité en particulier.

Les perspectives de développement d'activités nouvelles sont un puissant moteur pour les porteurs de projets, mais il faut garder à l'esprit que ces mêmes perspectives soulèvent souvent des oppositions farouches, soit d'acteurs en place réticents à partager territoire et ressources, soit de riverains attachés à une vision du territoire généralement ancrée dans la tradition, réelle ou imaginée.

5.6.3 Mesures susceptibles de favoriser l'appropriation territoriale des projets marémoteurs

Les projets marémoteurs sont nécessairement des projets majeurs pour un territoire, qui ne peuvent donc en aucun cas être considérés comme « neutres » pour le territoire. En revanche, ces projets sont associés à de nombreuses incidences potentielles positives socio-économiques (développement d'activités existantes, création d'activités nouvelles) ou territoriales (protection du littoral, développement territorial).

Au bilan, au plan de l'intégration économique et social des projets, on peut identifier deux options stratégiques :

- a. Projet industriel « pur », porté par les seuls acteurs industriels et destiné à la seule production d'énergie. Condamné à l'impossible réduction systématique et à la compensation de tous ses impacts, dans une ambiance générale de tension (classique des projets majeurs considérés comme portés par des acteurs étrangers au territoire et favorisant leurs propres intérêts plus que ceux des acteurs locaux), un tel projet aurait beaucoup de mal à émerger dans un délai acceptable ;
- b. Projet porté par le territoire, comportant un volet énergétique important (marémoteur), mais aussi d'autres objectifs territoriaux (lutte contre l'érosion, protection contre les submersions, développement économique et social...) et économiques (développement d'activités économiques associées à l'économie bleue).

Ces options stratégiques correspondent à des options bien différentes en termes d'objectifs (optimum énergétique vs optimum socio-économique), de portage du projet, de gouvernance, et de financement. *La deuxième option (projet territorial) semble offrir de bien meilleures perspectives en termes d'acceptation des projets, et même de montage économique (financement, partage des risques).*

Synthèse : avantages/inconvénients des deux approches

Option	Avantages	Inconvénients
Projet énergétique industriel	• Pilotage clair du projet • Négociations bilatérales avec chaque acteur concerné • Calendrier en principe indépendant du calendrier politique et stratégique du territoire	• Association limitée des acteurs du territoire, bénéfices indirects mal évalués • Nombreux recours potentiels générateurs de délais importants (surtout si le projet n'est pas inscrit dans les stratégies locale, régionale, à

Option	Avantages	Inconvénients
		l'échelle de la façade, nationale) • Arbitrages incertains • Risques assumés par les seuls acteurs industriels et financiers • Difficulté à modifier les stratégies et plans territoriaux pour intégrer le projet (DSF, SCOT, PLU...)
Projet territorial	• Portage du projet par les décideurs du territoire • Prise en compte globale des impacts/bénéfices du projet (même indirects) • Partage des coûts et des risques (public/privé) • Possibilité de définir des mesures compensatoires socio-économiques à l'échelle du territoire, au-delà du périmètre du projet • Catalyseur potentiel d'initiatives et d'activités nouvelles	• Nécessité d'un portage fort des acteurs territoriaux, et dépendance au calendrier politique local/régional • Complexité de la démarche de construction du projet et du pilotage (public-privé) • Complexité du financement (ex. : défense du littoral...) • Durée du processus, susceptible de décourager les investisseurs et les porteurs de projets

5.6.4 Autres facteurs influant sur l'intégration des projets

Au-delà des impacts socio-économiques objectifs potentiels des projets sur certaines activités, il est nécessaire de prendre en compte la *relation à l'espace maritime de certains acteurs*.

En effet, si la mer est en principe et au regard du droit un espace commun, elle est de fait l'espace privilégié d'un certain nombre d'usagers, qui ont tendance à se référer à cet usage exclusif de plus ou moins longue date pour se l'approprier. Ainsi, la bande côtière est souvent considérée par les pêcheurs côtiers comme « leur » espace, de même d'ailleurs que certaines zones bien plus loin des côtes sont appropriées (de manière souvent moins visible) par d'autres acteurs, comme la marine nationale (zones d'exercice).

Dans ces espaces, ces acteurs considèrent que la décision finale quant à leur usage leur appartient, et ceci souvent indépendamment des éventuels impacts économiques et des compensations qui pourraient les réduire ou les annuler.

En l'absence de vision globale et prospective, c'est souvent la vision de ces acteurs qui structure celle des autres acteurs du territoire³⁸. Il est important (comme souligné plus haut) que le débat permette de faire émerger ces positions de principe et permette leur discussion, ce qui justifie de conduire d'abord le débat à l'échelle nationale, celle des politiques, avant de le poursuivre à l'échelle territoriale, celle des projets.

³⁸ Comme en témoigne l'élaboration des « Documents Stratégiques de Façade », qui entérine dans la planification nationale les priorités revendiquées par les acteurs existants

5.7 Intégration territoriale des projets marémoteurs - Recommandations

5.7.1 Etude stratégique des sites favorables aux projets marémoteurs

Au niveau national, une étude stratégique devrait être menée (par exemple sous l'égide de l'ADEME) pour évaluer :

- la ressource énergétique marémotrice, pour chacune des technologies, et le potentiel technico-économique associé ;
- les autres enjeux dans les zones propices, en termes notamment de protection du trait de côte, d'érosion côtière, de protection contre les submersions, et de développement économique (tourisme, cultures marines, etc.).

Cette étude devrait s'inscrire résolument dans le cadre de l'économie bleue, dans la perspective de valoriser au maximum les bénéfices socio-économiques et environnementaux potentiels qui pourraient non seulement contrebalancer l'artificialisation de l'espace, mais créer un environnement favorable pour des développements futurs. Elle devrait en particulier prendre en compte les études réalisées pour la préparation des documents stratégiques de façade (voir plus loin), notamment en ce qui concerne les *activités maritimes et littorales* existantes et les *autres ressources marines* dont l'exploitation pourrait entrer en concurrence ou en complémentarité avec les projets marémoteurs.

5.7.2 Prise en compte du marémoteur dans les politiques nationales et régionales

Le fait que des projets soient explicitement cités dans des documents de politique nationale réduit potentiellement les oppositions de principe, et surtout affirme que ces projets contribuent à des objectifs d'intérêt général au-delà des objectifs particuliers des porteurs de projet.

Les projets marémoteurs relèvent de la politique nationale de l'énergie, et concourent à en atteindre les objectifs. Au regard de l'acceptation par le public, un projet marémoteur ne devrait donc pas être évalué seulement comme un projet local, porté uniquement par des acteurs industriels, mais aussi au regard de sa contribution aux objectifs d'intérêt général de la politique nationale de l'énergie.

Celle-ci devrait donc *explicitement prévoir la possibilité de développer des projets marémoteurs*, et les modalités d'injection dans le système énergétique de l'énergie produite, ce qui n'est pas explicitement le cas aujourd'hui.

Les projets marémoteurs relèvent aussi de la politique maritime nationale, dans ses diverses composantes (énergies marines renouvelables, environnement marin et littoral, gouvernance et cohabitation avec les autres activités) ; leur développement devrait donc être explicitement prévu dans le cadre de cette politique et des stratégies associées (notamment la Stratégie Nationale pour la Mer et le Littoral, SNML³⁹, où ils ne figurent pas aujourd'hui).

Enfin, ces projets relèvent des politiques territoriales de développement. Si ces politiques se sont longtemps concentrées sur les enjeux purement littoraux (ex. tourisme côtier, infrastructures

³⁹ publiée au JO en février 2017

portuaires), elles intègrent désormais de plus en plus les enjeux maritimes et les possibilités de développement associées à l'« Economie Bleue ».

La production d'énergie marémotrice et la valorisation des infrastructures associées constituent un *potentiel important pour le développement des territoires littoraux adjacents* : développement industriel tout au long de la chaîne de valeur (R&D, fabrication, O&M...), valorisation de l'énergie produite, contribution à l'autonomie énergétique locale, développement d'activités économiques dérivées (ex. tourisme industriel) ou liées aux nouvelles infrastructures.

Les territoires littoraux (notamment les régions, chefs de file en matière de développement économique) devraient intégrer le potentiel du marémoteur dans leurs réflexions prospectives et le cas échéant dans leurs stratégies territoriales.

5.7.3 Planification stratégique – Evaluation stratégique, consultation du public

Au-delà des politiques qui devraient les porter, les projets marémoteurs devraient être pris en compte dans les planifications stratégiques qui les déclinent en termes géographiques et sectoriels.

Comme tous les grands projets maritimes, les projets marémoteurs devraient donc apparaître dans le cadre des *Documents Stratégiques de Façade* (DSF), qui déclinent à l'échelle de chaque façade maritime les objectifs de la SNML et des Plans d'Action pour le Milieu Marin (PAMM) qui en constituent le volet environnemental. *Les DSF devraient donc prévoir la possibilité de développer des projets marémoteurs*, ce qui suppose que le potentiel correspondant ait été étudié (voir plus haut) et pris en compte dans le DSF (y compris dans les zonages, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui), ou que le DSF soit modifié pour assurer la compatibilité.

Les DSF sont soumis à une *évaluation environnementale stratégique* (EES) et faire l'objet d'un *débat public ouvert*. Le fait d'intégrer les objectifs marémoteurs dans une planification stratégique soumise à évaluation et consultation devrait permettre d'éviter une partie des difficultés rencontrées notamment pour l'implantation des parcs éoliens offshore, qui faute d'un débat public au niveau stratégique ont dû affronter des oppositions et des contentieux qui s'adressaient en fait non à un projet local en particulier, mais à une politique et une filière en général.

5.7.4 Conception et portage des projets

Du fait de leur taille et de leur localisation, les projets marémoteurs littoraux modifient profondément le « paysage » littoral dans toutes ses dimensions : environnementale, économique, sociale et même sociétale (« identité » du territoire). On peut concevoir ces projets selon deux approches, qui structurent profondément la conception des projets et leur « portage » territorial.

- L'approche « énergétique », qui vise à la réalisation d'un projet dont la finalité principale est la finalité énergétique, les autres usages tirant éventuellement des bénéfices de la présence de cette infrastructure, mais n'influençant qu'à la marge une conception a priori optimisée pour la production d'énergie. Dans cette approche classique pour les projets industriels, le projet est *porté par un consortium industriel*, le rôle des collectivités littorales et de l'Etat se limitant à un accompagnement plus ou moins grand ;

- l'approche « territoriale », qui vise à développer un projet « hybride » avec des finalités convergentes de production énergétique et de développement territorial (« économie bleue »). Dans cette approche, la conception prend en compte les deux finalités, ce qui peut aboutir à un projet énergétique non optimisé et où les surcoûts associés à la finalité de développement territorial peuvent ne pas être marginaux ; en corollaire, *le portage du projet passe au territoire* (collectivités, soutenues par l'Etat), le rôle du consortium industriel étant plus réduit à la fois en termes technique et financier (la part du financement territorial, a priori public mais potentiellement privé, pouvant d'ailleurs être notable).

Cette deuxième approche (« territoriale ») devrait être favorisée. En effet, compte tenu de leur importance, les projets marémoteurs ont forcément une importance majeure pour le territoire où ils s'installent, et leur existence constitue dans la plupart des cas une *modification majeure pour l'identité du territoire*, qui ne peut être acceptée que si le projet marémoteur est conçu dès le départ comme le projet autour duquel se structure un *nouveau projet de territoire*.

Ceci implique logiquement :

- que le projet soit porté par les acteurs du territoire, les partenaires industriels accompagnant techniquement ce projet territorial ;
- qu'il prenne en compte dès le choix du site les autres enjeux
- que la conception du projet intègre le plus tôt possible non seulement les activités associées au projet marémoteur ou dérivées, mais les modifications directes ou indirectes à toutes les activités du territoire, et plus généralement au patrimoine maritime et littoral de ce territoire ;
- que le projet intègre autant que faire se peut les perspectives de développement de nouvelles activités utilisant les ressources ou l'espace marin, et plus généralement le « capital maritime et littoral » du territoire, naturel et humain ;
- que le projet soit conçu, développé et exploité de manière à maximiser la part pour le territoire de la chaîne de valeur qu'il génère directement ou indirectement.

Cette option a une importance majeure dans le choix des sites et des projets, dans leur portage, leur conception, et le cas échéant leur financement.

- nécessaire *portage par les acteurs du territoire*, accompagnement par les acteurs industriels (et non l'inverse) ;
- inscription inévitable dans *l'agenda politique du territoire*, et donc dans un calendrier distinct des calendriers industriels ;
- *co-conception* impliquant éventuellement des choix non optimaux au regard des enjeux industriels et énergétiques, mais aussi des co-financements au regard des autres enjeux territoriaux (économiques ou non) auxquels le projet doit contribuer.

5.7.5 Choix des projets

La base du choix des projets est évidemment l'existence d'un potentiel marémoteur exploitable techniquement et économiquement. Ces paramètres sont structurants pour la partie énergétique de tout projet marémoteur, que sa finalité soit exclusivement énergétique ou partagée.

Les paramètres techniques et économiques ne sont plus les seuls paramètres structurants dès lors que le projet intègre des objectifs territoriaux importants. Il convient dans ce cas d'intégrer dès le choix du site les autres éléments structurants :

- perspectives de développement territorial
- synergie possibles avec des fonctions de protection du littoral (érosion, submersion...)
- activités avec lesquelles des synergies pourraient être recherchées (activités existantes, création d'activités)

Trois « scénarios » de projet sont présentés en annexe 3 et illustrent différentes combinaisons d'objectifs, correspondant à des projets très différenciés.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Priorités	<i>Protection du littoral et production d'énergie</i>	<i>Développement des activités maritimes et littorales</i>	<i>Production d'énergie</i>
Energie			
Environ. risques			
Dével. territorial			

5.7.6 Projet pilote

L'utilité d'un projet pilote serait incontestable avant qu'une stratégie de plus long terme puisse être définie. Même s'il est techniquement toujours possible de s'appuyer sur les expériences conduites dans des pays voisins (ex. : Royaume-Uni), un projet-pilote conduit à l'étranger ne permet pas de tenir compte des enjeux environnementaux, socio-économiques et politiques spécifiques, ni de l'effet d'apprentissage nécessaire au développement d'une filière nationale (et d'ailleurs à son encadrement réglementaire).

Plutôt qu'un projet optimisé pour la production d'énergie, il serait peut-être préférable de choisir parmi les sites disposant d'un potentiel marémoteur acceptable, un site où d'autres *enjeux territoriaux majeurs* pourraient bénéficier de l'existence d'un projet marémoteur ; le projet deviendrait ainsi un projet pilote territorial, plus qu'un simple pilote industriel. Exemples d'enjeux qui pourraient être pris en compte, séparément ou simultanément :

- *zone littorale défavorisée* au regard du développement économique ou social, où les perspectives de développement ou de réhabilitation associées au projet et aux activités induites sont importantes ;
- *zone littorale menacée* par des *submersions marines* ou *l'érosion côtière*, où un projet marémoteur permettrait de limiter ou de partager les coûts économiques ou sociaux du risque ou de la protection ;

- zone littorale *dégradée* où un projet marémoteur pourrait contribuer à une réhabilitation environnementale ;
- zones où existent des projets à grande échelle nécessitant un bassin maritime abrité.

5.7.7 Gouvernance des projets

Pour les cas où le projet marémoteur est considéré comme une composante structurante d'un projet de territoire (par exemple dans le cas d'un projet dont une finalité prioritaire est la protection d'un littoral menacé par la mer), la gouvernance du projet est a priori complètement différente de celle d'un projet industriel, la maîtrise d'ouvrage étant a priori assurée par un ou des acteurs publics (collectivités, EPIC, société publique locale, SEMOP, etc.), les industriels ne jouant alors qu'un rôle d'assistance à la maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre déléguée.

Le montage de ce type de projet devrait s'inscrire dans le cadre d'un *partenariat public-privé*. La possibilité de recourir comme les projets privés à du *financement de projet* devrait être étudiée, les flux de trésorerie provenant de l'exploitation (production d'énergie, concessions) comme des financements publics (protection littorale) étant assurés.

5.7.8 Consultation du public

Même si la planification stratégique a fait l'objet et d'une évaluation environnementale stratégique, et d'un débat public, *un débat public est nécessaire à l'échelle du projet*. Il devrait pouvoir être animé par le porteur du projet (consortium industriel ou acteur public, suivant l'option choisie) sous le contrôle de la Commission Nationale du Débat Public⁴⁰. Ce débat devrait avoir lieu assez tôt pour permettre d'adapter le projet en fonction des observations et des échanges du débat, donc très en amont des choix industriels.

5.7.9 Production de valeur locale

Dans l'approche classique des projets maritimes et littoraux (portage par un développeur), les territoires sont en général en position défavorable pour obtenir un retour local notable sur le territoire, puisqu'ils ne participent pas à la gouvernance du projet, ne maîtrisent pas les autorisations (Etat), le capital (privé, ou en cas de partenariat public-privé dominé par le financement privé), les approvisionnements ou le choix des entreprises chargées des travaux, la localisation des bases d'exploitation ou de maintenance, etc. Au bilan, les territoires doivent généralement se contenter de « retombées » plus ou moins contractualisées, mais généralement limitées à une fraction des coûts du projet.

Par ailleurs, une grande partie de *la production issue des activités maritimes ne bénéficie que marginalement aux territoires* qui accueillent les moyens de production ou dont les ressources sont

⁴⁰ Dont le rôle serait plutôt d'animer au niveau national les débats au niveau stratégique, comme celui de la PPE ou de la SNML

exploitées par ces moyens. En ce qui concerne l'énergie, par exemple, elle se contente souvent de traverser le territoire littoral sans que celui-ci ne bénéficie en rien de cette situation⁴¹.

Le développement d'un projet porté par les acteurs du territoire, et dans la gouvernance et le financement duquel ils auraient une place notable, permettrait de *maximiser la production de valeur locale*, qui peut être matérielle (valeur économique et financière, emplois, infrastructure), directe, indirecte ou induite, ou immatérielle (connaissances, culture...), et finalement contribuer à augmenter le capital maritime du territoire et donc sa capacité à porter des développements futurs dans le domaine de *l'économie bleue*.

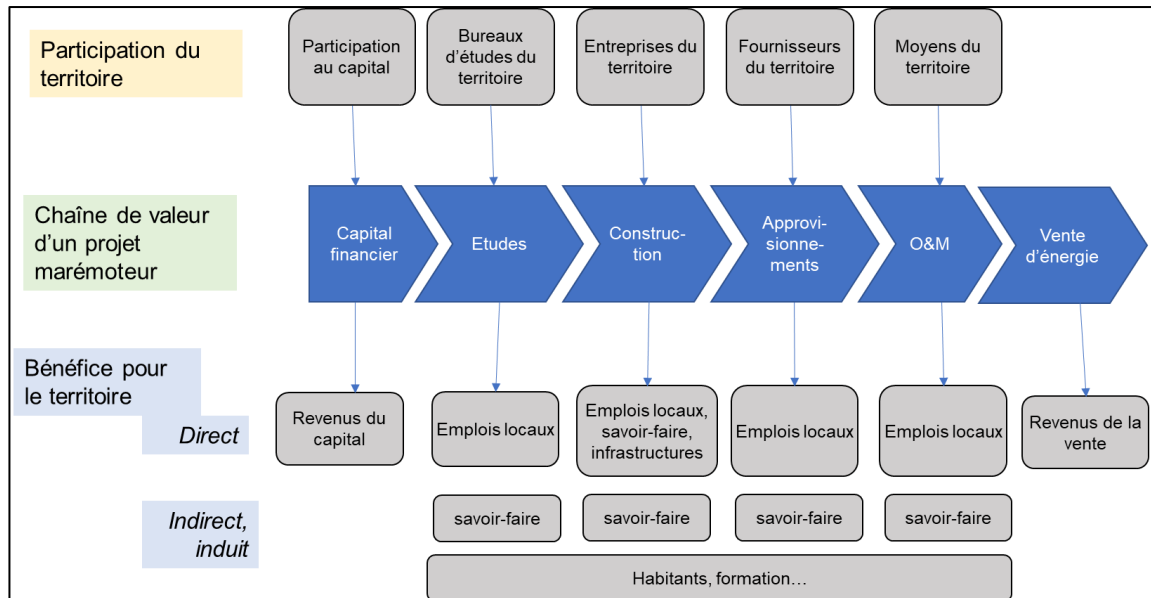


Figure 29 - Retour local pour un projet porté par un territoire – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

⁴¹ Cette situation est très générale pour les activités maritimes, et non spécifique à l'énergie ; granulats, poisson, pétrole et gaz, marchandises... sont rarement pleinement valorisés sur le territoire qui les produit ou les accueille...

5.8 Annexes

5.8.1 Annexe 1 - Typologie des interactions, des conflits, des synergies

Nature	Interactions	Conflits possibles	Synergies possibles	Observations
Espace maritime	Utilisation des mêmes espaces Interactions dans des espaces proches	Conflit pour l'espace maritime (tous usages : transport, pêche, plaisance, aquaculture, extraction, activités régaliennes, câbles...)	Utilisation partagée de l'espace maritime géré ou créé, création de bassins adaptés à d'autres activités	Bassin de plaisance, stockage gravitaire (énergie), aquaculture...
Espace terrestre et littoral	Utilisation des mêmes espaces Interactions avec espaces proches	Conflit pour l'espace portuaire, l'espace littoral (usine, raccordement...)	Création de plages artificielles Protection côtière	
Accès à la zone	Conditions d'accès (horaires, seuils...)	Réduction d'activité ou contraintes sur les activités, modification de moyens		Ex : mise en place de seuils ou d'écluses, accès par chenaux
Bathymétrie	Modification de la bathymétrie	Limitation d'accès ou d'espace pour certaines pratiques	Creusement de chenaux, zone de mouillage en eau profonde...	Ex : creusement de bassin/construction de digue
Hydrodynamique	Modification des courants, du marnage, de la circulation	Envasement, érosion côtière...	effets sur l'érosion côtière	
Conditions thermiques	Modification des températures	Contraintes pour certaines activités, risques d'échauffement	Opportunités pour certaines activités	Ex : tourisme balnéaire si temp. plus élevées Cultures marines (été)
Sédiments	Modifications du transport sédimentaire	Ensablement, affouillement, modification de nature	Contrôle flux de sédiments, effets sur l'érosion côtière	Atténuation du transport littoral (gestion de plages),
Biologiques ou chimiques	Nutriments, polluants : modifications des flux ou de la circulation, modification de salinité (abords d'estuaires)	Blocage d'arrivée de nutriments, confinement de polluants ou d'espèces invasives, réduction/augmentation de salinité	Protection contre pollutions marines accidentelles	Effet barrage Eaux de ballast
Risques	Pour la sécurité des personnes et des biens :	Augmentation des risques : sécurité (collisions,	Réduction des risques ; surveillance,	Intervention des moyens de secours ou de

	collision, croches, pollutions	échouements, turbulences, turbines...), pollution...	atténuation de phénomènes naturels, confinement	lutte contre la pollution Mines et engins explosifs
Etat de mer	Modification des états de mer dans la zone	Plan d'eau trop tranquille	Plan d'eau tranquilisé utilisable par d'autres activités Réduction de l'érosion côtière	Surf Erosion de falaises
Moyens maritimes	Utilisation de moyens maritimes (sauf infrastructures) : navires, bouées. Télécommunications, surveillance		Mutualisation de moyens maritimes : construction, maintenance	
Infrastructures terrestres	Mobilisation des mêmes infrastructures (ports, câbles, routes...)	Compétition	Partage/cofinancement Utilisation par d'autres activités Création d'îles artificielles	Ex : pont, digue
Infrastructures maritimes et littorales	Modification de la navigation Création de digues Usages partagés (câbles, pieux, bouées,	Compétition	Partage ou accueil, valorisation pour d'autres usages	Ex : colocalisation, éoliennes sur digues,
Infrastructures portuaires	Utilisation des mêmes espaces portuaires, accès aux ports	Limitation d'accès, concurrence pour l'usage des quais, appareillages et parkings...	Partage, co-développement ou co-financement	
Matériaux marins ou terrestres	Utilisation de grandes quantités de matériaux terrestres ou marins	Conflit pour l'accès aux ressources, modifications de la bathymétrie ou de la sédimentologie (construction)	Projet intégré (matériaux marins), incluant toutes les activités dans la zone du projet	Ex : digues construites avec les matériaux extraits du bassin
Energie	Atténuation	Conflits entre filières EMR (hydrolien, houlomoteur)	Mutualisation de projets, projets co-construits	Ex : production houlomotrice sur digue

5.8.2 Annexe 2 - Incidences potentielles pour chaque activité

Activité concernée	Transport maritime
Nature et importance des interactions potentielles	Mobilisation d'espace maritime inaccessible ou sous conditions d'accès (écluses, horaires...) Obstacles à la navigation Modification de la bathymétrie (chenaux dragués...)
Impacts potentiels	Allongement de routes Risques additionnels (collision, échouement...) Mobilisation d'espaces réservés (zones d'attente, de mouillage)
Synergies potentielles	Plan d'eau tranquillisé Ports ou terminaux déportés en mer
Mesures pour réduire les conflits ou favoriser les synergies, compensations possibles	Prise en compte du trafic maritime dans la conception du projet (éloignement des routes de navigation et des zones d'attente, mutualisation d'infrastructures)

Activité concernée	Tourisme maritime et littoral
Nature et importance des interactions potentielles	Mobilisation d'espace maritime inaccessible ou sous conditions d'accès (écluses, horaires...) Obstacles à la navigation Modification de la bathymétrie Impacts paysagers
Impacts potentiels	Allongement de routes Risques additionnels (collision, échouement...) Mobilisation d'espaces réservés (zones de mouillage)
Synergies potentielles	Plan d'eau tranquillisé Attraction touristique (y compris tourisme industriel)
Mesures pour réduire les conflits ou favoriser les synergies, compensations possibles	Prise en compte du trafic maritime dans la conception du projet (éloignement des routes de navigation et des zones d'attente)

Activité concernée	Pêche professionnelle
Nature et importance des interactions potentielles	Mobilisation d'espace maritime inaccessible ou sous conditions d'accès (écluses, horaires...) Obstacles à la navigation Modification de la bathymétrie (notamment en zones d'extraction de matériaux) Obstacles sous-marins (engins remorqués) Déplacement de ressources halieutiques
Impacts potentiels	Allongement de transit vers zones de pêche Interdiction totale ou partielle d'accès à certaines zones

	Limitations d'emploi de certains engins de pêche (chalut...) Risques additionnels (collision, échouement...) Mobilisation d'espaces privilégiés (gisements...) Report de l'effort de pêche vers d'autres zones Surveillance renforcée Zones d'extraction de matériaux marins
Synergies potentielles	Plan d'eau tranquillisé (pêche possible en cas de mauvais temps) Effet « récif » des infrastructures nouvelles (augmentation des ressources) Protection physique contre certaines techniques pêche (chalutage...) Surveillance renforcée (gestion de la ressource) Protection contre les pollutions marines Amélioration de la connaissance Ports de pêche offshore
Mesures pour réduire les conflits ou favoriser les synergies, compensations possibles	Prise en compte de la pêche dans la conception du projet (pratiques, zones de pêche, importance en termes économiques), y compris suivi et évaluation Soutien à l'évolution des pratiques (techniques de pêche) Fourniture d'énergie produite localement

Activité concernée	Cultures marines Pisciculture, conchyliculture, algoculture
Nature et importance des interactions potentielles	Les cultures marines utilisent l'espace (tables, cordes, filières, cages) Elles dépendent de la marée (marnage, courants) Elles utilisent des flux de nutriments venus de la terre Elles sont sensibles aux effets de confinement et aux pollutions Elles sont sensibles aux états de mer (tranquillité du plan d'eau)
Impacts potentiels	Problèmes d'accès aux installations de cultures marines Réduction des flux de nutriments Réduction des surfaces disponibles pour les cultures marines Courants ou niveaux d'eau inadaptés
Synergies potentielles	Plan d'eau tranquillisé et protégé Partage de moyens nautiques (service et maintenance) et d'installations portuaires Consommation locale de l'énergie marémotrice (navires et barges, pompes, etc.) Pollutions d'origine terrigène ou marine : protection (confinement)
Mesures pour réduire les conflits ou favoriser les synergies, compensations possibles	Co-conception, co-développement <u>Energie</u> : prévoir l'utilisation par l'exploitation aquacole de l'énergie produite <u>Espace</u> : réserver une partie de l'espace confiné aux cultures marines <u>Hydrodynamique</u> : prendre en compte les besoins et contraintes de l'aquaculture dans la conception et l'exploitation de l'installation marémotrice <u>Nutriments</u> : modélisation des flux/consommations de nutriments (modélisation de l'écosystème interne au bassin)

Activité concernée	Plaisance et loisirs nautiques
Nature et importance des interactions potentielles	Modifications d'accès : horaires, tirants d'eau, courants... (ex. : accès par sas en fonction de la marée, seuil, écluse...) Modifications du régime hydrodynamique (chasses, atténuation/amplification de courants...) Modification des états de mer (atténuation de houle et vagues...)

	Risques (digues, tourbillons, turbines...)
Impacts potentiels	Plan d'eau tranquillisé (houles/vagues) : conflits avec activités nautiques exploitant les vagues (surf, kite surf, planche...)
Synergies potentielles	Création ou agrandissement de plan d'eau adapté à certaines activités (école de voile, plaisance légère, kayak, aviron, ski nautique...)
Mesures pour réduire les impacts ou favoriser les synergies, compensations possibles	Co-construction avec collectivités et acteurs concernés Consommation locale d'énergie marémotrice Aménagement et fonctionnement adapté (écluses, seuils, horaires d'ouverture...)

Activité concernée	Extraction de matériaux (granulats marins)
Nature et importance des interactions potentielles	Possibilité ou non d'extraction dans les bassins Modification des routes et des temps de transit Limitations d'accès à certaines zones de concession
Impacts potentiels	Interdiction d'accès à des ressources identifiées Allongement des temps de transit entre zones d'extraction et port de débarquement
Synergies potentielles	Utilisation des matériaux extraits pour la construction des infrastructures
Mesures pour réduire les impacts ou favoriser les synergies, compensations possibles	Association au projet des extracteurs autorisés, projet commun Extractions dans le bassin après construction (augmentation de la capacité des bassins)

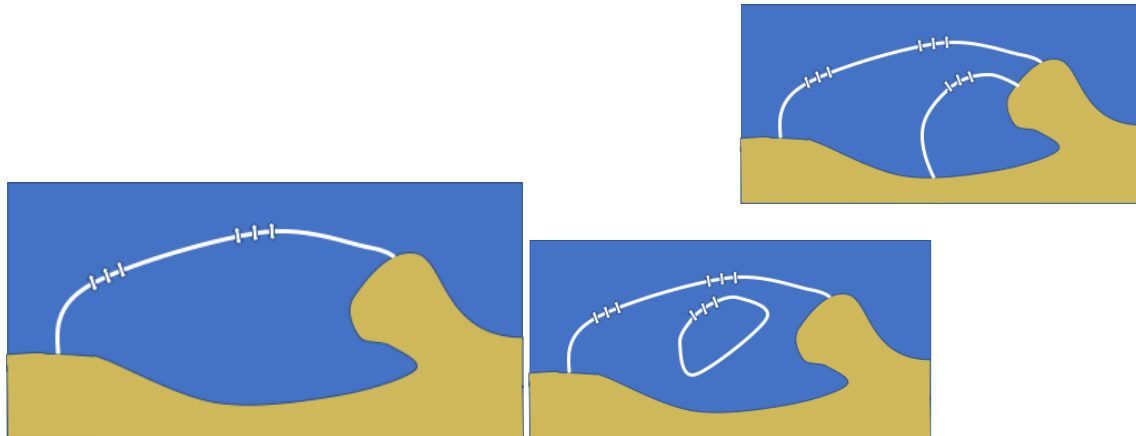
Activité concernée	Câbles et pipe-lines
Nature et importance des interactions potentielles	Intersection des infrastructures (digues...) et des câbles avec les câbles existants Risques pour les câbles lors des travaux
Impacts potentiels	
Synergies potentielles	Utilisation des infrastructures du projet marémoteur pour implantation aérienne de segments de câbles ou le raccordement au réseau terrestre Limitation d'accès à des pratiques impactantes pour les câbles (dragues, chaluts)
Mesures pour réduire les impacts ou favoriser les synergies, compensations possibles	Conception du projet (prise en compte des câbles)

Activité concernée	Activités régaliennes (police, sécurité, sûreté, intervention)
Nature et importance des interactions potentielles	Limitation d'accès à l'espace (spatiales/temporelles) Obstacles aériens, sous-marins
Impacts potentiels	Risques (sécurité), menaces (utilisation malveillante des infrastructures) Limitation des capacités d'intervention (maritime, aérienne)
Synergies potentielles	Contrôle de l'accès aux bassins, de l'activité dans les bassins
Mesures pour réduire les impacts ou favoriser les synergies, compensations	Association des autorités et organismes compétents à la conception du projet Moyens communs

Activité concernée	Production d'énergie en mer (autre que marémoteur)
Nature et importance des interactions potentielles	Infrastructures en mer pouvant accueillir des capteurs ou des installations. Obstacles, plan d'eau tranquillisé houle et vagues)
Impacts potentiels	Houles et vagues amorties dans le bassin
Synergies potentielles	Infrastructures susceptibles d'accueillir des installations houlomotrices (digue extérieure), des panneaux photovoltaïques et des éoliennes (digue ou lagon). Le lagon peut accueillir des panneaux solaires flottants.
Mesures pour réduire les impacts ou favoriser les synergies, compensations	

Activité concernée	Surveillance (de l'environnement, des activités)
Nature et importance des interactions potentielles	Masquage des moyens de surveillance (radar, optique...) Perturbations des communications Perturbation des conditions météo-océanographiques
Impacts potentiels	Réduction de la couverture par les moyens de communication ou de surveillance Dégradation des mesures, mesures impossibles
Synergies potentielles	Implantation de moyens de surveillance sur les infrastructures maritimes ou côtières (radar, moyens de communication...) Implantation de stations côtières de surveillance de l'environnement Partage de moyens (ex : moyens flottants)
Mesures pour réduire les impacts ou favoriser les synergies, compensations	Conception du projet (implantation, conception des infrastructures) Coopération avec les autorités (surveillance) Coopération avec les organismes chargés de la surveillance

5.8.3 Annexe 3 – Exemple d'analyse des interactions pour un projet marémoteur de type « lagon littoral »



Les projets marémoteurs de ce type conduisent à la création d'un lagon littoral important, relativement isolé de la mer (turbines, écluses), bien abrité des vagues et de la houle, directement connecté à la côte sur des longueurs importantes.

Une partie au moins de la digue extérieure est connectée au littoral et peut recevoir des réseaux (route, câbles, canalisations...)

Cette situation est **favorable** au développement des activités suivantes :

Loisirs

- Activités balnéaires (plages, y compris plages artificielles sur la partie intérieure de la digue connectée (ou non : navettes) au littoral
- Sports nautiques (sauf surf) : kayak, voile légère, kite-surf... et événements associés
- Pêche de loisir

Cultures marines

- Conchyliculture au-delà du littoral (cordes...), crustacés
- Pisciculture de pleine eau (cages), écloserie...
- Algoculture

Transport maritime

- Terminaux offshore (produits pétroliers, gaz, conteneurs..), y compris stockage (produits dangereux)

Energie

- Connexions électriques (interconnexions sous-marines, connexion de parcs éoliens ou autre offshore)
- Production d'énergie houlomotrice (installations sur la digue extérieure)
- Production d'énergie éolienne (éoliennes posées sur la digue ou à proximité)
- Production solaire (digue, installations fixes)
- Stockage (lagon intérieur)
- Régulation du système électrique (stockage dans le bassin principal)

Télécommunications

- Raccordement de câbles sous-marins
- Relais de télécommunications déportés sur la digue (GSM, WiFi...)

Ces projets peuvent être **défavorables** :

- Au maintien des activités de pêche professionnelle (mais moyennant des évolutions des pratiques, pas à la pêche professionnelle en général)
 - o mais on peut envisager des installations liées à la pêche sur la partie de la digue connectée au littoral : port, mouillage, point de débarquement...
- A la navigation maritime, y compris de plaisance (limitations ou contraintes d'accès)
- Aux activités de défense (exercice)
- Aux activités de police (limitations d'accès)

Ces projets peuvent **contribuer au développement** de nouvelles activités maritimes et littorales, au-delà de celles listées ci-dessus :

- Tourisme industriel
- Tourisme littoral (piste cyclable...)
- Habitat côtier et flottant (loisirs, habitat permanent)
- transport maritime urbain et littoral à l'intérieur du lagon (taux de disponibilité élevé)
- Plus généralement, au développement territorial ou à la revitalisation de territoires notamment dans les friches industrielles

Ces projets peuvent par ailleurs **contribuer aux fonctions suivantes** :

Protection côtière

- Protection contre les surcotes et les inondations littorales
- Réduction de l'érosion côtière

Sécurité et sûreté maritimes

- À l'intérieur du lagon (toutes activités, professionnelles ou de loisirs)
- A l'extérieur du lagon : base pour navires de secours (SNSM...), installations déportées de surveillance (tour radar, AIS, caméras)

Protection contre les pollutions marines accidentelles

- La digue constitue un barrage contre les pollutions venant de la mer

Paramètres susceptibles de faciliter l'intégration des projets

- préservation des routes de navigation et des accès aux ports
- circulation possible sur la digue ou une partie de la digue
- écluses ou accès suffisant à l'intérieur du lagon
- accès gratuit ???
- intégration architecturale et paysagère (nouveau patrimoine maritime)
- valorisation de la digue pour le développement d'activités nécessitant des infrastructures en mer

5.8.4 Annexe 4 – Trois scénarios envisageables

Scénario 1 : « Protection du littoral et production d'énergie »

Ce scénario peut être envisagé dans une région où existent des enjeux littoraux importants, menacés par des risques littoraux (érosion, submersions marines). Dans ces zones où le déplacement des activités littorales n'est pas envisageable (zones fortement urbanisées, par exemple), la construction d'infrastructures littorales (digues, etc.) apparaît souvent comme une solution réaliste, mais se heurte à des obstacles financiers et techniques.

Un scénario envisageable

Le changement climatique entraîne une recrudescence des phénomènes météo-océanographiques extrêmes, telles que surcotes. A leur tour, ces phénomènes accélèrent l'érosion des côtes sableuses et sont à l'origine de submersions qui menacent des zones basses urbanisées, ou occupées par des activités littorales telles que des cultures marines.

Pour limiter les conséquences de ces phénomènes et les risques associés, il est décidé d'implanter au large d'une zone menacée par les submersions marines et l'érosion littorale un ensemble de digues à quelques kilomètres de la côte, parallèle à la côte, dans des profondeurs de l'ordre de 15 m.

Objectif principal : contrôler les niveaux de mer et l'état de mer (houle, vagues).

La *production d'énergie* est un objectif important mais secondaire pour le cahier des charges.

Enfin, un *objectif secondaire* est de développer un maximum d'activités économiques dans le bassin ainsi créé, et de contribuer à structurer une nouvelle image de la région autour de cette infrastructure majeure.

Un scénario de ce type pourrait être structuré selon deux options

Option 1 : pas de port important dans la zone enclose. Fermeture complète possible par des portes avec une ou deux écluses

- Intérieur : bassin de plaisance, cultures marines
- Circulation possible sur la digue
- Port déporté (pêche, plaisance)

Option 2 : il existe au moins un port important dans la zone enclose par les digues, dont il importe de préserver l'accès facile à toute heure par des navires de taille importante

La digue peut être coupée de chenaux et de portes flottantes



Figure 30 - Maeslant Barrier, Pays-Bas

Les portes sont équipées de turbines bidirectionnelles. Elles peuvent être ouvertes pour laisser passer de grands navires.

Scénario 2 : « Développement des activités maritimes et littorales »

Dans certaines zones, le développement des activités maritimes apparaît comme une option majeure pour le développement territorial.

Objectif principal : réaliser une infrastructure majeure susceptible de permettre le développement harmonieux d'un maximum d'activités maritimes et littorales

Objectifs secondaires envisageables : amélioration de la qualité de l'environnement marin (protection contre les pollutions côtières), protection contre les submersions marines (surcotes)

Un tel projet peut se construire autour d'un lagon marémoteur (digues connectées à la côte) permettant :

- La production d'énergie marémotrice (turbines ou hydroliennes) et le cas échéant houlomotrice (installations sur la digue extérieure) et éolienne (ex. : éoliennes fixes implantées sur la digue, éoliennes aériennes ancrées sur la digue)
- L'expérimentation de systèmes de production d'énergie marine (profitant de la digue, raccordement au réseau)
- La tranquillisation du lagon, qui peut être réservé à des activités de production (cultures marines animales ou végétales pour l'alimentation ou les biotechnologies) et à des activités touristiques (nautisme léger, loisirs nautiques, pêche de loisir...)

Le lagon ne devrait pas englober de port important, mais pourrait donner accès à des ports secondaires et des ports de plaisance, accessibles par une ou deux écluses implantées dans la digue.

Scénario 3 : « Production d'énergie »

Ce scénario privilégie la production d'énergie.

L'objectif principal est de maximiser la production d'énergie à partir des installations marémotrices, et accessoirement de participer à la régulation énergétique.

Les *objectifs secondaires* peuvent être selon le cas environnementaux ou économiques (activités de loisir ou de production aquacole, par exemple).

Production d'énergie : marée, vent, vagues

- Dignes reliées ou non au trait de côte ; pas besoin de ménager un passage pour la navigation, sinon pour accéder au bassin intérieur (une ou deux écluses ?)
- Turbines bidirectionnelles dans la digue
- Systèmes de captage de l'énergie de la houle implantés sur la digue extérieure
- Eoliennes sur la digue et/ou dans le bassin délimité par la digue
- Autres dispositifs de production d'énergie (ex : cerfs-volants avec génératrice sur digue⁴²)

Stockage et régulation

La priorité étant énergétique on peut imaginer d'utiliser le lagon comme une réserve d'énergie potentielle (rétention temporaire d'eau ou pompage/turbinage)

5.8.5 Annexe 5 - Bibliographie

- ATKINS (2008) Severn Barrage - Feasibility of "Tidal Reef" Scheme
- HENDRY (2016) THE ROLE OF TIDAL LAGOONS
- CEBR (2014) The Economic Case for a Tidal Lagoon Industry in the UK
- TLSB (2014) The Proposed Tidal Lagoon Swansea Bay (Generating Station) Order – Environmental Statement: Non-Technical Summary
- EDF (2016) Création de valeurs autour des ouvrages hydroélectriques – Usine marémotrice de la Rance

⁴² Voir par exemple <http://www.kitegen.com/en/>

6 ETAT DE L'ART TECHNICO-ECONOMIQUE

6.1 Turbines et équipements électriques

Cette partie présente les turbines et autres équipements permettant la production d'énergie marémotrice entre la mer et un bassin dont le niveau peut être contrôlé par un ouvrage artificiel du type digue, barrage ou toute autre installation permettant de créer une retenue.

6.1.1 Turbines pour aménagement marémoteur classique

Les solutions déjà opérationnelles et installées dans les centrales marémotrices de la Rance en France vers 1960 et de Sihwa en Corée du Sud 50 ans plus tard utilisent la solution éprouvée des turbines bulbes.



Figure 31 : Coupe d'une usine marémotrice avec turbine bulbe

6.1.1.1 Turbines bulbes classiques

Les turbines bulbes ont été développées il y a plus de 70 ans pour équiper les rivières à grand débit, selon un mode de fonctionnement dit « au-fil-de-l'eau », c'est-à-dire pour turbiner à chaque instant le débit disponible dans la rivière. Elles sont adaptées au fonctionnement sous des dénivelées de 2 à 25m environ, pour des grands débits unitaires (de 100 à plus de 600 m³/s par machine). Ce sont les turbines dont la roue ressemble à une hélice de bateau : 3, 4, ou 5 pales profilées et orientables sont montées sur un moyeu en forme d'ogive. Elles équipent depuis 1950 les grandes rivières à faible dénivelée comme le Rhône, le Rhin, le Danube, le Mississippi.



Figure 32 : Turbine bulbe

L'eau arrive par la gauche, et passe autour de la carcasse avant d'atteindre la roue et de la faire tourner. Dans le bulbe étanche est logé l'alternateur, relié à la roue par l'arbre de transmission, lui-même guidé dans sa rotation par 2 paliers : l'un près de la roue, l'autre près de l'alternateur. La roue est constituée de pales autour d'un moyeu dans lequel est situé le mécanisme de réglage de l'angle des pales. Ce mécanisme est manœuvré par un fluide en pression (classiquement de l'huile, mais de plus en plus souvent de l'eau) qui transite dans des tubes situés au centre de l'arbre

La déclinaison marémotrice des bulbes a été étudiée la première fois en France en 1955 sous forme de démonstrateur marémoteur à St Malo, avant d'être confirmée, optimisée et installée en 24 exemplaires dans l'ouvrage marémoteur de la Rance, dans les années 1960.

Ces machines étaient très novatrices en leur temps.

Le premier challenge était de les faire fonctionner dans l'eau de mer, et donc de choisir les matériaux et les protections adéquats. Plus de 50 ans de bons et loyaux services ont démontré et continuent à démontrer la validité des choix faits à l'époque : roues en inox, structures en acier protégé par protection cathodique.

Le second challenge était de faire fonctionner la turbine bulbe comme une turbine pompe, mais en plus dans les deux sens du flux : de la mer vers le bassin et du bassin vers la mer. Le tracé hydraulique de la turbine avait alors fait l'objet d'études particulières pour que les bords des pales puissent alternativement jouer le rôle de bord d'attaque et de bord de fuite, et que le profil de l'aube lui permette de travailler à rendement raisonnable dans tous les modes opératoires. Le profil des pales avait été conçu selon ce compromis, ce qui explique les rendements abaissés de plusieurs pour cents dans chaque sens par rapport à un bulbe classique, mais c'était le meilleur compromis possible il y a 50 ans.

La technique de l'alternateur-moteur était quant à elle déjà maîtrisée grâce aux turbines pompes, elle a toutefois fait l'objet de quelques adaptations particulières, comme la vitesse d'emballement plus élevée des bulbes, et l'opération en environnement salin.

Bien maintenues, ces turbines produisent toujours de l'énergie marémotrice avec la même régularité qu'à leur début.

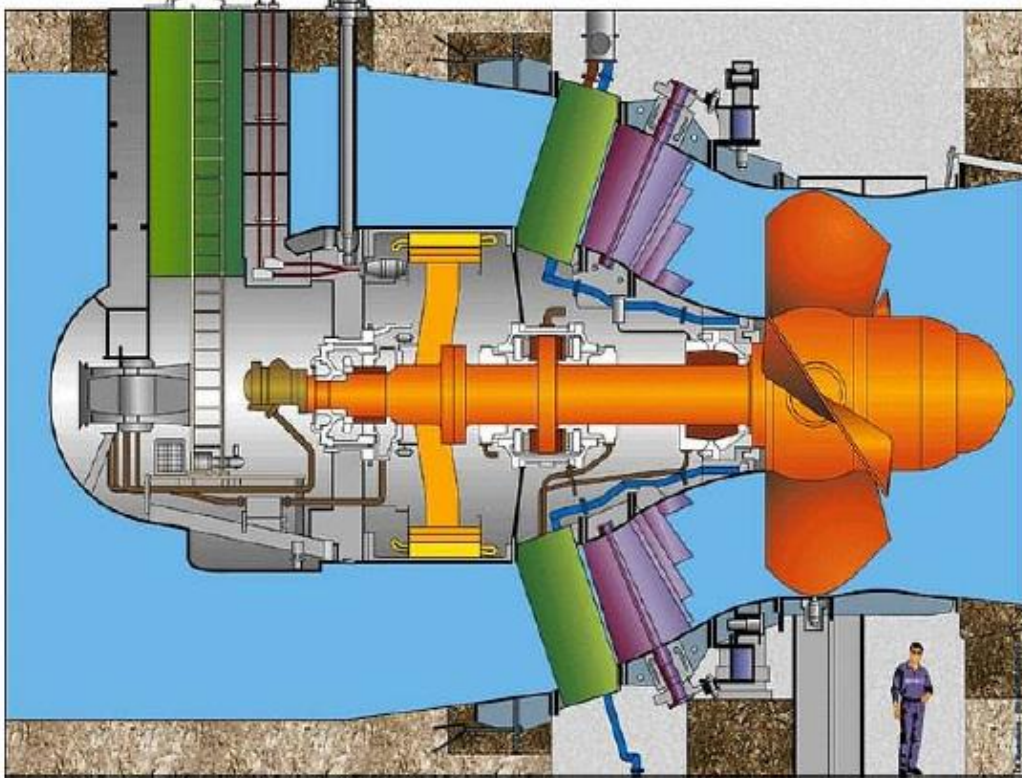


Figure 33 : Un groupe de La Rance, en coupe

La partie tournante et active est en orange : roue, arbre, alternateur-moteur. Les autres parties sont non-tournantes.

6.1.1.2 Progrès récents

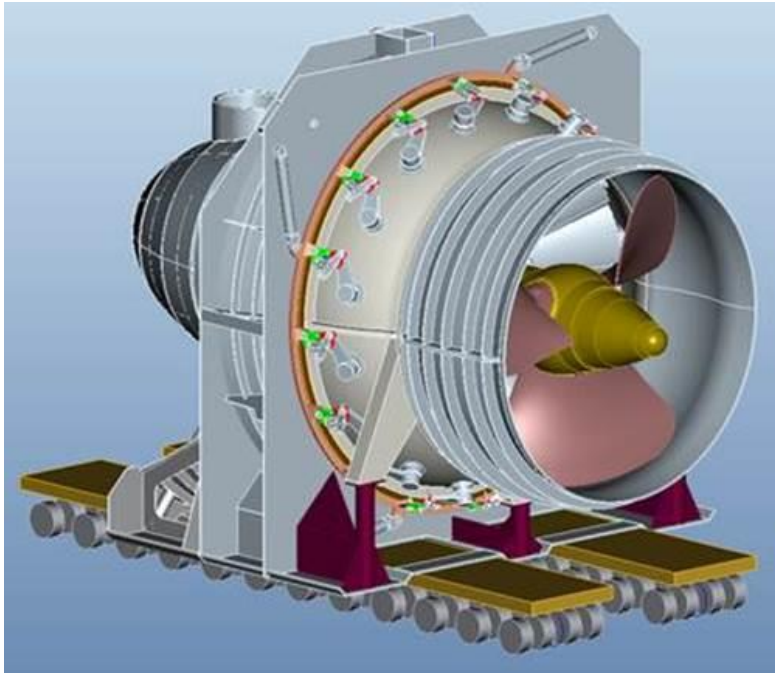
Les turbines bulbes ont fait l'objet d'améliorations régulières, essentiellement sur 2 plans :

- leurs performances. Leur tracé hydraulique a bénéficié des avancées des simulations numériques et de l'expérience. Elles présentent aujourd'hui des rendements plus élevés, au-delà de 92% à leur meilleur point de rendement, et elles fonctionnent bien sous des chutes et des débits très variables.
- leur conception mécanique a été optimisée pour les rendre plus économiques à construire et exploiter.

La première grande amélioration est électrique. Il s'agit du passage à la vitesse variable. L'électronique de puissance utilisée dans les convertisseurs de fréquence a fait d'importants progrès. Dans le cas des machines marémotrices, il est envisagé de concevoir des alternateurs-moteurs ayant moins de pôles électriques que ce qu'il faudrait pour produire l'électricité à la fréquence de 50Hz, et d'utiliser le convertisseur de fréquence non seulement pour faire varier la vitesse, mais aussi pour jouer le rôle d'un multiplicateur électrique de vitesse.

La seconde amélioration notable est mécanique : les pales de la roue pourront être retournées de 180°, grâce à un mécanisme spécifique situé au centre de la roue. De cette façon, c'est toujours le même bord qui se présentera en face à l'écoulement, aussi bien à marée montante qu'à marée descendante.

6.1.1.3 Installation



Plusieurs scénarios de construction et d'installation sont envisagés.

Ci-contre un exemple dans lequel il est prévu que le cœur de la machine soit monté entièrement au sec dans un hangar proche du lieu d'implantation, puis transporté tout monté sur un chariot avant d'être installé à sa place définitive d'un seul bloc. Le béton sera ensuite coulé autour de la turbine pour la fixer aux structures.

Figure 34 : Un groupe bulbe, montage dit « en cassette »

Il existe d'autres solutions : le montage classique, la turbine étant montée sous-ensemble par sous-ensemble en même temps que le génie civil est construit autour. L'avantage est que l'on n'a pas besoin de transporter d'ensembles très lourds, mais l'inconvénient est un ralentissement du chantier à cause d'un interfaçage beaucoup plus important entre les différents corps de métier. La troisième solution est le montage en caisson, qui est une version plus extrême du montage en cassette puisque la turbine est montée entièrement au sec dans un caisson structurant (soit en béton, soit en métal) puis l'ensemble est amené par flottaison jusqu'au lieu de son implantation avant d'être coulé en place, puis lesté de béton.

6.1.1.4 Gamme de fonctionnement

Les turbines de type bulbe sont bien adaptées aux sites de marée importante. Néanmoins, grâce à leur grande adaptabilité aux variations de chute et de débit, elles peuvent encore être rentables sous certaines conditions (forme et taille du site marémoteur) jusqu'à une marée moyenne de 3.50m.

6.1.1.5 Modes opératoires

Les groupes bulbes peuvent réaliser l'ensemble des modes opératoires exposés au 3.3.2 :

- Turbinage Simple flux, comme à Sihwa ou comme pour le projet de Derby en Australie
- Turbinage Double flux, comme à la Rance ou comme pour le projet Sihwa
- Pompage, dans les deux sens, en complément du turbinage, soit pour optimiser la production électrique, soit pour diminuer les contraintes ou optimiser les bénéfices environnementaux.

Lorsque seules les considérations de maximisation de production d'énergie sont considérées, les groupes bulbes permettent alors de réaliser (avec S la surface du lagon, en km² et H_m la marée moyenne sur le site, en m):

- Puissance totale équipée en MW $P = 0.62 S \times H_m^2$
- Production totale en GWh $E = 1.10 S \times H_m^2$

- Le facteur de charge équivalent d'une telle installation est proche de 20%

Ce maximum de production électrique est réalisé par le fonctionnement double effet, de type « scénario B » du §3.4.

6.1.2 Autres types de turbines

A côté des solutions éprouvées que sont les bulbes marémoteurs, des études sont menées dans le monde pour essayer de développer soit des solutions complémentaires (en général pour des marées de plus faible amplitude, ou pour des petits aménagements), soit des solutions concurrentes dont l'objectif final est de devenir globalement moins chères.

6.1.2.1 Les turbines pour très basses chutes, « VLH »

La société Française MJ2 a développé il y a un peu plus de dix ans un concept de turbines pour très basses chutes.

Ces machines fonctionnent sous des chutes maximales de 3.5m, et ont une puissance maximale de 500kW unitaires. L'alternateur est à aimants permanents et à vitesse variable. La vitesse d'écoulement dans la roue est 4 à 5 fois plus lente que dans une turbine bulbe, ces turbines sont donc de grand diamètre (de 3,1 à 5m de diamètre, alors qu'un bulbe classique aurait un diamètre d'environ 2 fois plus petit pour la même puissance et la même chute), mais en contrepartie elles requièrent moins de génie civil qu'un bulbe.

Elles rencontrent donc un bon succès commercial dans l'équipement de petites ou moyennes rivières, surtout lorsqu'une digue ou un petit barrage existe déjà, éventuellement pour d'autres applications (irrigation, navigation, crues, etc...).

Une autre particularité est que les 8 pales qui sont jointives en position « fermées » afin d'obstruer le conduit, ce qui évite le recours à un distributeur étanche ou à une vanne.



Stator VLH DN 3550

Figure 35 : Roue VLH (en rivière)

MJ2 réfléchit actuellement à l'adaptation de ces machines à l'eau de mer, et à un fonctionnement dans les deux sens d'écoulement, afin d'équiper des moulins à marée ou de petites usines marémotrices dans des lieux à faible marée. Elle étudie également la possibilité de coupler cette machine avec l'invention décrite dans le chapitre suivant.

Dans le cas d'une application marémotrice, cette turbine se comporterait donc comme une turbine bulbe classique, type La Rance, mais avec des particularités constructives spécifiques :

- Il s'agit d'une turbine Kaplan à 8 pales à angle variable et distributeur fixe, cependant dans l'application marémotrice elle serait positionnée à l'horizontale ; voir chapitre suivant)
- La puissance unitaire ne dépassera pas 1 MW elle se situera plutôt aux environs de 700 kW maximum pour la plus grosse machine de 5 m de diamètre.
- Elle est équipée d'un alternateur à aimant permanent et attaque directe et de très basse vitesse de rotation (30 à 50 tr/mn comme la turbine) logé dans le bulbe pressurisé
- Elle est également équipée d'un convertisseur de puissance lui permettant de délivrer au réseau une électricité propre à la consommation et lui conférant également la capacité de faire varier sa vitesse de rotation. De ce fait, la courbe de rendement reste très plate même lorsque la chute est réduite à 30% de la chute nominale. Dans les faits la machine continue à fonctionner jusqu'au retour d'énergie.
- L'utilisation du convertisseur de fréquence permet d'envisager d faire fonctionner l'alternateur en moteur et de transformer la turbine en pompe. Par contre, le comportement et le rendement en mode pompage ne sont à ce stade pas connus, un démonstrateur pourrait permettre d'appréhender ce mode opératoire.
- Le concept VLH est basé sur une vitesse d'écoulement très faible, de 1 m/s en entrée et sortie, et de moins de 2 m/s au niveau de la roue. Grâce à ce dimensionnement, les VLH peuvent atteindre des rendements globaux de l'eau au réseau (toutes pertes déduites, turbines, alternateur, convertisseur, transformateur) de l'ordre de 80% malgré l'absence de conduit d'aménage ou de tubes d'aspiration aval. Ce qui lui confère des avantages spécifiques tels que :
 - Le génie civil requis pour l'implantation de ces machines est très simple et très court (voir divers exemples de plans guides ci-joint)
 - Les machines sont très peu enfoncées et non cavitantes
 - Toutefois, en configuration à axe horizontal, elles devront être enfoncées de manière à ce que les pales restent noyées, avec une hauteur d'eau minimale de 70 cm environ au-dessus d'elles, ce qui reste raisonnable et tout à fait comparable à l'installation des groupes marémoteurs de type bulbe.

Enfin, grâce à sa conception particulière (grande taille, vitesse de rotation très faible, gradient de pression très faible, bords de pales arrondis) la VLH est « Ichtyophile » (© MJ2 néologisme déposé par la société MJ2 pour qualifier la capacité à laisser passer les poissons à travers la turbine en fonctionnement sans mortalité). Cette caractéristique a fait le l'objet de 6 campagnes de test et a été validée par l'ONEMA et de deux campagnes de tests en Allemagne et en Belgique qui ont confirmé les résultats français. En conservant les mêmes caractéristiques à la version marémotrice, celle-ci sera également ichtyophile pour des poissons de taille comparable à ceux rencontrés dans les rivières.

Comme le bulbe, la VLH étant totalement submergée, elle est silencieuse et invisible.

Un démonstrateur à l'échelle 1 est nécessaire pour optimiser plus particulièrement :

- Le fonctionnement en mode pompe
- La protection anticorrosion, la protection cathodique, les effets électrolytiques entre les métaux constitutifs de la machine
- Les peintures et la protection dissuadant les organismes marins de s'implanter sur les parties noyées de la machine
- La conception des joints d'étanchéité d'arbre tournants en vue d'une maintenance réduite.

6.1.2.2 Un concept particulier : le « Turret »

Une société d'inventeurs norvégiens, Tidetec a déposé des brevets et est en train de développer un concept de retournement de la turbine marémotrice, grâce à des aides financières européennes.

Leur principe consiste à placer la turbine dans un très grand « tonneau », appelé « turret », pour retourner toute la turbine (qui pourrait être un bulbe marémoteur, ou une VLH), au lieu de ne retourner que les pales de la roue.

L'idée sous-jacente est qu'en retournant les pales de la roue d'un bulbe marémoteur, le rendement est bon dans le sens turbine directe, mais est réduit d'environ 14% dans le sens turbine inverse ; tandis que si toute la turbine était retournée, le rendement resterait élevé quel que soit le sens de l'écoulement. La turbine fonctionnant au premier ordre moitié en sens direct, moitié en sens inverse, cela apporterait un gain potentiel de productivité de 7%.

Mais dans le cas de la turbine de grandes dimensions de type bulbe le principe lui-même impose ses contraintes constructives : pour placer toute la turbine dans un tonneau de taille raisonnable, il faut en réduire grandement la longueur. Dans ce but, il est envisagé de faire revivre un vieux concept : la turbine « strafflo », qui est une turbine utilisant une roue de bulbe, mais dont l'alternateur est placé autour de la roue, au lieu d'être à côté. Afin de palier à une des difficultés des strafflo : l'étanchéité du rotor de l'alternateur (difficulté qui conduit à une maintenance fréquente, et réduit la disponibilité de la machine, ce qui explique que ce concept ait été très peu utilisé), il est envisagé d'utiliser un rotor qui peut fonctionner dans l'eau : l'alternateur à aimants permanents. Et pour transmettre le couple mécanique entre la roue et le rotor à aimants permanents sans avoir recours à des systèmes complexes et chers, il est envisagé de fonctionner avec une roue à pales fixes plutôt qu'à pales ajustables. Cette contrainte réduit le rendement intrinsèque de la roue sur une grande partie de la plage de chutes et de débits, ce qui réduit la productivité, les premières estimations montrent que cette réduction est d'environ 6%, soit à peu de choses près l'annulation du gain potentiel apporté par le retournement de toute la machine.

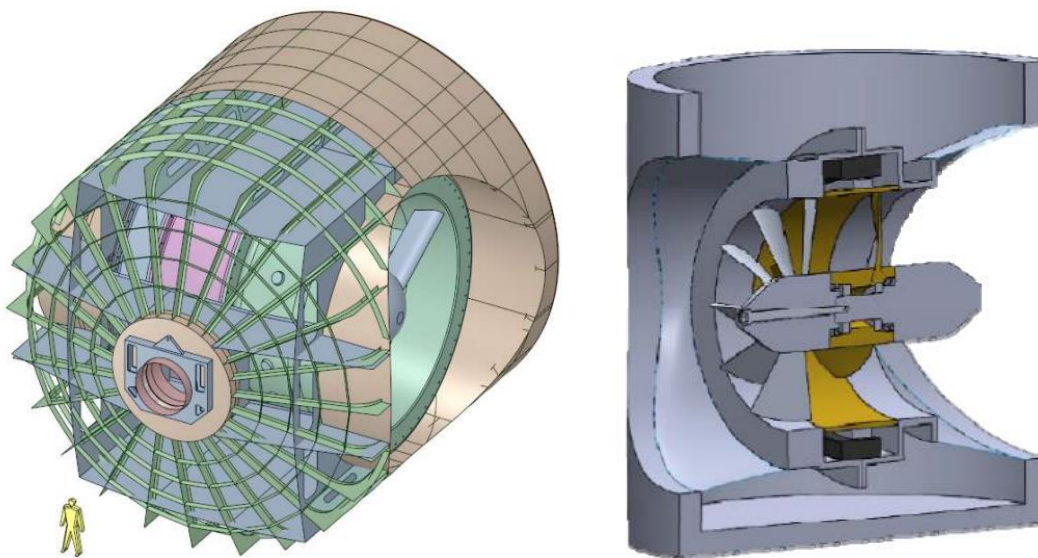


Figure 36 : « Turret » à axe horizontal, et « turret » contenant une turbine strafflo

Ceci ne condamne pas forcément cette solution. En effet, la turbine est très différente, le turre est un nouveau système, les coûts ne sont donc pas connus aussi bien que ceux de la solution éprouvée des bulbes. C'est une étude de coût, y compris une projection de coût à moyen terme, qui dira s'il vaut mieux basculer vers un retournement de toute la turbine ou rester avec un retournement des seules pales. Idéalement, cette solution a besoin d'un démonstrateur de grande taille pour apporter une réponse fiable.

Dans le cas de la turbine VLH, le système semble mieux adapté du fait de la forme même de la VLH qui est une turbine plutôt en forme de disque. La limite d'utilisation de cette solution viendra alors de la turbine VLH elle-même, qui est adaptée aux faibles chutes (inférieures à 4m) et qui est de faible puissance malgré son grand diamètre. Cela semble donc être une solution prometteuse pour des installations marémotrices modestes.

6.1.2.3 Les turbines orthogonales

C'est un concept différent de machines à axe vertical développé par des sociétés russes. Deux prototypes fonctionnent sur le site de Kislayaguba : un de 200kW depuis 2005, l'autre de 1.5MW depuis 2010. Elles semblent plutôt adaptées aux projets avec des dénivelées mer-bassin de 1 à 3 m. Leur génie civil est simple, la machine elle-même est simple et robuste. Mais leur production par ml d'ouvrage est assez faible, leur coût total de génie civil pour une centrale puissante sera élevé.

Leur gestion et leur impact sur l'environnement ne sont pas différents de ceux des autres solutions basse chute : VLH, maréliennes. Leur rendement semble limité à 75% pour des charges entre 1 et 3 m. Leur débit étant faible sous faible charge, leur utilisation nécessite des pertuis vannés additionnels.

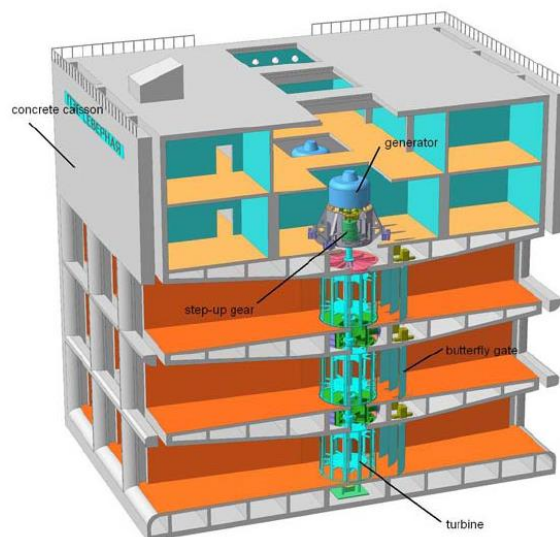


Figure 37 : Usine à turbines orthogonales russes

6.1.2.4 Les turbines contra-rotatives

D'autres solutions sont à l'étude dans plusieurs bureaux d'étude. Elles ont pour point commun d'imaginer des turbines à 2 roues, dites contra-rotatives, chacune étant très efficace pour un sens d'écoulement, et se mettant « en roue libre » dans l'autre sens (ou si ce n'est formellement en roue libre, du moins participe dans l'autre sens à mieux redresser le courant d'eau qui sort de l'autre roue pour que l'écoulement dans le divergent soit de bonne qualité et présente donc moins de pertes).

Toutes ces solutions en sont à l'état de concept. A notre connaissance aucun démonstrateur ni prototype n'est lancé.

Elles ont toutes pour but de remplacer l'une des solutions ci-dessus : bulbe pour marées d'amplitude élevée, ou autres solutions pour les plus petites marées. Leur étude repose sur le postulat que leur hydraulique pourra présenter le même haut rendement dans les 2 sens d'écoulement, même postulat que la solution du « Turret », et qu'elles deviendront économiques grâce à des fabrications en grande série, en utilisant d'autres matériaux que les turbines traditionnelles. En effet, les turbines traditionnelles utilisent surtout l'acier, dont une partie en inox, parfois la fonte d'acier comme les VLH. La forme et la conception de ces machines contra-rotatives devraient permettre d'utiliser des matériaux composites, comme c'est le cas de certaines turbines éoliennes.

6.1.3 Hydroliennes pour aménagement de type marélienne

Le concept de marélienne vient de l'idée d'utiliser des hydroliennes regroupées dans un même courant de grande dimension. C'est un chenal qui guide et contrôle le courant d'eau.

6.1.3.1 Les hydroliennes en pleine mer

1.1.1.1 Puissance maximum captable par la turbine

Quand une turbine hydrolienne est placée dans un environnement libre, elle se comporte comme une éolienne. Le fluide est libre de contourner la turbine. En 1919, Albert Betz étudie la puissance maximum qu'une turbine de ce type peut tirer du fluide le traversant. Il publie ainsi la loi de Betz, ou limite de Betz :

$$P_{\text{extraite}}^{\text{max}} = \frac{16}{27} \cdot P_{\text{incidente}} = \frac{16}{27} P_{\text{cinétique}} = \frac{16}{27} \cdot \left(\frac{1}{2} \rho S V^3 \right)$$

donc un $CP = 0.6$

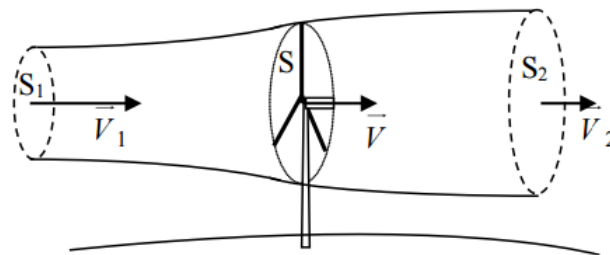


Figure 38 : tube de courant autour d'une éolienne ou d'une hydrolienne en pleine mer, et puissance maximale extraite

Cette formule montre que pour une hydrolienne en mer, la puissance maximale extraite varie au cube de la vitesse incidente ... et seulement à la puissance 1 de la surface balayée par la roue. Diviser par deux la vitesse, c'est diviser par huit la puissance.

Cette puissance maximale est diminuée des pertes de sillage (provoquées par la mise en rotation du fluide provoquée par la turbine) et les pertes de traînée (provoquées par l'obstacle à l'écoulement formé par la roue et son support).

1.1.1.2 Des exemples

La conception des hydroliennes amène à des géométries très variées.

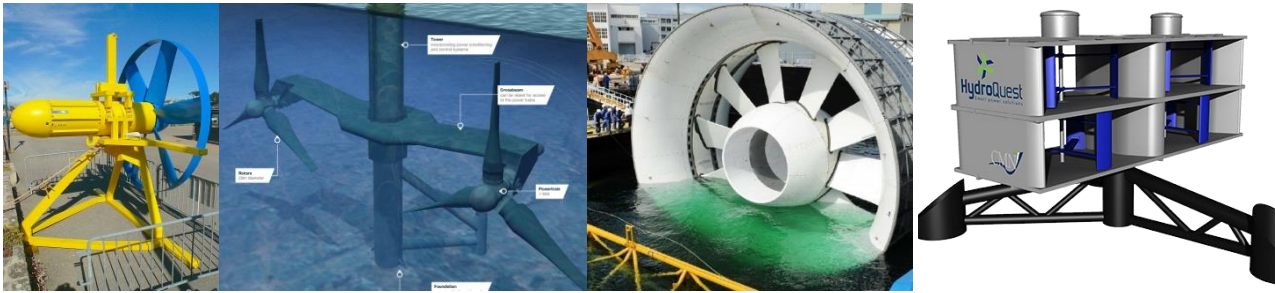


Figure 39 : hydroliennes, des géométries très variées (Sabella, Seagen, Openhydro, concept Hydroquest)

Les données constructeurs sont disponibles pour la turbine Seagen, équipée de deux roues de diamètre 20 m, et de 1 MW chacune. La puissance délivrée au réseau correspond à un coefficient de puissance $C_{p\text{élec}}=0,41$. Ce coefficient 0,41 est à peu près le produit de la limite de Betz ($C_p = 0,6$) et d'un facteur de rendement de 0,7.

6.1.3.2 Maréliennes : des hydroliennes en chenal

Les turbines hydroliennes nécessitent des vitesses élevées pour être rentables économiquement. Dans la nature, ces vitesses ne se trouvent que dans quelques sites, ce qui limite le développement de ce type d'énergie.

L'idée originale proposée par François Lempérière consiste à utiliser les hydroliennes dans des bassins marémoteurs :

- Placées dans des chenaux marémoteurs, les hydroliennes fonctionnent de manière optimale
- Et il se trouve que ce point de fonctionnement optimal peut-être obtenu pour une large gamme de marées, y compris pour des marées d'amplitude modeste, 3 m – voire 2 m.

La Figure 18 illustre le concept.

Ce concept n'existe pour l'instant qu'à l'état d'idée. Toutefois, plusieurs études scientifiques ont tenté d'évaluer le fonctionnement et la rentabilité d'un chenal marélien. Par ailleurs, de nombreux essais en laboratoire ont évalué le comportement d'hydroliennes en chenal.

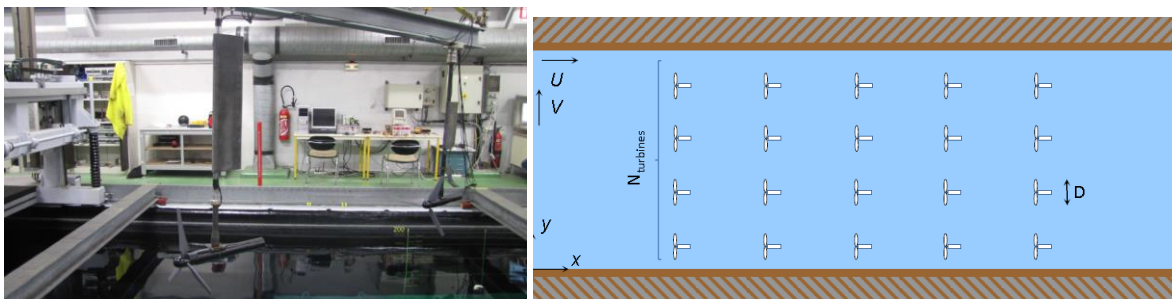


Figure 40 : Travaux de recherche universitaire consacrés aux hydroliennes en chenal.
Essais présentés par P. Mycek (PhD 2013 – Le Havre, France. Calculs développés par T. Divett (PhD 2014 – Otago, New Zeland).

Le principe de fonctionnement hydraulique diffère fondamentalement de celui des éoliennes et des hydroliennes en mer ouverte, pour trois raisons.

- 1- En chenal, il est possible de piloter la vitesse d'écoulement ; la vitesse est alors choisie pour demeurer dans une gamme étroite.
- 2- En chenal, l'écoulement est contraint, et est donc davantage forcé à traverser la turbine. Cet effet « de blocage » augmente l'efficacité individuelle de chaque turbine, en créant une « chute » au passage de la turbine. L'hydrolienne en chenal n'est pas une turbine purement cinétique, elle prélève également de l'énergie potentielle.
- 3- En chenal, l'énergie disponible est « potentielle » (la dénivelée) plutôt que « cinétique » (la vitesse de l'eau) comme en pleine mer. L'efficacité du dispositif repose sur une minimisation des pertes d'énergie potentielle (minimisation des « pertes de charges ») plutôt que sur une maximisation de la récupération de l'énergie cinétique de l'écoulement (hydroliennes en pleine mer).

Le chapitre 6.3.3 aborde la question de l'hydraulique en chenal de marélienne, et évalue l'énergie qu'il est possible d'en extraire. Il montre que l'équipement avec des hydroliennes classiques offre des performances intéressantes, et que les perspectives de gains associées à une optimisation des turbines sont grandes.

Les pistes de réflexion sont les suivantes :

- Puisque les vitesses sont relativement constantes, possibilité de recourir à des profils simples à pales fixes – mais devant se retourner à 180° pour fonctionner dans les deux sens (et peut-être aussi à 90°, pour limiter la traînée lorsque seule une partie des turbines est utilisée).
- Occuper la plus grande fraction possible du chenal, pour profiter au mieux de l'effet d'« obstruction » et limiter les pertes d'énergie par le flot qui contourne les turbines.
- Trouver le meilleur compromis entre les pertes par traînée (augmenter la vitesse de rotation – diminuer le nombre de pales) et par sillage (diminuer la vitesse de rotation – augmenter le nombre de pales) ; peut-être en cherchant à récupérer une partie de l'énergie perdue dans le sillage (ailettes directrices amont, ou turbines contra-rotatives).
- Imaginer une conception qui puisse fonctionner avec des pales qui se trouveraient parfois partiellement hors d'eau, avec dénoyage partiel.

6.1.3.3 Principe général d'équipement

La solution des maréliennes peut utiliser les options A, B, C et D du §3.4 ; les solutions à deux sens paraissent préférables ; on peut par exemple commencer par étudier l'option centrale C et ensuite les options B et D : les turbines souhaitables ne sont probablement pas très différentes pour ces trois options.

Dans les options C et D, la différence de niveau entre mer et bassin varie entre 0 et 0,5 Hm (Hm étant le marnage moyen) et l'essentiel de la production correspond à une dénivelée de l'ordre de 0,4 Hm donc de 2,50 m sur la plupart des sites français de la Manche, 1,5 sur l'Atlantique.

L'utilisation de l'option C au lieu de B permet un bien meilleur facteur de charge.

Dans le cas des options B et C, le principe de base de la solution des maréliennes est de contrôler la vitesse dans le chenal, c'est-à-dire d'optimiser la production des turbines en service en adaptant la durée d'opération aux vives eaux ou morte eau et en adaptant le nombre de rangées de maréliennes en service à la dénivelée entre mer et bassin. Par exemple pour une demi-marée de 6 heures un chenal sera ouvert pendant 3,5 heures, la dénivelée mer-bassin sera proche de 2,5 m pendant 2 heures avec la plupart des maréliennes en service ; ensuite la dénivelée baissera progressivement de 2,5 m à 0 et le nombre de rangée en service sera réduit en proportion, l'énergie disponible par rangée de maréliennes étant à peu près constante.

L'utilisation optimale est de régler le nombre de maréliennes en service en fonction de la dénivelée mer-bassin pour optimiser la vitesse du courant vers 3 ou 4 m/s dans le cas des options B et C, et moins de 3 m/s pour l'option B. Il peut être préférable par moment de mettre en service plus de maréliennes que l'optimum ce qui réduit vitesse et débit. Cela peut être utile en particulier pour l'option D. Dans cette option on peut ainsi, en l'absence de pertuis vannés, réduire à certains moments le débit dans les chenaux, ce qui peut optimiser la production. On peut même, dans cette option, réduire beaucoup le débit en gardant les turbines à l'arrêt en position de fonctionnement.

Il y a probablement de nombreuses solutions parmi les hydroliennes existantes, on peut par exemple envisager les modèles semblables aux éoliennes mais avec des pales fixes et une turbine orientable en 3 positions à 0°, 90° et 180°.

Dans la solution des chenaux de maréliennes, la base du support de la turbine peut être ancrée dans du béton, le poids global pouvant être plus faible que celui des hydroliennes en mer ouverte.

6.1.4 Prédétermination du coût des équipements

6.1.4.1 Usine équipée de turbines bulbe, capacité > 100 MW

Les groupes bulbes sont construits sans sujétion spéciale et peuvent bénéficier de l'effet de série.

Le retour d'expérience pour des équipements en rivière d'usines de basse chute correspond à environ 1000 euros / kW, pour l'ensemble des équipements électromécanique, électrique et auxiliaires de l'usine et du poste de départ des lignes.

6.1.4.2 Hydroliennes pour les chenaux de marélienne, capacité > 100 MW

Il n'existe pas aujourd'hui de retour d'expérience sur ce type d'installation. Les coûts font l'objet d'une pré-estimation. Le retour d'expérience des hydroliennes en mer n'est pas utilisé, car les conditions sont très différentes : production industrielle, mise en œuvre en eau calme sur radier bétonné, mutualisation des atterrages électriques.

Les hydroliennes peuvent être placées et entretenues en eau calme, leur support ancré dans le béton du radier. Le coût de leur support et des pales devrait être assez faible, le coût principal est probablement celui de la partie électrique dans l'eau pour des éléments de l'ordre de 3 MW. L'effet de série s'applique. Les liaisons électriques à une sous station de 300 MW par chenal sont courtes. Les coûts au kW des maréliennes sont donc très différents des coûts des hydroliennes en pleine mer.

La puissance d'une marélienne sera voisine de la puissance d'une éolienne terrestre dont le coût au kW, de l'ordre de 1 500 € se découpe à peu près en trois parts égales :

- 1) 500 € pour terrain, fondation, études diverses.
- 2) 500 € pour mat et pales.
- 3) 500 € pour nacelle et électromécanique.

Pour une marélienne, la fondation étant comptée dans le coût du chenal, la partie 1 ci-dessus est très réduite ; la partie 2 est également plus faible, car les dimensions du mât et des pales sont sensiblement plus modestes à puissance égale ; la partie 3, sous l'eau, est plus coûteuse.

Un chiffre de 1 200 €/kW est retenu pour les comparaisons.

6.2 Digue et génie-civil

Les digues et le génie-civil représentent 50% ou plus du coût d'investissement des projets marémoteurs (70% pour le projet de Swansea bay). Ces ouvrages en mer nécessitent une conception particulière, pour résister aux sollicitations maritimes, et des moyens de construction spécifiques de travaux à la mer.

Par ailleurs, les digues et le génie civil constituent des enjeux environnementaux importants, notamment à deux titres : travaux en mer dans des milieux à forte valeur écologique, et consommation importante de matériaux de construction.

Les projets marémoteurs peuvent s'appuyer sur un retour d'expérience très importants, développé notamment à l'occasion de travaux portuaires et/ou de protection côtière.

6.2.1 Retours d'expérience de travaux de digues à la mer

Le retour d'expérience, très riche, est illustré ici avec quelques ouvrages symboliques réalisés en France ou à l'étranger par des entreprises françaises

- La digue d'Antifer, située en Manche, digue de grandes dimensions, sur un site à fort marnage,
- Les digues du port du Havre (Port 2000),
- Calais Port 2015, principal projet de développement portuaire en France actuellement en construction, avec des enjeux forts en lien avec le marnage, les courants de marée et la dynamique hydrosédimentaire ;
- Le port de Tanger Med II, de très grande taille, et plus particulièrement la digue principale du port qui est une digue mixte à talus (sur la première partie de son linéaire) et en caissons (par plus grande profondeur).

Pour chacune de ces réalisations, une fiche de synthèse est développée qui illustre le choix de conception des digues.

6.2.1.1 Digue d'Antifer

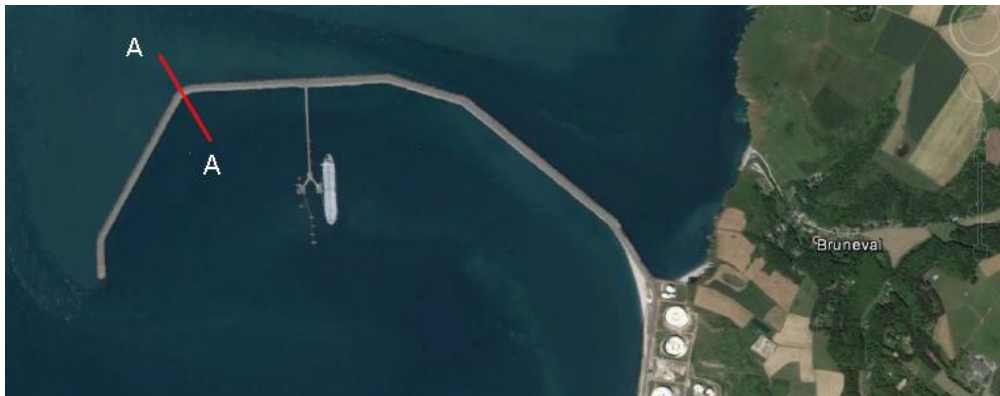


Figure 41 : digue d'Antifer, source : GoogleEarth

L'ouvrage est implanté sur des fonds variables entre 0 à -21 m CM, sur un site à très fort marnage, supérieur à 8 m. L'ouvrage est principalement soumis à des houles d'Ouest et a été dimensionné pour une houle centennale de 7,30 m de hauteur significative et 9 s de période de pic. Depuis sa construction, l'ouvrage a subi de nombreuses fortes tempêtes, y compris pendant le chantier et au début de sa vie utile (1981).

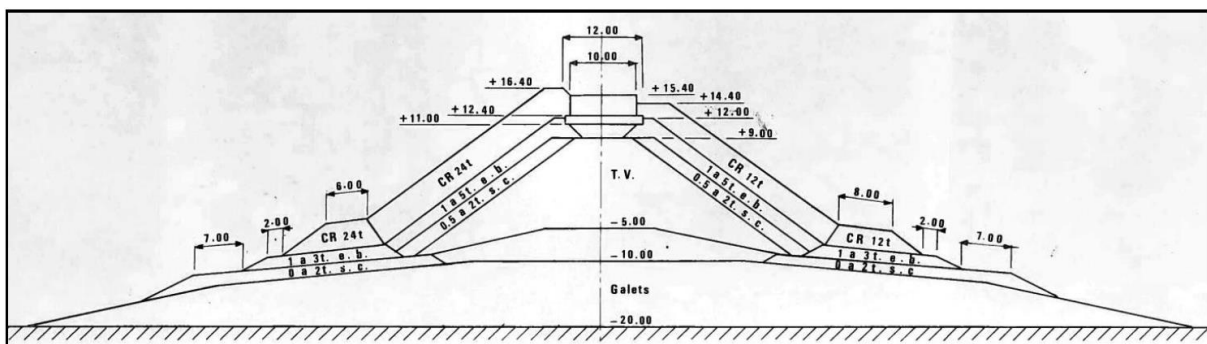


Figure 42 : digue d'Antifer, coupe-type AA (côté Port à droite) – source : Artelia

Longueur de digue principale : 3570 m. Hauteur totale d'ouvrage de plus de 37 m. L'ouvrage est constitué de différentes sections, de conception similaire mais de dimensions variables, ajustées à la houle incidente. L'ouvrage est arasé en son point culminant à +16,75 m CM et comporte une voie circulaire de 10 m de large.

La coupe-type de la digue comporte :

- Une protection par des Bloc Cubiques Rainurés, de 6 à 30 tonnes, posés avec une pente de 5/7. La sous-couche supportant les BCR a été réalisée en enrochements artificiels (béton éclaté), de granulométrie variable. Afin d'éviter la migration des éléments du noyau vers la sous-couche, il a été disposé un filtre en enrochements de 0,5 à 2 tonnes. Le noyau quant à lui est réalisé en tout venant de carrière de 0 à 500 kg.
- Un sous-bassement réalisé en galets clapés directement sur le site. Ces galets sont disposés sur le fond marin jusqu'à une hauteur de -10 m CM.

Le pied de la carapace (butée) est réalisé en blocs rainurés de taille comparable à ceux de la carapace.

Les quantités mises en œuvre, par ml de digues : 2500 t de galets, 1300 t de tout-venant, 500 t d'enrochements, 1000 t de béton (BCR + enrochements artificiels + couronnement).

6.2.1.2 Diques du Port du Havre (port 2000)

Port 2000 a été construit entre 2001 et 2005, et mis en service en 2006. Il comprend notamment la création d'une digue de protection de 6 km de longueur, d'une digue d'enclosure de 4 km, le remblaiement de plus de 240 hectares de terre-pleins avec des matériaux issus des dragages et la construction de 3200 m de quais pour porte-conteneurs. Le dragage du bassin et du chenal d'accès à -17 m CM représente environ 45 millions de m³, dont une partie a été utilisée en remblai et pour le soubassement des digues en tout-venant graveleux.



Figure 43 : Le Havre port 2000, source : GoogleEarth

Le marnage de vives-eaux moyennes est de 6,75 m. Le niveau d'eau de projet, centennal, est de +9,13 m CMH (Cote Marine du Havre). La houle de projet, centennale, est de 6,0 m (hauteur significative) et 9 s (période de pic). A l'ouvrage, par fonds de +3 m CMH, la houle de projet considérée (avec un niveau de projet de +9,13 m CMH) est de 3,75 m.

Les courants de marée, importants et complexes dans l'estuaire de la Seine, ont nécessité des études spécifiques pour anticiper les fosses d'érosion générées par les nouvelles digues portuaires.

Les ouvrages de protection sont composés de digue à talus fondées sur un soubassement en tout-venant graveleux. La digue principale de près de 6 km de longueur est décomposée en plusieurs secteurs, qui utilisent des blocs de protection différents : enrochements, blocs cubiques, blocs Accropode™.

Digue Sud - coupe A

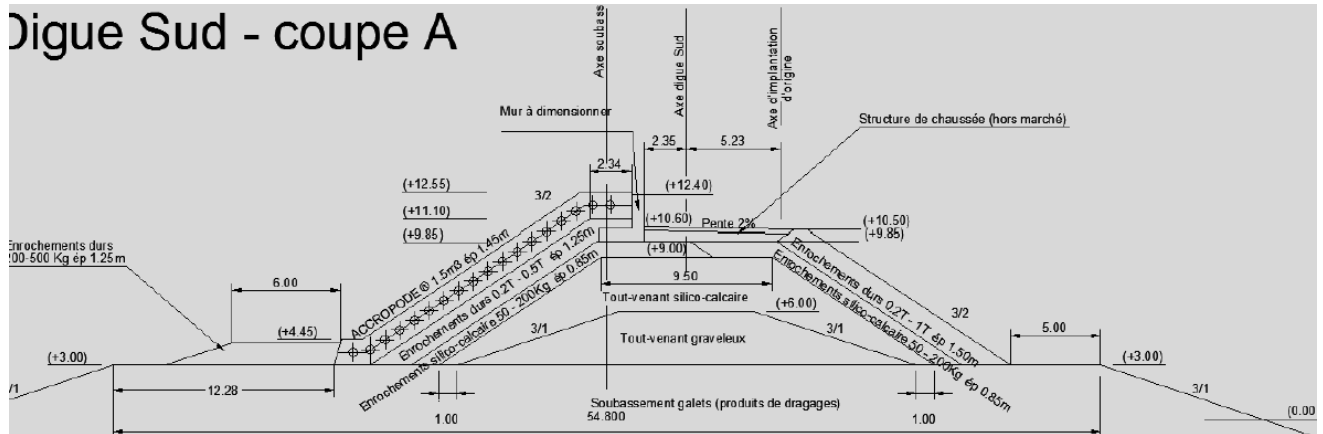


Figure 44 : digue principale de Port2000, coupe sur une section typique – source : Artelia

6.2.1.3 Calais Port 2015

Le projet vise à augmenter les capacités actuelles du port grâce à la réalisation d'un nouveau bassin protégée par une digue principale de 3300 m de long, une contre-digue ou digue secondaire de 200 m de long environ et un tenon. Le projet inclut 82 ha de nouveaux terre-pleins protégés sur un linéaire intérieur de 3 km.



Figure 45 : vue d'artiste du projet Calais Port 2015 - source : Région Nord - Pas de Calais.

La conception et le dimensionnement des ouvrages ont intégré toute la complexité des enjeux du site.

- hauteur de houle à l'ouvrage régie par un niveau d'eau fortement variable ; la hauteur significative de houle centennale au large est de $H_s = 6,1$ m pour les houles de secteur Manche et 5,4 m pour les houles de Mer du Nord ; le marnage est de 6,50 m en vives-eaux moyennes.
- interaction de la houle avec les courants de marée et effets locaux de concentration,
- fonds fortement mobiles sous l'effet de la houle et des courants, influençant eux-mêmes les vitesses de courant (par variation de la profondeur d'eau et donc de la section d'écoulement) et donc la houle,
- définition de niveaux d'eau de projet tenant compte de la marée, des surcotes (partiellement corrélées à la marée), des effets du réchauffement climatique, etc.

- Fonds très complexes, marqués par des formations sédimentaires, les ridens, influençant la propagation des vagues sur le site.

La digue principale est une digue à talus, de hauteur maximale 25 m.

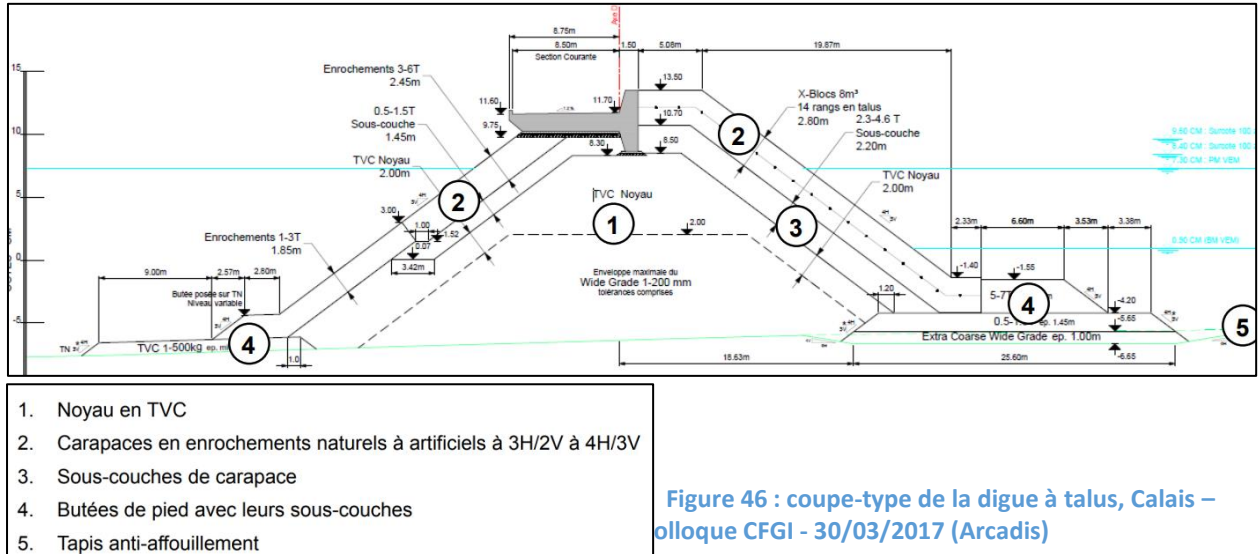


Figure 46 : coupe-type de la digue à talus, Calais – olloque CFGI - 30/03/2017 (Arcadis)

6.2.1.4 Tanger Med

Les ports de Tanger Med ont été construits entre 2002 et 2016. Les digues à la mer utilisent deux techniques :

- Digue à talus pour des profondeurs de fond marin inférieures à 20 m,
- Caissons en béton armé pour les profondeurs plus importante, avec deux sous-types : avec et sans remblai arrière.

	Tanger Med 1	Tanger Med 2
Linéaire total	Digue principale : 2050 m Digue secondaire : 570 m	Digue principale : 3750 m Digue secondaire : 715 m
Linéaire de digue à talus	Longueur 1000 m 7500 blocs accropode TM	Digue principale : 1040 m Digue secondaire : 377 m 10 000 blocs accropode (76 000 m ³ de béton)
Linéaire de caissons	Longueur 1100 m 40 caissons « quadrilobés » de 28 * 28 m, hauteur 35 m 29 caissons « bilobés »	Digue principale : 2710 m 95 caissons Digue secondaire : 341 m 10 caissons
Durée des travaux	36 mois	4 ans 1/2
Montant des travaux	223 M€ pour l'ensemble digues + dragages + remblais + postes à quai (environ 2 km).	825 M€ Pour l'ensemble digues + dragages + poste à quai 1200 m + remblais (5,5 Mm ³)

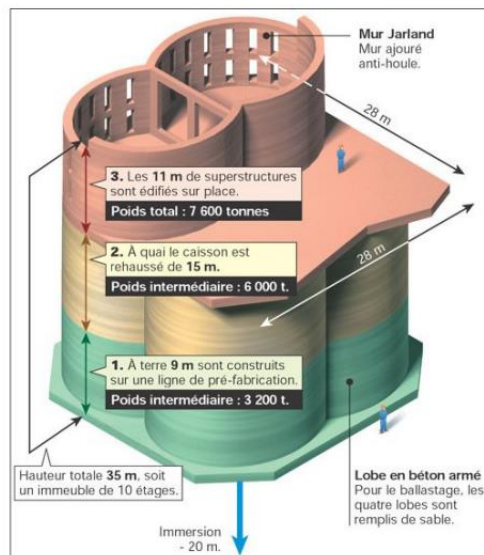


Figure 47 : digue à caissons « Jarland » en cours de construction, Tanger Med II – Photo © Bouygues

Un caisson, hors superstructures, contient 2230 m³ de béton (en moyenne) et 455 tonnes d'acier.

Une attention particulière est portée à la durabilité des bétons⁴³. Les fondations des caissons sont préparées avec trois couches successives, mises en place par clapage : tout-venant 1/500 kg, surmonté d'un matériau 0/160 mm écrêté à la benne preneuse épaisseur 20 cm à 1 m, et d'un ballast 20/63 mm nivelé à plus ou moins 5 cm de la cote cible épaisseur 50 cm à 1 m.

Une coupe-type d'une des sections est illustrée ci-dessous. D'autres sections ont également été utilisées sur le port, selon les conditions de houle ou les critères de débit limite de franchissement.

⁴³ Pour une durée de vie de 100 ans, les spécifications suivantes ont été utilisées. Dosage minimum en liant 420kg/m³, avec un rapport eau efficace liant total limité à 0,35, résistance à la compression nominale à 28 j supérieure à 40 MPa, coefficient de diffusion des chlorures à 90 jours inférieure à 1,5×10⁻¹² m²/s pour la partie située au-dessus de -4 m hydro et de 5×10⁻¹² m²/s pour la partie au-dessous de -4 m hydro, enrobage fixé à 80 mm.

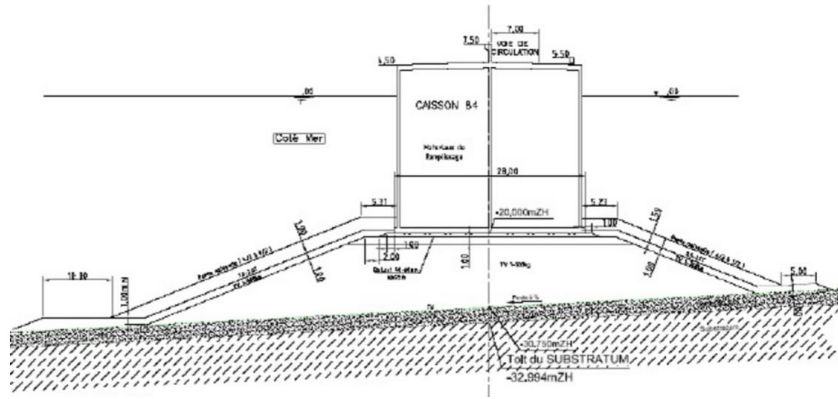


Figure 48 : coupe-type de la digue à caissons, Tanger Med II

6.2.2 Conception et dimensionnement des digues

6.2.2.1 Normes et standards

Plusieurs documents font référence pour le pré-dimensionnement des digues :

- Le Coastal Engineering Manual (anciennement Shore Protection Manual) édité en 2009 par l'US (United States) Army Corps of Engineers ;
- Le Guide Enrochement (version française du Rock Manual) édité conjointement en 2009 par le CIRIA (Royaume-Uni), le CUR (Pays-Bas) et le CETMEF (aujourd'hui CEREMA, France). Ce guide remplace en particulier le Manual on the Use of Rock in Hydraulic Engineering, CUR/RWS Report 169, de 1995;
- Les British Standards, et en particulier les BS 6349 – Code of Practice for Marine Structures. Pt 1 & Pt 7 Guide to the Design and Construction of Breakwaters, 1991;
- Pour l'étude spécifique des franchissements des ouvrages par les paquets de mer : le manuel Eurotop , Wave Overtopping of SEa Defences and Related Structures : Assessment Manual, édité conjointement en 2007 par l'EA (Royaume-Uni), l'ENW (Pays-Bas) et le KFKI (Allemagne).

En ce qui concerne les digues en caissons (digues « verticales » ou « mixtes ») on mentionnera également les ouvrages suivants :

- Rapports issus du projet européen PROVERBS, Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters datés de 1999 ;
- Les Japan Standards, et en particulier les Technical Standards and Commentaries of Port and Harbour Facilities in Japan , édité par The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan et datés de 2002 ;
- La littérature de Y. GODA, et notamment Random Seas and Design of Maritime Structures , Vol. 33 of Advanced Series on Ocean Engineering, 3rd edition, ainsi que les articles de S. TAKAHASHI.

6.2.2.2 Digue à talus vs Digue en caissons

Le choix de l'une ou l'autre des deux principales typologies de digue dépend de plusieurs facteurs, dont les principaux sont donnés ci-après :

L'économie :

La profondeur ainsi que les conditions hydrauliques en pied d'ouvrage sont déterminantes pour le choix d'une solution. Par faible profondeur (environ moins de 15 m) ou en conditions de déferlement, la solution en caisson est difficilement envisageable. En revanche, par grande profondeur, celle-ci est généralement plus économique.

La disponibilité des moyens de construction :

Une solution en caissons exige toujours des moyens importants, surtout de nature maritime (grands pontons, dragues pour le remplissage, remorqueurs de grande puissance), que seulement les grandes entreprises internationales possèdent. Une solution à talus peut davantage permettre maximiser l'emploi de moyens terrestres, moins onéreux et à la disposition d'entreprises de petite et moyenne taille.

La disponibilité locale de matériaux de carrière :

Les quantités d'enrochements de bonne qualité à mettre en œuvre pour une solution digue à talus peuvent être rédhibitoires si les carrières locales ne peuvent pas les fournir ou si le coût (environnemental, économique) de transport depuis des carrières plus éloignées est trop élevé.

Autres critères :

- Emprise au sol ;
- Facilité de maintenance ;
- Limitation des réflexions et franchissements de la houle ;
- Possibilité d'implantation de la vie sous-marine ;
- Adaptabilité de l'ouvrage aux modifications de conditions de dimensionnement ;
- Utilisation d'éventuels matériaux de dragage ;
- Besoin en béton armé ;
- Autres.

6.2.2.3 Critères de dimensionnement

Le dimensionnement d'une digue à la mer est adapté à une série d'exigences de dimensionnement, qui sont définies pour chaque projet. Ces exigences sont de natures variées :

- Les exigences fonctionnelles, i.e. les performances attendues ;
- Les sollicitations limites auxquelles la digue devra résister
- Les méthodes de construction, souvent dictées par la disponibilité en matériaux ;
- La durabilité attendue, ainsi que les contraintes d'entretien et de maintenance ;
- Les exigences de protection de l'environnement.

Ces exigences se traduisent dans le processus de dimensionnement sous forme de critères : critères géométriques, critères de stabilité (hydraulique, géotechniques, etc.), critères de franchissements, etc...

Les critères de dimensionnement considérés pour les digues de clôture de bassins marémoteurs pourraient être moins stricts que pour les ouvrages portuaires. En particulier, on pourra tolérer des

débits de franchissements (« paquets de mer » pour les houles très fortes) plus forts que pour des digues portuaires.

6.2.2.4 Moyens et outils de dimensionnement, digues

Le schéma suivant illustre les moyens et outils de dimensionnement usuels des digues.



En première approche, l'utilisation des **formules empiriques** issues de la littérature (cf. §6.2.2.1) permet le prédimensionnement de l'ensemble des parties constituant de l'ouvrage. Ces formules, basées la plupart du temps sur des essais en modèles réduits, permettent de définir la section courante de l'ouvrage. Leur relative simplicité d'utilisation permet au concepteur d'effectuer rapidement des études de sensibilité sur les paramètres dimensionnants.

La validation du prédimensionnement est effectuée par l'intermédiaire de **modèles physiques**. Ces modèles à échelle réduite permettent en outre l'étude de points singuliers (tels les musoirs, l'influence de l'obliquité de la houle sur l'ouvrage, etc.) ainsi que l'optimisation de l'ouvrage. La modélisation physique des structures côtières est régie par des standards et recommandations (issus par exemple du groupe HYDRALAB+).

La modélisation numérique ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*) parallèlement aux formules empiriques et essais sur modèles physiques permet d'obtenir des informations complémentaires pour le dimensionnement des ouvrages : réponse hydraulique (réflexion, franchissements), données supplémentaires (efforts et pressions de la houle sur les structures en béton type mur de couronnement, etc.).

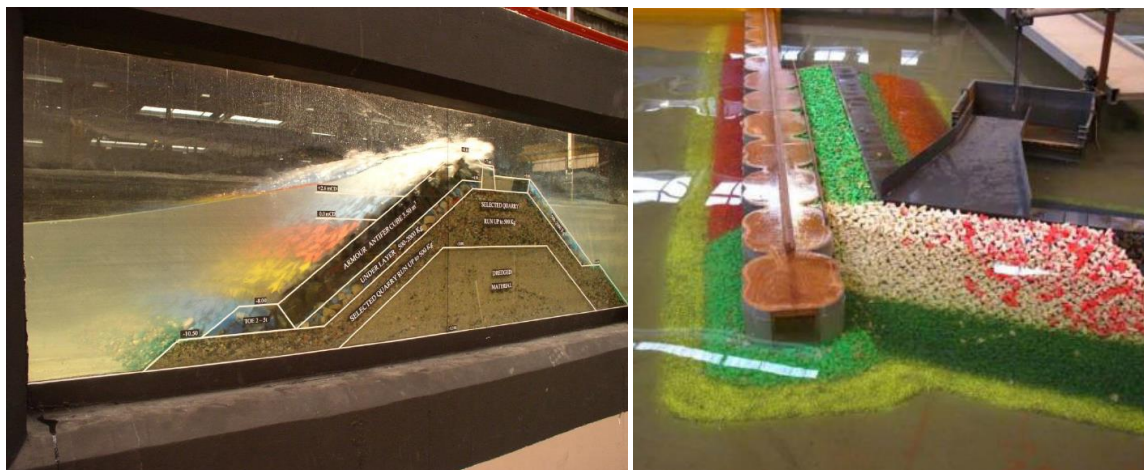


Figure 49 : illustration de modèles physiques – étude d'une coupe-type de digue ; étude du fonctionnement 3D d'un aménagement – source : Artelia

6.2.3 Conception et de dimensionnement du bassin

6.2.3.1 Contexte

Le dimensionnement technique du bassin marémoteur recouvre des aspects variés :

- Dimensionnement « énergétique » : production d'électricité pour les différents cycles de marée.
- Dimensionnement « protection » : capacité du bassin à amortir la houle et à diminuer les niveaux de Plus Hautes Mer à la cote, et ainsi protéger les enjeux des inondations (niveaux d'eau) et/ou de l'érosion (amortissement de la houle).
- Dimensionnement « hydrosédimentaire » : effets du bassin sur la courantologie, les transits de matériaux et l'équilibre hydrosédimentaire, à l'intérieur du bassin et le long de la cote à l'extérieur du bassin.

La conception du bassin marémoteur aborde également d'autres aspects, liés aux incidences environnementales et sociales. Ces autres aspects ne font pas l'objet de calculs, mais sont étudiés en relation avec le dimensionnement technique : le dimensionnement technique est choisi de sorte à optimiser les bénéfices sociaux et environnementaux.

6.2.3.2 Moyens et outils pour le dimensionnement

L'outil de référence pour le dimensionnement est la modélisation :

- Modélisation numérique,
- Et lorsque les enjeux sont très forts, modélisation physique.

La modélisation numérique et la construction de modèles physiques sont couramment utilisées pour les projets d'aménagements portuaires. Le même type d'outils permet de répondre aux différents enjeux de conception et de dimensionnement d'un bassin marémoteur.

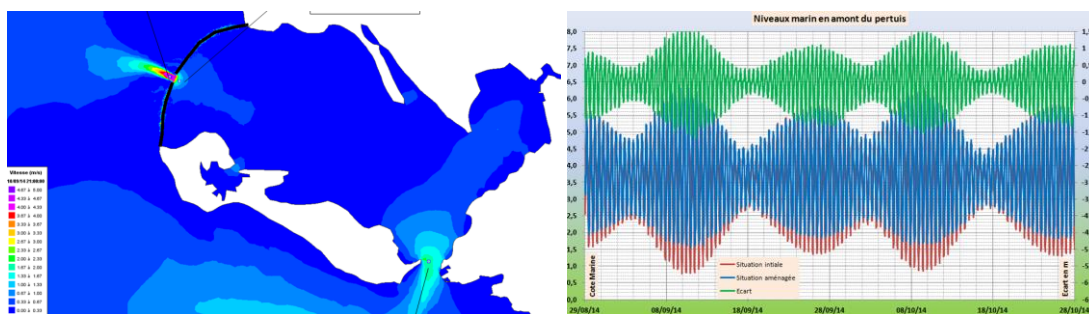


Figure 50 : exemple de modélisation hydrodynamique d'un bassin marélien – source ISL

Ces modèles fournissent les cotes, vitesses, débit pour toute la gamme des marées, et cela pour l'ensemble de l'emprise du bassin et de ses environs. Ils permettent également, avec un degré de précision toutefois plus difficile à calibrer, de prédire les évolutions hydrosédimentaires (transit des sédiments) et morphodynamiques (érosion de la cote) causées par l'aménagement.

6.2.4 Conception et construction des usines

Les usines abritent les turbines bulbes et les équipements électriques.

Le fonctionnement hydraulique des groupes bulbes et la définition du génie civil associé sont standards, car de nombreuses usines hydroélectriques de rivière utilisent cette technologie, développée initialement pour l'usine de La Rance.

Les enjeux principaux sont liés aux méthodes de construction en contexte maritime.

Quelques projets d'usines bulbes en rivière ont eu recours à une construction par préfabrication de l'usine à terre, flottaison et échouage à l'emplacement définitif. Une autre méthode consiste à créer en mer une enceinte batardée, à l'intérieur de laquelle l'usine est construite, « à sec ».

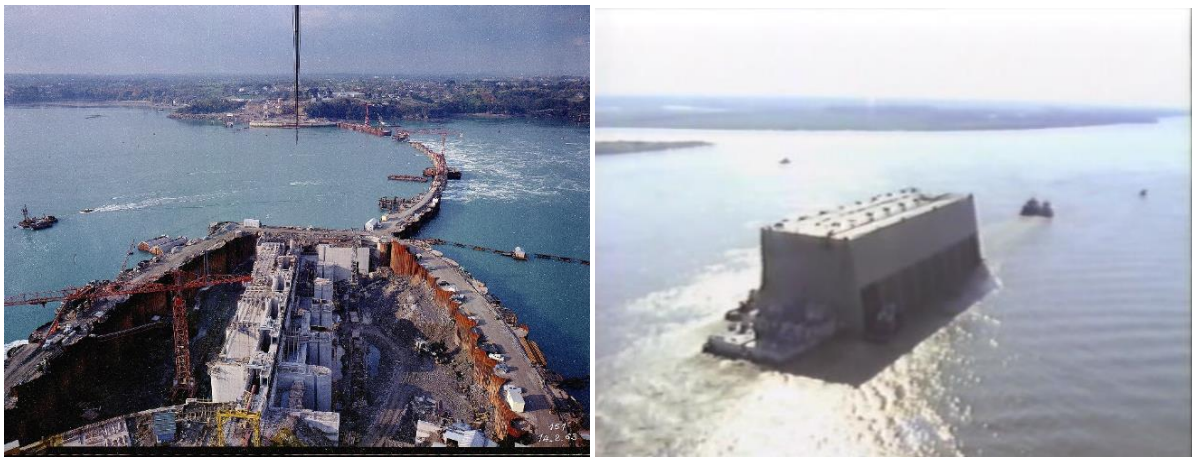


Figure 51 : usine bulbe construite à sec (La Rance, source : EDF) ou amenée par flottaison (Vitalia, Mississipi)

Le retour d'expérience de la centrale de Vitalia est à l'échelle des projets futurs : elle est équipée de 8 groupes bulbes ($P = 8 \times 24 \text{ MW} = 192 \text{ MW}$). Elle a été construite dans une barge métallique de 24 000 t, de dimensions totales : longueur (RD-RG) : 139 m, largeur (amont-aval) : 44 m, hauteur : 38 m.

Plus récemment, les travaux de protection de Venise ont également eu recours à une construction à sec des blocs vannés, de dimensions 60x45x11,5 m. La tolérance de pose est de 1 cm.

6.2.5 Conception et dimensionnement des pertuis

Des pertuis vannés de grandes dimensions pourront être nécessaires pour certains aménagements.

Différents types de vannage peuvent être imaginés, par exemple à l'image des ouvrages réalisés pour la protection contre les submersions marines. Pour des hauteurs d'eau importantes, les pertuis équipés de vannes levantes ou vannes secteur sont les technologies de référence. Des vannes clapet ont également été utilisées, pour la protection du lagon de Venise.

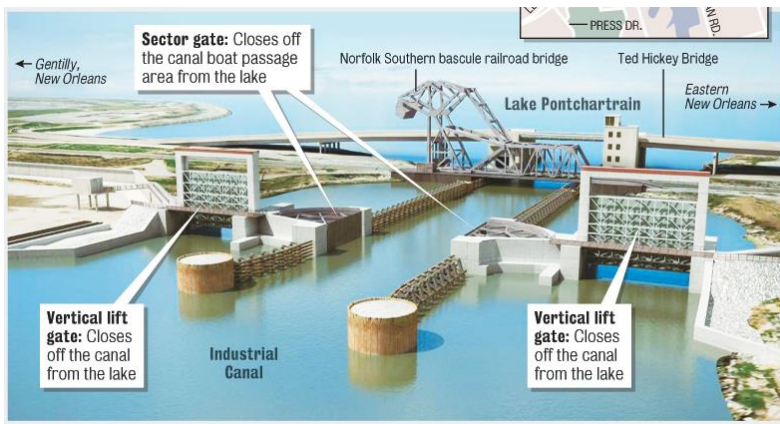


Figure 52 : Vannes secteurs (Measlant-kering) et vannes levantes (Hartelkering) aux Pays-Bas – sources : images libres de droit Seabrook floodgates, Nouvelle Orléans - source : USACE

Les hauteurs de vannes atteignent ou dépassent régulièrement 15 m (17 m à Venise, 22 m à Measlant).

Les travaux sont faits à sec ou par échouage de caissons préfabriqués et amenés par flottaison à leur emplacement définitif.

6.2.6 Prédétermination du coût des ouvrages de génie-civil

L'objectif de cette section est de fournir des éléments permettant de pré-chiffrer les coûts de génie-civil pour les sites de moyenne à grande taille, qui représentent l'essentiel du potentiel : il s'agit de sites de 30 à 300 Km². Les prix unitaires évalués ici correspondent à la partie basse de la fourchette des tailles de projet ; pour les projets de plus grande envergure, la massification permet des économies, qui peuvent atteindre 15-25%.

La plupart des sites envisageables sont situés dans deux zones :

- A l'Ouest du Cotentin entre la baie de St Briec et Flamanville avec des marées moyennes de 7 à 8 m.
- De Fécamp à Boulogne avec des marées moyennes de 6,5 m.
- Sur la côte Atlantique, où la marée n'est que de 4 m mais où quelques sites pourraient ne nécessiter que des digues très réduites.

Les profondeurs sous les basses mers dans les zones des digues et d'usines sont rarement supérieures à 20m, le plus souvent de 10 à 15 m en moyenne.

Les hauteurs et les périodes de houle sont du même ordre pour les différents sites, avec des houles significatives de l'ordre de 5m à 6m.

La plupart des sites sont le long d'une côte presque rectiligne.

6.2.6.1 Digue

Pour des raisons de programme, de coût et de matériaux disponibles, la solution de base semble être :

- La digue à talus, pour des cotes de terrain jusqu'à -5 à -10 m,
- la préfabrication en béton armé et éventuellement en acier pour des cotes de terrain plus profondes.

La solution chiffrée est une solution de caisson béton armé arasé à un niveau proche de celui des hautes mers, donc laissant passer les vagues importantes à marée très haute, tout en réduisant leur amplitude. Pour leur amenée sur place les murs de caissons peuvent être surélevés par des hausses métalliques provisoires. Cela correspond à une hauteur d'environ 10 m au-dessus des basses mers.

Une analyse des quantités mises en œuvre sur différents chantiers (Le Havre, Tanger Med, Calais), associée à l'application de prix unitaires caractéristiques conduit aux estimations d'ordre de grandeur ci-dessous.

Profondeur approximative du terrain sous les basses mers	Hauteur de digue	Prix au ml
0 – 5 m	10 – 15 m	60 k€ (*)
5 – 10 m	15 – 20 m	70 k€ (*)
10 – 15 m	20 – 25 m	85 k€ (*)
15 – 20 m	25 – 30 m	100 k€
20 – 25 m	30 -35 m	120 k€

(*) dans cette gamme de hauteur, une solution de digue à talus pourrait être plus économique, si les matériaux sont disponibles.

6.2.6.2 Usine bulbe

Pour les usines bulbes une structure en acier construite avec les groupes en chantier naval ou en forme spéciale peut être amenée avec un tirant d'eau acceptable et remplie de béton essentiellement sur place.

La solution la plus probable semble une grande structure métallique intégrant turbine et alternateur dans la forme de construction. Le béton avant transport est limité à la zone de la turbine pour limiter le tirant d'eau à moins de 10m ; le béton des diffuseurs est réalisé sur place.

Dans une approche en ordre de grandeur,

- Le génie-civil « habituel » d'une usine bulbe en rivière, pour construction à sec d'une usine de capacité importante, peut être évalué à 500 – 800 €/kW (pour une consommation de béton de l'ordre de 1 à 1,5 m³/kW, dont une part substantielle de béton de remplissage).
- Un surcoût doit être considéré pour le transport par flottaison. Le tonnage de charpente métallique est de l'ordre de 100 kg/kW, d'où un surcoût par kW de l'ordre de 3 à 500 € par rapport à une réalisation globale à sec.

L'usine peut ainsi être estimée, en ordre de grandeur à 1000 €/kW.

6.2.6.3 Pertuis vannés

Les pertuis vannés sont utilisés pour adjoindre une capacité de vidange entre mer et bassin, et également pour pouvoir commander l'ouverture des chenaux de maréliennes.

Les pertuis vannés sont des ouvrages analogues aux barrières anti-crues décrites au § 6.2.5.

Deux approches indépendantes ont été utilisées pour en pré-déterminer le coût : le retour d'expérience des barrières anti-crues (après soustraction des taxes et des travaux annexes), et un pré-dimensionnement des quantités d'œuvre requises.

Pour une hauteur de bouchure de 20 m, l'ordre de grandeur du coût de 1 M€ / ml de pertuis. La débitance sous un mètre de charge est d'environ 70 m³/s/ml.

6.2.6.4 Chenaux de maréliennes

La conception et le dimensionnement de ces structures devra être étudié en détails, et optimisé.

A ce stade, les chenaux de maréliennes sont conçus comme des canaux en béton armé, avec radier épais et ancrés, et bajoyers latéraux. Les structures comportent donc : des bajoyers qui délimitent le chenal, dimensionnés pour retenir les écarts de niveaux d'eau de part et d'autre ; un radier ancré pré-dimensionné pour résister aux efforts d'encastrement des bajoyers, et pour équilibrer une fraction des sous-pressions ; et des voiles assurant la convergence et la divergence des écoulements aux extrémités amont et aval.

Selon les calculs de prédimensionnement, la consommation de béton armé pour réaliser l'ensemble de ces structures correspond à 5 – 6 m³ par m² de chenal « utile » (hors zones de convergence / divergence).

Il s'agit de béton armé réalisé en grande masse, en milieu aquatique, avec peu de coffrage, et avec une densité de ferrailage moyenne. L'ordre de grandeur du coût au m³ est 600 €.

Le coût d'un chenal serait donc de l'ordre de 3000 €/m² utile – évaluation à affiner et optimiser.

A noter : dans le cas d'un site en contexte rocheux, il pourra être possible de se passer du bétonnage du bassin, ce qui conduira à des économies.

6.3 Puissance, productible, coût

6.3.1 Définition d'un site de référence

La puissance, le productible et le coût d'un aménagement marémoteur dépendent des conditions naturelles (amplitude des marées, topographie du trait de côte, profondeur du terrain sous la mer), du choix de l'ampleur du projet (superficie du bassin), et du choix de l'équipement du site (type d'opération : A, B, C ou D selon la terminologie du § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, puissance installée).

Les évaluations sont présentées ci-dessous pour un site de référence de très grande envergure, puis déclinées pour d'autres valeurs.

Le site de référence possède les caractéristiques suivantes :

- Amplitude moyenne de marée : 7 m
- Surface de bassin : 250 km²
- Longueur de digue : 40 km
- Profondeur moyenne sous les basses mers : 15 m.

6.3.2 Prédétermination du productible et du coût d'un aménagement marémoteur côtier « classique »

L'aménagement marémoteur côtier « classique » utilise une usine équipée de groupes bulbes.

6.3.2.1 Pour le site de référence

La production maximale réaliste d'un site correspond à l'opération de type B (§3.4.2). Dans ce cas, avec un facteur de charge de l'ordre de 20%, la production atteint 1,1 S Hm². On admet de perdre une partie de cette production, pour tenir compte des autres enjeux du projet, par exemple environnementaux.

La production serait alors SH² soit 250x7² # 12,5 Twh/an.

La puissance installée est évaluée par référence à Swansea : la capacité d'usines bulbes nécessaire à Swansea est de 320 Mw pour 550 Gwh ; ceci correspond à 7,5 Gw pour 12,5 Twh, ramené à 7 Gw car la marée de 7 m est ici un peu plus forte qu'à Swansea, et le facteur de charge peut être un peu meilleur.

Ces ordres de grandeur sont vérifiés par simulation sur une durée d'un mois lunaire, en considérant par exemple une attente de 1h30 en vives eaux, 2h30 en marée moyenne et 3h30 en mortes eaux. Il n'y a pas de pompage.

Le calcul est illustré ci-dessous :

- Avec les cotes pour une journée typique en hautes eaux, marée moyenne et mortes eaux.
- Avec débits et puissance pour la journée typique de marée moyenne

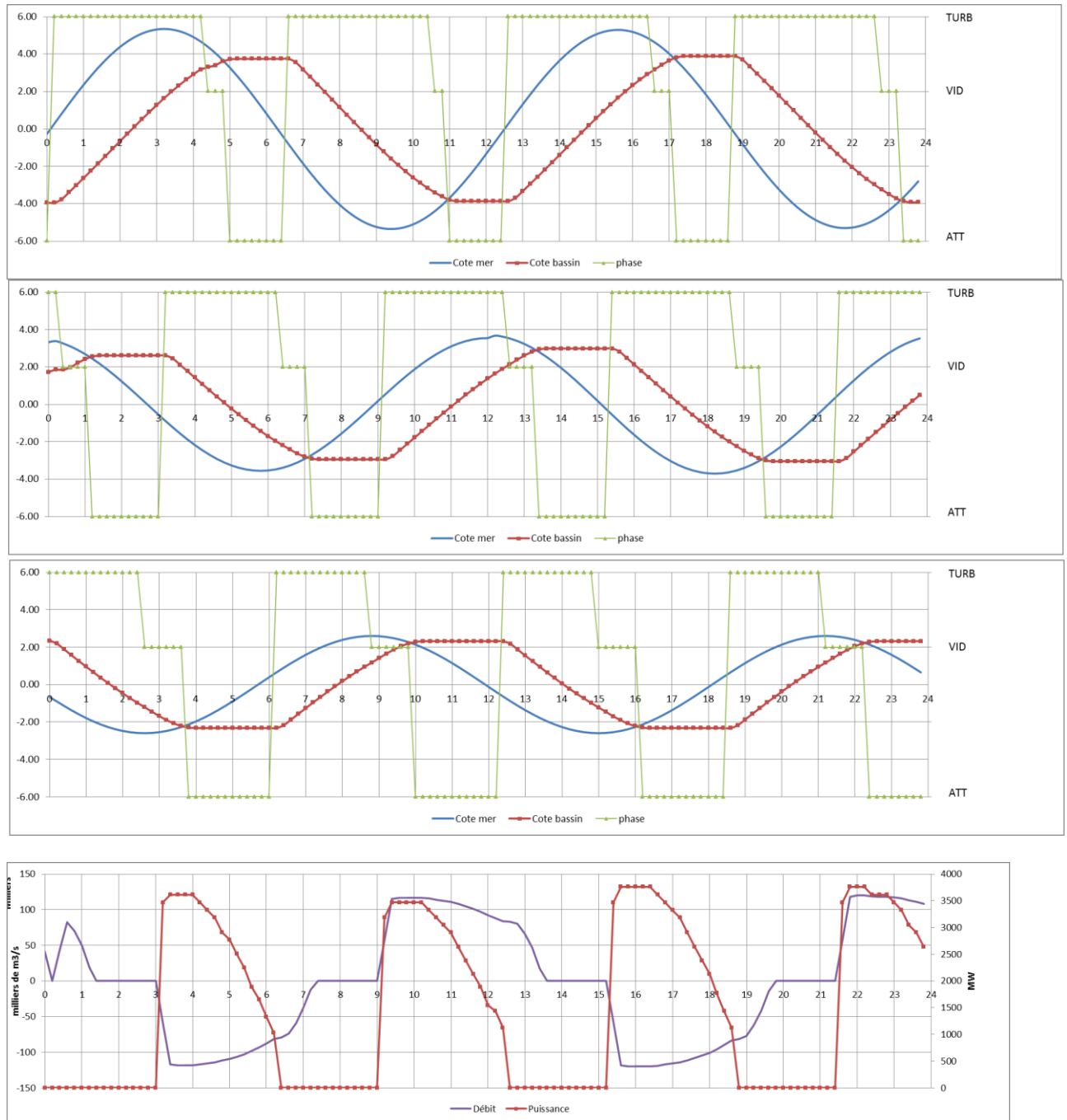


Figure 53 : simulation typique d'un aménagement marémoteur côtier

Les principaux résultats du calcul sont :

- Débit d'équipement 150 000 m³/s
- Puissance installée 7 GW
- Débit total des pertuis : 100 000 m³/s
- Durées d'attentes vives eaux / marée moyenne / mortes eaux : 1h30 / 2h / 2h30.
- Production annuelle : 13,7 TWh ; diminuée à 12,3 TWh pour tenir compte des contraintes et effets non intégrés dans ce calcul simplifié (contraintes environnementales, effets liés aux courants et à la géométrie du bassin).

L'investissement d'un site comprend essentiellement 4 parts ; les digues, les pertuis, le génie civil des usines, l'équipement électromécanique des usines ou chenaux de maréliennes. Les coûts unitaires admis sont :

Digues	40 km à 120 k€/ml	4,8 Md€
Pertuis	1,5 km à 1 M€/ml	1,5 Md€
Usine	7 km pour 7 GW à 1000 €/kW (et donc 1 M€/ml)	7,0 Md€
Electromécanique	7 GW à 1000 €/kW	7,0 Md€
TOTAL :		20,3 Md€
Facteur d'économie d'échelle lié à la taille du projet		15%, donc 3 Md€
Soit :		2500 €/kW
	Pour un facteur de charge de l'ordre de :	20%

6.3.2.2 Pour d'autres sites

Les résultats présentés dans ce document aboutissent, en première approche, à calculer les grandeurs caractéristiques suivantes pour un site marémoteur d'envergure significative (> 300 MW), et avec une marée moyenne d'au moins 5 m, dans le fonctionnement standard de type B.

Notation	Définition	Commentaire
P _{BM}	Profondeur moyenne de la fondation des digues sous la cote de basse mer (m)	
S	Superficie du bassin (km ²)	Superficie moyenne sur l'ensemble de la hauteur de marnage
Hm	Marée moyenne (m)	
Qeq	Débit d'équipement (m ³ /s)	
PAnn	Production annuelle (GWh)	
FC	Facteur de charge (%)	
Pinst	Puissance installée (MW)	
Ldig	Longueur des digues (km)	
Lpert	Longueur des pertuis (km)	
Pudig	Prix des digues (M€/km)	

Calculs	Commentaire
$P_{ann} = 1.0 * S.Hm^2$	En théorie, facteur 1.1 au lieu de 1.0
FC = 20%	
$P_{inst} = P_{ann} / (8,76 * Fc)$	
$L_{dig} = (2 * \pi * S)^{0.5}$	Pour un site adossé à une cote rectiligne. Sinon, corriger en conséquence
$Q_{eq} = (0.9 * H * S) / (3 * 3600) * 10^6$	Cycle de turbinage (et vidange complémentaire) en 3h
$L_{pert} = 0.6 * Q_{eq} / 70$	En fin de cycle de turbinage, adjonction d'une débitance complémentaire de 60%Qeq, avec des pertuis de hauteur proche de 20 m (débitance 70 m ³ /s/m).
$P_{udig} = 50 + 3,5 * P_{BM}$	Formule calée sur chiffres du 6.2.6.1
Coût total (M€) = $L_{dig} * P_{udig} + L_{pert} * 1000 + P_{inst} * 2$	
A pondérer par Facteur d'économie d'échelle : de 0% pour 300 MW à 20% pour 3 GW et plus.	

Pour des sites de taille inférieure, il est nécessaire de ré-examiner les prix unitaires.

6.3.3 Hydraulique du chenal de marélienne

6.3.3.1 Problématique

Dans un chenal de type marélienne, la production électrique dépend étroitement des conditions d'écoulement.

Pour un équipement donné, dans un chenal fixé, et pour une certaine différence de hauteur entre la mer et le bassin, le débit qui transite dans le chenal est déterminé.

Alors, il y a une certaine P_{tot} , puissance hydraulique totale disponible qui transite par le chenal.

Une partie de cette puissance est dissipée dans l'écoulement : par les pertes de charge à l'entrée et à la sortie du chenal, par frottement le long des parois du chenal, par remous dans le sillage des turbines, par les efforts de traînée appliqués aux structures des turbines. Le reste est transformé en énergie mécanique de rotation des pales, puis en énergie électrique par le générateur. Le diagramme ci-dessous illustre cela.

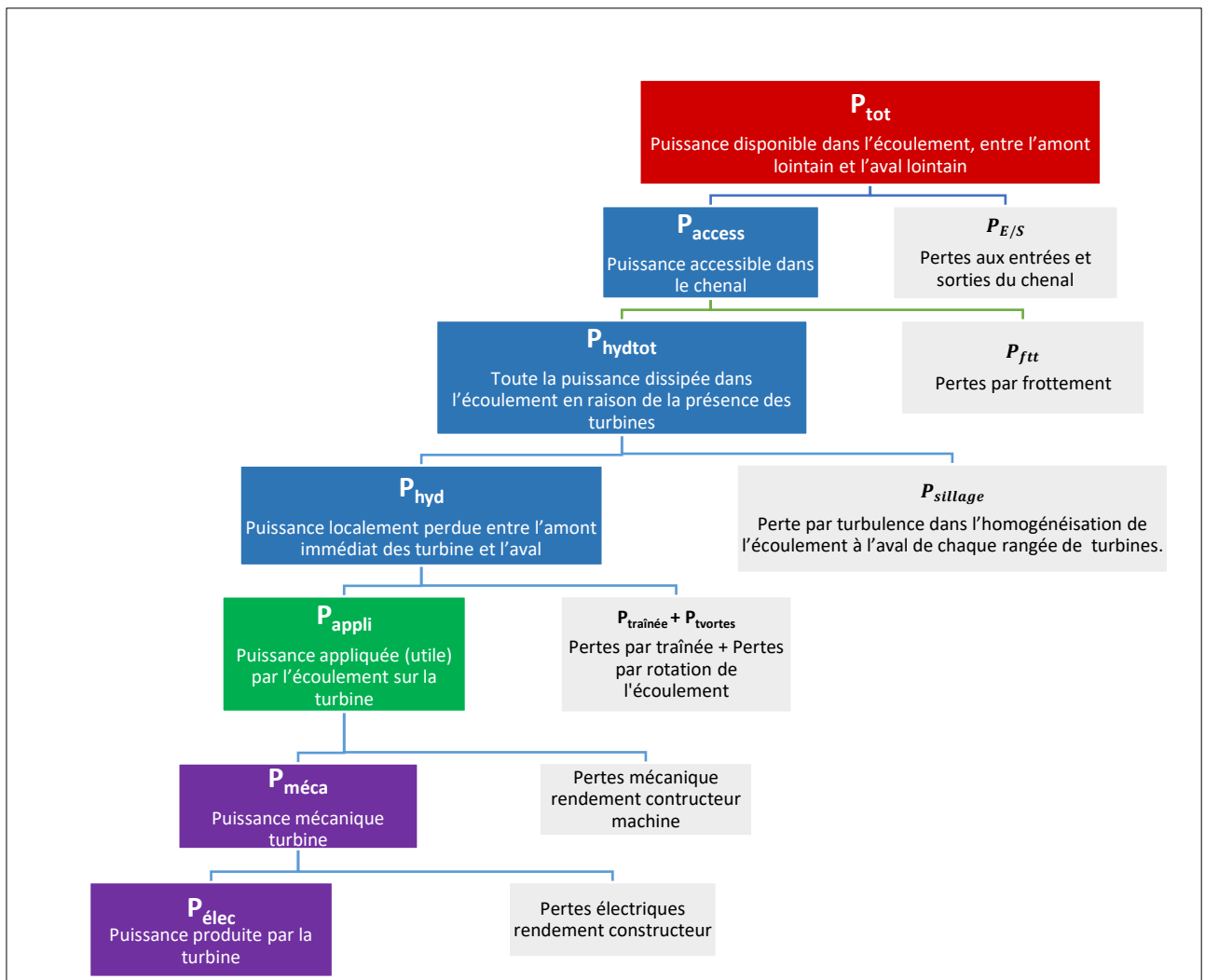


Figure 54 : Diagramme des pertes de charges d'un chenal marélien – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

Le point-clé est la détermination de Pappli, qui est la puissance hydraulique utile extraite de l'écoulement. Dans le cas d'une turbine classique, Pappli peut atteindre et dépasser 0,9 Ptot. Dans le cas d'un chenal de marélienne, les autres facteurs de perte de charge diminuent sensiblement ce rendement. L'évaluation du fonctionnement de l'hydraulique du chenal permet d'estimer de combien.

6.3.3.2 Hydraulique du chenal de marélienne

Calcul du rendement d'un chenal de marélienne : principes

Le fonctionnement du chenal de marélienne ne peut pas être calculé par référence à une usine marémotrice classique (une bonne partie de l'écoulement contourne les turbines) ni par référence aux hydroliennes en pleine mer (les effets de groupe et de blocage par les parois du chenal forcent davantage l'écoulement à travers les pales des turbines).

Un modèle spécifique de calcul a été mis au point pour simuler les chenaux de maréliennes, qui fonctionne de la manière suivante.

- 1- Il utilise des données d'entrée pour caractériser le chenal :
 - Données d'entrée géométriques :
 - Cote mer – cote bassin
 - Dimensions du chenal (profondeur, largeur, longueur)
 - Données d'entrée pour le calcul hydraulique :
 - Coefficient de frottement sur les parois du chenal
 - Coefficient de pertes de charge aux entrées et sorties du chenal
- 2- Il fait varier le nombre et le type de turbines, pour rechercher l'optimum d'équipement, en jouant sur :
 - La densité d'équipement (diamètre des turbines, nombre de rangées et nombre de turbines par rangée)
 - Le facteur d'induction axial (*), qui caractérise le type de turbine.
- 3- Il calcule des différents paramètres de l'écoulement :
 - Vitesse moyenne de l'écoulement
 - Vitesse de l'écoulement à travers les roues, et vitesse de l'écoulement bypass,
 - Calcul des pertes de charge : entrée-sortie, frottement, sillage, tourbillon,
 - Calcul de la puissance appliquée à la turbine.

(*) : le facteur d'induction axial représente, dans le modèle standard (modèle BEMT), la vitesse axiale de l'écoulement au passage de la roue. Le facteur d'induction découle de la géométrie de la turbine (nombre d'ailes notamment) et de sa vitesse de rotation.

Calcul du rendement d'un chenal de marélienne : calibrage

Le modèle a été calibré sur deux références :

- Les données de constructeur (Seagen),
- Les publications de Divett modélisant des groupes d'hydroliennes.

Les résultats sont bien corrélés à ces références :

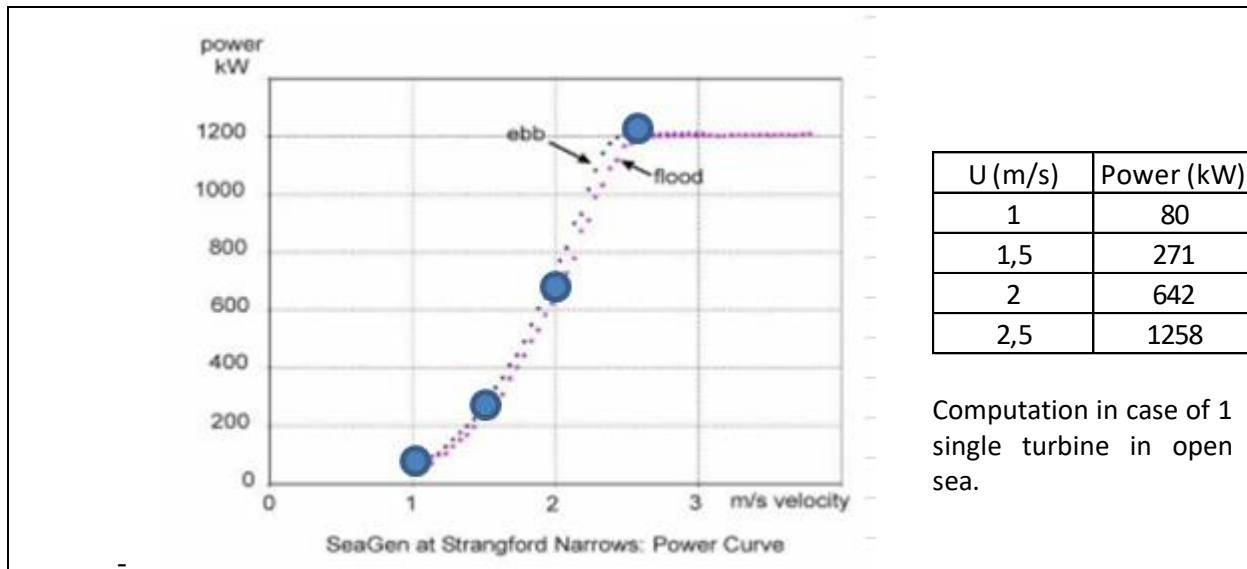


Figure 55 : Validation du modèle marélien comparaison aux données publiées pour Seagen (1 turbine). Les résultats du modèle sont en cercles bleus

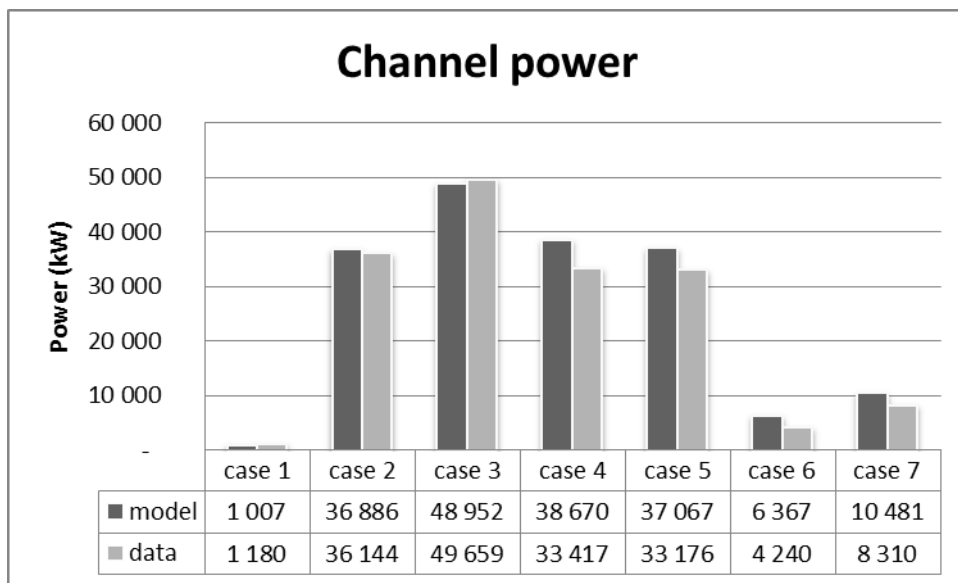


Figure 56 : Validation du modèle marélien : comparaison aux résultats de simulation de Divett (rangées multiple). Les résultats du modèle sont les valeurs de la série « model »

Calcul du rendement d'un chenal de marélienne : méthode

Les calculs de rendement du chenal sont menés en considérant des turbines hydroliennes « classiques », à trois pales et avec une vitesse de rotation telle que le TSR (tip speed ratio) soit de l'ordre de 4 ou 5.

Pour optimiser le rendement du chenal, il faut prévoir un nombre substantiel de rangées successives, chacune des rangées étant occupée par une section utile (somme des surfaces balayées par les pales) aussi grande que possible. Cependant, la surface balayée est limitée par la section circulaire d'une part, et par le fait qu'il faut maintenir un certain enfoncement des pales sous la surface de l'eau.

Dans les calculs qui ont été réalisés, il apparaît nécessaire d'aller au moins jusqu'à 7 rangées successives.

Pour des turbines à pales orientables, le rendement hydraulique de la turbine est à peu près constant sur une large gamme de vitesses incidentes. Dans ce cas, on arrive au graphique caractéristique ci-dessous, dans lequel le rendement ne dépend pas de la chute, mais uniquement du nombre de rangées.

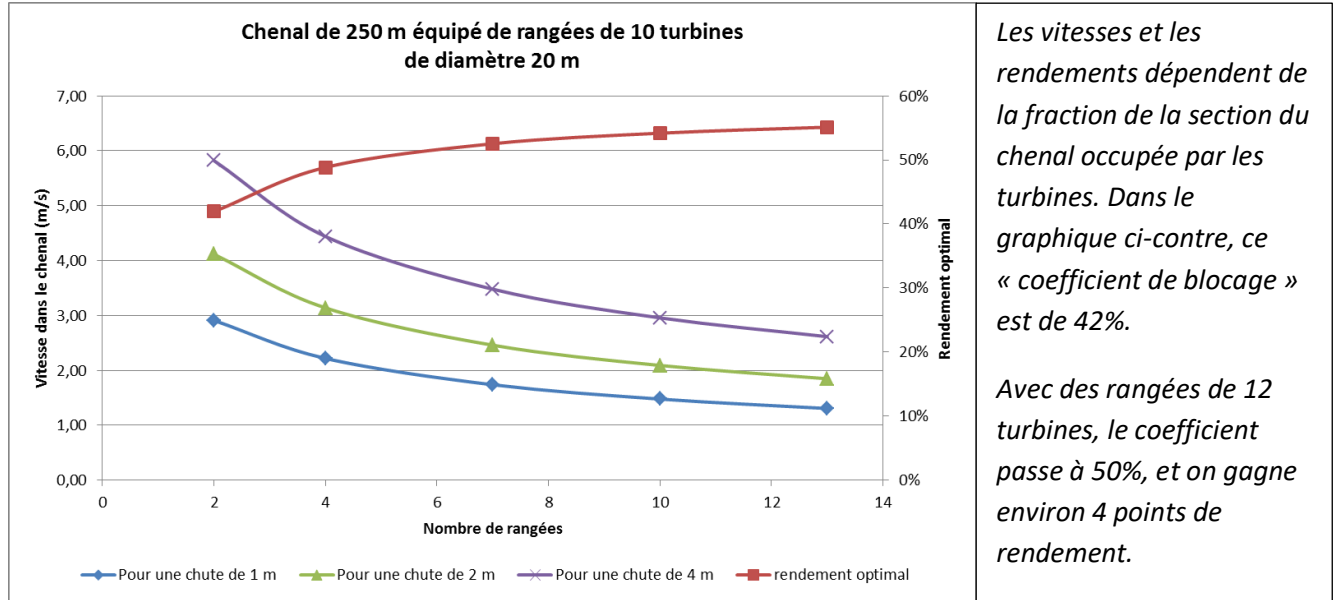


Figure 57 : calcul typique de rendement d'un chenal marélien

Dans l'hypothèse du calcul, la vitesse « optimale » dans le chenal est proportionnelle à $\sqrt{\Delta H}$. Pour 7 rangées de 10 turbines, la vitesse dans le chenal est de l'ordre de $1,8 \sqrt{\Delta H}$.

Le rendement obtenu ($P_{\text{appli}} / P_{\text{tot}}$) est de l'ordre de 55%. Quelques pertes supplémentaires interviennent ensuite dans la conversion électrique.

Ce rendement provient des résultats du calcul de pertes de charge ; par exemple, pour la chute de 2 m :

		2 rangées	4 rangées	7 rangées
Chute « brute » (P_{tot})	m	2,00	2,00	2,00
Pertes aux Entrées/Sorties du chenal	m	0,55	0,32	0,20
Pertes par frottement	m	0,03	0,02	0,02
Pertes par traînée et vortex	m	0,16	0,19	0,20
Pertes dans le sillage lointain	m	0,42	0,49	0,53
Chute « nette » (P_{appli})	m	0,84	0,98	1,05

Un rendement supérieur pourra être obtenu :

- 1- Avec un coefficient de blocage plus fort.
- 2- en optimisant les turbines, de sorte à diminuer les pertes dans le sillage lointain. Les calculs préliminaires laissent penser que le rendement global du chenal pourrait atteindre 65% avec

une dizaine de rangées de turbines tournant moins vite et une vitesse optimale dans le chenal qui serait de l'ordre de $2\sqrt{\Delta H}$.

- 3- avec des turbines lentes, en travaillant la géométrie des pales de sorte à limiter la mise en rotation de l'écoulement ; cela pour éviter de perdre en sillage de vortex ce qui a été gagné en sillage lointain,
- 4- en travaillant sur la géométrie des entrées-sorties du chenal

Calcul du rendement d'un chenal de marélienne : synthèse

La vitesse dans le chenal est proportionnelle à $H^{0.5}$. Et $V / H^{0.5}$ ne dépend que de l'équipement :

- Le coefficient de blocage, qui représente la surface barrée par les turbines / la section du chenal
- Le nombre de rangées actives.

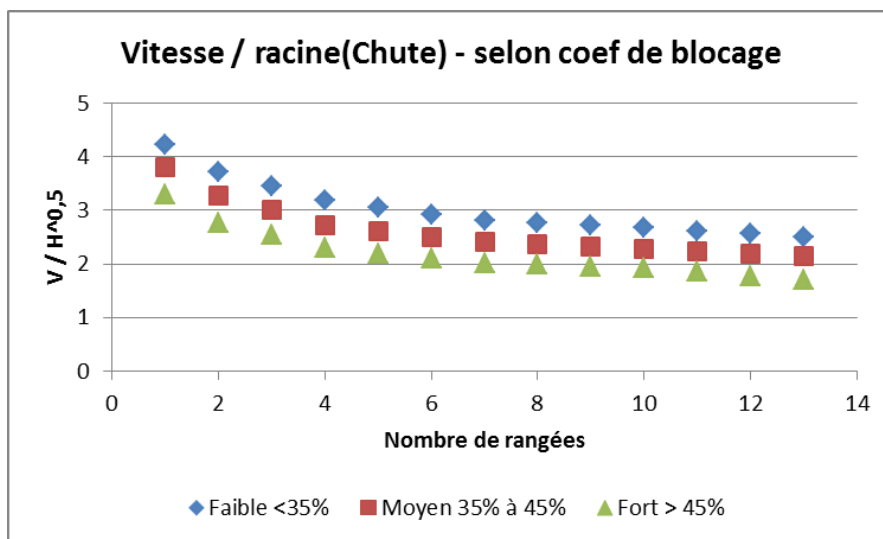


Figure 58 : chenal marélien, relation entre nombre de rangées et vitesse moyenne de l'écoulement

Lorsque les turbines sont à leur point de rendement optimal, le rendement du chenal marélien (puissance prélevée par les turbines / puissance de l'écoulement) ne dépend pas de la chute ; il ne dépend que de l'équipement : coefficient de blocage et nombre de rangées actives.

Ce rendement intègre les différentes pertes hydrauliques et de conversion hydraulique -> mécanique : pertes de charge aux entrées-sorties du chenal, pertes par frottement, perte dans le sillage proche (rotation) et dans le sillage lointain, effet du contournement des turbines par l'écoulement, pertes par traînée sur les structures.

Les pertes par conversion mécanique -> électrique ne sont pas intégrées. Un facteur 0.95 est pris en compte séparément.

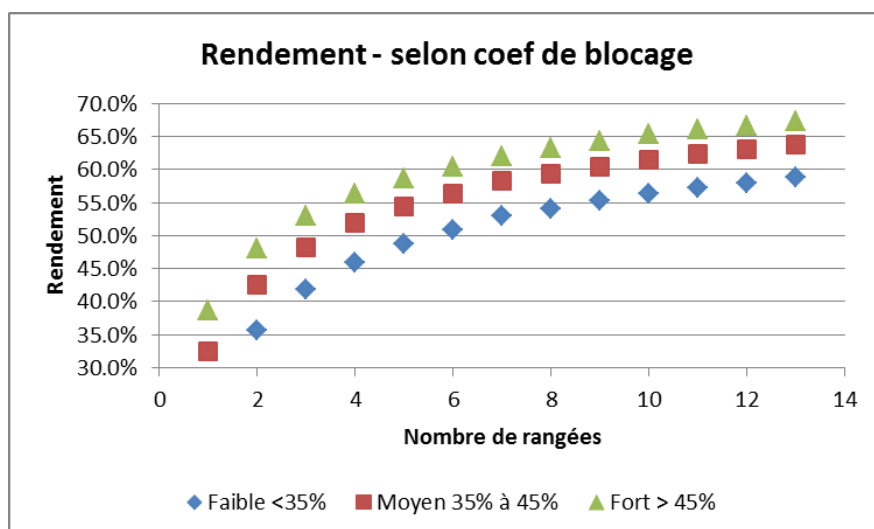
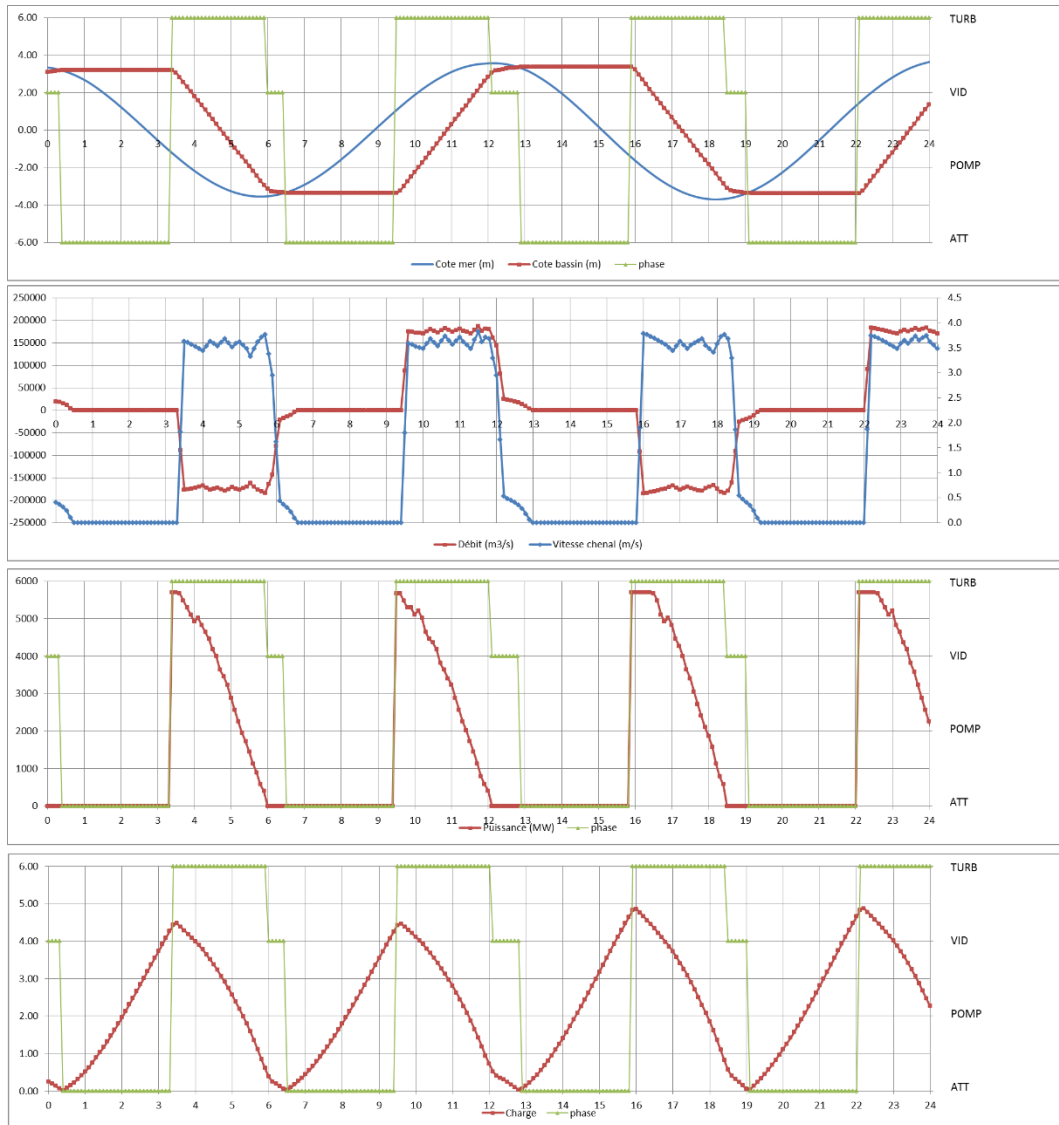


Figure 59 : chenal marélien, relation entre nombre de rangées et rendement du chenal

6.3.4 Prédétermination du productible et du coût d'un aménagement de type « marélienne »

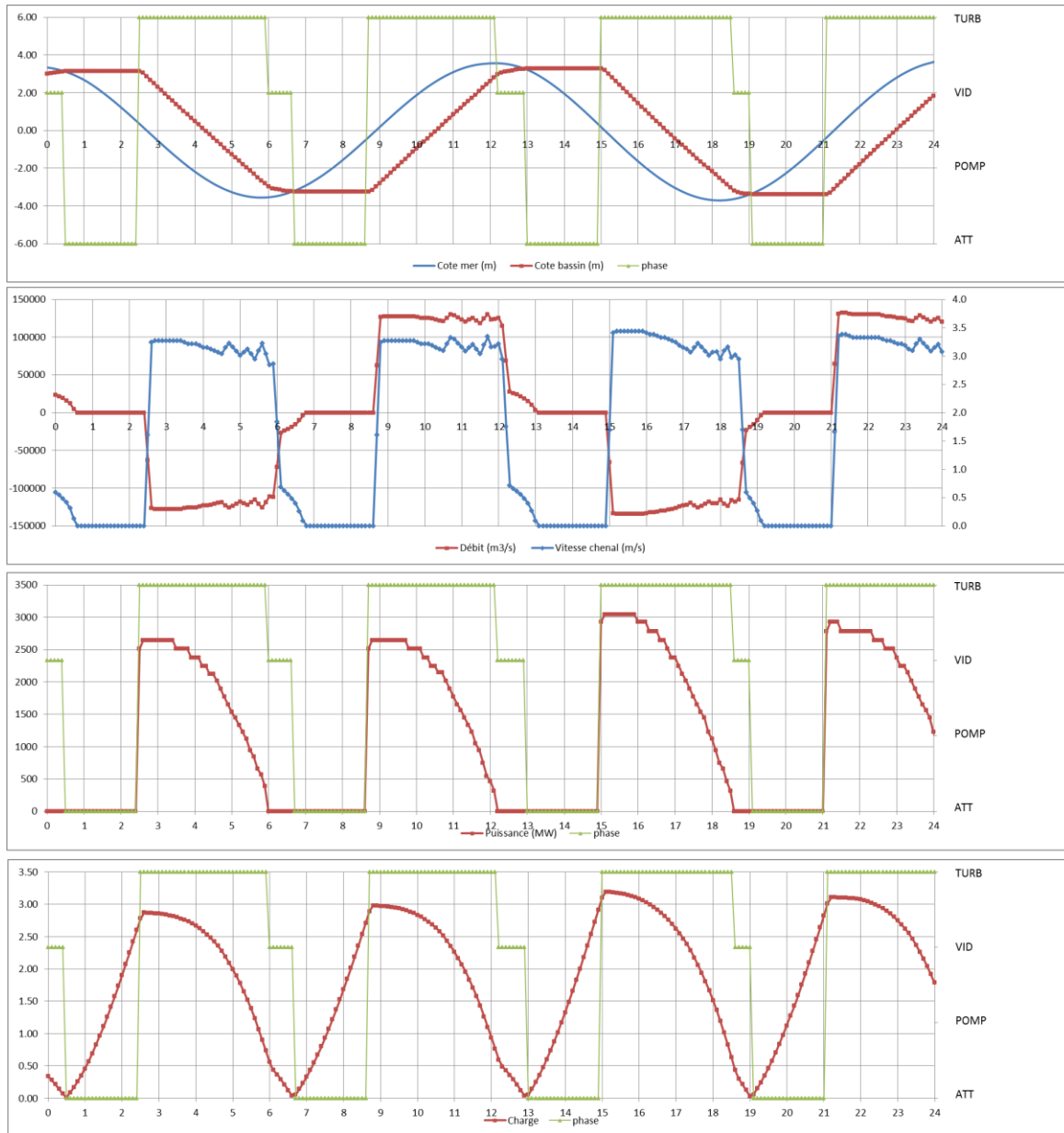
6.3.4.1 Pour le site de référence

La production maximale réaliste d'un site correspond à l'opération de type B ou C (§3.4.2).



Scénario B (attentes : 2h30 à 3h30 selon le coefficient de marée ;)

Chenaux		10 chenaux l=150 m, L=1300 m
Vitesse mini	3.75	m/s
Nb turbines	910	
Diam turbine	20	m
Qmoy par chenal	15 000	m³/s (entre 1 et 5 m de chute)
Ptot	6000	MW
Prod annuelle	13110	GWh
Facteur de charge	25%	
Prod annuelle	1.07	SH²



Scénario C (attentes : 1h30 à 2h30 selon le coefficient de marée)

Chenaux		8 chenaux de 150 m * 1000 m
Vitesse mini	3	m/s
Nb turbines	560	
Diam turbine	19	m
Qmoy par chenal	14 000	m ³ /s (entre 1 et 5 m de chute)
Ptot	3 440	MW
Prod annuelle	10 600	GWh
Facteur de charge	35%	
Prod annuelle	0.87	SH ²

Dans le cas de l'option B, la production atteint 1 S Hm² avec un facteur de charge de 25%. Le même calcul avec un grand site d'amplitude de marée nettement plus faible (marée moyenne de 2,80 m) réalise quand même une production à 0.95 SH², avec un facteur de charge de 25%.

Dans le cas de l'option C, la production atteint 0.8 S Hm² avec un facteur de charge de 35%. Le calcul avec un grand site d'amplitude de marée nettement plus faible (marée moyenne de 2,80 m) réalise quand même une production à 0.75 SH², avec un facteur de charge de 35%, mais à condition d'allonger les temps d'attente et de les aligner sur le scénario B – la différence avec le B étant alors la puissance équipée, plus faible.

L'investissement d'un site comprend essentiellement 4 parts ; les digues, les pertuis et chenaux de maréliennes, les hydroliennes.

	OPTION B		OPTION C	
Digues	40 km à 120 k€/ml	4,8 Md€		4,8 Md€
Pertuis des chenaux	10 * 150 m à 1 M€/ml	1,5 Md€	8 * 150 m	1,2 Md€
Chenaux	10 * 195 000 m ² à 3 k€ / m ²	5,85 Md€	8 * 150 000	3,6 Md€
Electromécanique	6 GW à 1200 €/kW	7,2 Md€	3,5 GW	4,2 Md€
TOTAL :		19,35 Md€		13,8 Md€
Incluant le facteur économies d'échelle : 20% pour un très grand site		15,5 Md€		11 Md€
Soit :		2600 €/kW		3100 €/kW
	Pour un facteur de charge de :	25%		35%

En puissance installée, l'option B paraît plus économique que l'option C. Mais, compte-tenu des facteurs de charge, l'option C aboutit à un prix au kWh plus intéressant que l'option B.

L'option B donne elle-même un prix au kWh plus intéressant que le site marémoteur classique équivalent.

Ce résultat provient de la capacité des maréliennes à turbiner sous de plus faibles charges : donc plus longtemps, avec un équipement de moins grande capacité. Il reste à confirmer au terme d'études approfondies.

6.3.4.2 Pour d'autres sites

Les résultats présentés dans ce document aboutissent, en première approche, à calculer les grandeurs caractéristiques suivantes pour un site marémoteur d'envergure significative (> 300 MW), et avec une marée moyenne d'au moins 3 m, dans le fonctionnement de type C.

Notation	Définition	Commentaire
P_BM	Profondeur moyenne de la fondation des digues sous la cote de basse mer (m)	
S	Superficie du bassin (km ²)	Superficie moyenne sur l'ensemble de la hauteur de marnage
Hm	Marée moyenne (m)	
Qeq	Débit d'équipement (m ³ /s)	
PAnn	Production annuelle (GWh)	
FC	Facteur de charge (%)	

Pinst	Puissance installée (MW)	
Ldig	Longueur des digues (km)	
Lpert	Longueur des pertuis (km)	
LgChen	Longueur du chenal (km)	
PUdig	Prix des digues (M€/km)	

En première approche, on pourra considérer que les chenaux de maréliennes sont équipés de 10 rangées de turbines de 20 m de diamètre. La longueur utile du chenal est alors 1000 m, et l'adaptation au site se fait sur le nombre de chenaux et la largeur des chenaux.

Calculs	Commentaire
$P_{ann} = 0.8 * S.Hm^2$	Correction possible pour les marées de moins de 4 m : 0.75.
FC = 35%	
$P_{inst} = P_{ann} / (8,76 * F_c)$	
$L_{dig} = (2 * \pi * S)^{0.5}$	Pour un site adossé à une cote rectiligne. Sinon, corriger en conséquence
$Q_{eq} = (0.8 * H * S) / (3.5 * 3600) * 10^6$	Cycle de turbinage (et vidange complémentaire) en 3h30 pour le scénario C. Remplacer 0.8 par 0.9 et 3.5 par 3 pour le cas du scénario B.
$L_{pert} = Q_{eq} / (28 * 3.25)$	Débit d'équipement divisé par la hauteur moyenne d'un chenal destiné à héberger des hydroliennes de diamètre 20 m et la vitesse moyenne dans le cas du scénario C. Remplacer 3.25 par 3.75 m/s pour le scénario B.
$P_{udig} = 50 + 3,5 * P_{BM}$	Formule calée sur chiffres du 6.2.6.1
LgChen = 1 km	La longueur des chenaux est fixée par le nombre des rangées.
$Coût\ total\ (M€) = L_{dig} * P_{Udig} + L_{pert} * 1000 + L_{gChen} * L_{pert} * 3\ 000 + P_{inst} * 1.2$	
A pondérer par Facteur d'économie d'échelle : de 0% pour 300 MW à 20% pour 3 GW et plus.	

Pour des sites de taille inférieure, il est nécessaire de réexaminer les prix unitaires.

6.3.5 Quelques pistes de progrès techniques

6.3.5.1 Trajectoire de développement

Le potentiel français réaliste est considérable ; à cause du coût des digues, il est essentiellement basé sur des sites à la côte de centaines de km². Pour des raisons d'économie et d'environnement il s'agira probablement de bassins uniques exploités dans les 2 sens sous une charge modérée de l'ordre de 2,50 m pour la plupart des sites sur la Manche, et 1,50m sur l'Atlantique. Cette option permet de produire 3 ou 4 heures sur six sur chaque site et le décalage horaire entre sites permet en France une production régulière. Le mode choisi peut être l'option C ou l'option mixte C – D qui est peut-être la plus prometteuse.

Un grand site peut produire 10 TWh/an et coûter une dizaine de milliards d'euros. Un tel investissement n'est guère envisageable avant une dizaine d'années ; on pourrait alors équiper en 15 ou 20 ans une cinquantaine de TWh/an. Leur association avec l'hydroélectricité existante peut être un atout essentiel du mix électrique futur.

Ces grands sites doivent être précédés par deux ou trois sites de l'ordre de 1 TWh/an (comparables à la Rance, Sihwa, Swansea ou Cardiff) permettant l'optimisation et l'expérience des divers éléments d'ouvrages. En particulier la solution prometteuse des Maréliennes bien adaptée à ces utilisations est probablement loin actuellement de l'optimisation des coûts et du rendement. Le choix et la gestion des sites préliminaires seront des éléments essentiels de succès : leur mode d'exploitation peut différer en partie de celui des grands sites en gardant les mêmes principes d'opération en deux sens sous charge modérée et en testant les turbines diverses et les solutions de digues.

L'exemple des éoliennes offshore montre l'importance des progrès possibles en quelques années.

6.3.5.2 Optimisation des Groupes Bulbes pour l'option C :

Les Groupes Bulbes sont peu adaptés à des charges faibles avec leur dimensionnement actuel. Il est peut-être possible de les adapter à des charges de 2,5 m correspondant à beaucoup de sites français de 6 à 7 m de marnage : ils resteront probablement peu rentables pour les zones de marée de moins de 5 à 6 m.

Il semble possible par exemple de remplacer un Groupe de Swansea par un Groupe de même largeur de génie civil et même coût unitaire opérant sous une charge maximale réduite de 40% avec un diamètre de turbine augmenté de 15%. On peut alors utiliser l'option C sous charge modérée.

La puissance maximale d'un groupe est multipliée par $0,6^{1,5} \times 1,15^2$ environ 0,6. Son débit maximum est multiplié par $0,6^{0,5} \times 1,15^2$, environ 1,05. En passant de la solution B à la solution C, sa charge moyenne est réduite d'environ 20%, sa puissance moyenne est donc multipliée par $0,8^{1,5} \times 1,15^2$ environ 0,95 et le débit moyen par $0,8^{0,5} \times 1,15^2$, environ 1,2. Sa durée d'utilisation est augmentée de 50%. L'énergie produite par groupe est donc augmentée de 40% pour un coût unitaire voisin (turbine plus grande sous plus faible charge, génie civil peu modifié et puissance d'alternateur et ligne plus faibles).

Le volume écoulé par marée et par groupe est presque doublé. Dans le cas de Swansea le nombre de groupes pourrait être réduit de 16 à 9 pour une puissance totale divisée par 3 et une énergie réduite de 20%.

L'inconvénient technique est la nécessité d'augmenter la superficie du bassin pour absorber l'augmentation des volumes écoulés. Un optimum est à rechercher, pour optimiser le coût au kWh.

Le fonctionnement à plus petite vitesse et sous charge moins grande peut avoir des avantages environnementaux.

6.3.5.3 Pistes d'optimisation économique

6.3.5.3.1 Pour le génie-civil des usines

Les usines de la Rance et Sihwa, les projets de Swansea ou Cardiff prévoient une réalisation à sec par batardeaux. Cette solution peut s'envisager pour les sites préliminaires et une partie des grands sites. Si ces batardeaux sont fondés au rocher, on peut les agrandir un peu pour les utiliser comme carrières pour les digues en enrochement et comme site de préfabrication de leurs blocs béton de protection.

6.3.5.3.2 Pour les maréliennes

Des économies importantes sont envisageables pour les Maréliennes :

- Un espacement réduit entre rangées limitant à 500 m la longueur d'un chenal.
- L'implantation des chenaux dans des zones où le rocher est au-dessus de la cote - 15 et le dragage du rocher ; il est alors possible de se passer du bétonnage du chenal.
- Des modèles de turbine mieux adaptés au problème spécifique.
- Des solutions industrielles adaptées à 500 ou 1 000 turbines par grand site.

6.3.5.3.3 Pour les digues

La conception des caissons optimisés pour les digues peut probablement limiter le volume de béton armé, même pour les zones profondes et réduire sensiblement les couts.

Des digues en enrochements, submersibles par les très fortes marées, construites par voie maritime, peuvent être économiques.

6.3.5.3.4 Tirer parti de sites rocheux

Le cout d'un site préliminaire peut être réduit si les ouvrages (hors digues) peuvent être fondés au rocher et si les digues peuvent être en totalité ou en grande partie en enrochements. On peut aussi envisager une solution C constituée par un chenal de maréliennes réalisé dans le rocher sans mise à sec ou une solution C - D avec 2 chenaux.

On peut aussi envisager une solution associant dans un batardeau des groupes bulbes adaptés à une charge de 2,5 m avec un chenal de maréliennes non vanné. L'ensemble opère comme un modèle mixte C - D. Cette solution est moins liée au rendement des chenaux de maréliennes. Elle évite les pertuis vannés.

Plusieurs sites semblent favorables sur la Manche :

- Au Nord de Boulogne.
- A l'Est de Penly
- Au Sud de Flamanville
- Au Nord de Saint-Quay-Portrieux en Bretagne, site déjà étudié par EDF pour Maréol en 2007 et accueilli alors favorablement.
- A Saint Brieuc.
- Le site de Noirmoutier est favorable sur l'Atlantique, il ne permet pas l'option de Groupes Bulbes mais peut associer un chenal vanné de maréliennes à un chenal non vanné. Il produit près de 2 Twh pour une dizaine de km de digue en enrochements. Le Nord de l'île de Ré est un site comparable.

6.3.5.3.5 Association avec STEP ou éolien offshore

Il peut être opportun d'associer un aménagement marémoteur côtier avec une STEP marine ou un parc éolien offshore.

En effet, le bassin intérieur délimité par les digues offre des conditions favorables :

- Des conditions de mer plus favorable, avec protection contre les plus fortes houles
- La possibilité de mutualiser les lignes de raccordement au réseau.

7 POTENTIEL DE DEVELOPPEMENT & ATTRACTIVITE SOCIO-ECONOMIQUE DES PROJETS

7.1 Eléments méthodologiques

7.1.1 Approche générale sur l'analyse d'attractivité des projets

L'analyse socio-économique développée ci-dessous a vocation à qualifier les conditions d'attractivité des projets marémoteurs, qui reposent en substance sur le revenu annuel exigible par le ou les porteurs de projet en phase d'exploitation, ce dernier reposant sur l'évaluation d'un seuil d'attractivité minimal pour que les investisseurs couvrent leur coût et dégagent les bénéfices escomptés.

Cette donnée clé de référence permet par la suite de mieux appréhender la structure et la sensibilité de cette exigence de revenu vis-à-vis d'un ensemble de variables clés, reposant essentiellement sur les coûts mais aussi sur des externalités positives comme les emplois créés. L'analyse permet ainsi de mieux cibler, entre autres :

- Les leviers d'optimisation du seuil d'attractivité intrinsèques au projet,
- La contribution de l'ingénierie financière au projet,
- L'impact du multiusage et de la création d'emploi sur l'attractivité du projet.

Au-delà de la valorisation économique de l'ensemble des coactivités susceptibles d'émerger dans ce type de projets, les revenus issus de la vente d'électricité sur le réseau apparaissent comme un élément prioritaire de l'analyse d'attractivité des projets. Ainsi, l'évaluation approfondie des coûts complets de production de l'électricité produite (€/MWh) donnent une indication sur l'ordre de grandeur des prix d'achat préférentiel susceptibles d'attirer les investisseurs.

NB : à noter qu'aujourd'hui les opérateurs sont plutôt soumis à la vente en direct de leur production électrique sur le marché modulo une prime négociée avec les gouvernements, cette dernière pouvant varier dans le temps et selon un certain nombre d'engagements de performance ou autres. A noter que ces éléments peuvent en mesure transitoire avoir des impacts sur les primes de risques et sur l'ingénierie financière des projets.

Les coûts de production de l'électricité produite (€/MWh) ou LCOE – *Levelized Cost Of Energy*, sont ici estimés par la méthode dite des « coûts complets hors externalités », qui intègre un certain nombre de segments de coûts dans le cycle de vie global du projet :

- Les CAPEX ou coûts d'investissement (€/MW) : ils incluent le coût de développement, de fabrication et d'installation du système, ainsi que les exigences de rentabilité des investisseurs ; le taux d'actualisation (ou taux de rentabilité interne de l'ensemble du projet)

communément retenu sur le secteur de la production d'électricité renouvelable atteint en général 6 à 12%, prime de risque incluse.

NB : Si les coûts de raccordement au réseau sont également inclus dans le calcul, ceux relatifs au démantèlement restent peu fiables et n'ont pas été intégrés ici. Cette décision a été jugée recevable, dans la mesure où pour les projets faisant appel à des digues, la durée de vie des infrastructures est de l'ordre de cent ans (les provisions seraient donc très faibles).

- Les OPEX ou coûts d'opération et de maintenance (O&M) : ils sont usuellement estimés annuellement par un pourcentage du coût d'investissement.

⇒ Ils varient le plus souvent entre 3 et 8% du CAPEX en fonction de la complexité des technologies et des zones d'exploitation.

- Le productible, autrement dit la disponibilité et la performance des technologies déterminées par le facteur de charge*, ces derniers pouvant varier pour le marémoteur entre 10% et 30% (et davantage pour certaines configurations).

** Le facteur de charge fait référence au nombre d'heures (h) de fonctionnement dans une année à puissance nominale maximale. Autrement dit il détermine le « productible annuel » d'un système d'une puissance nominale donnée : il suffit de multiplier cette puissance par 8766 heures (année complète) et par le facteur de charge..*

D'autres variables clés du modèle sont à considérer, comme :

- La durée de vie des installations, qui peut varier considérablement en fonction des architectures de projet étudiés : nous avons retenu la durée de vie minimale de 20 ans (qui se fonde notamment sur les exigences des énergéticiens), et 80 voire 100 ans pour les plus importantes, à l'image des projets considérés ici.

7.1.2 Détail des hypothèses retenues par le GT

Les principales variables utilisées dans cette analyse sont :

- Comme cela a déjà pu être présenté lors de l'analyse des projets les plus avancés et sur lesquels un retour d'expériences était possible, nous évaluons le CAPEX des différents projets analysés actuels et futurs d'au moins plusieurs centaines de MW (et pouvant pour les plus grands dépasser le GW de puissance installée) entre 2.5 et 3.5 M€/MW ; la digue représentant 60% de ce coût global incluant l'ensemble des éléments pour rendre opérationnel le démarrage de la production, y compris les études amont et la phase d'ingénierie et de développement.
- Les OPEX, indexées sur une part des CAPEX. Ils sont calibrés suivant l'équilibre digue/électrotechnique (2/3 – 1/3) et avec des taux d'opération & maintenance indépendants dont le détail est :
 - Estimation à 8.5% du CAPEX pour les OPEX associés aux éléments électrotechniques complexes et nécessitant un entretien régulier sinon quotidien, exigeant hommes qualifiés et matériels adaptés,

- Estimation de 0.5% du CAPEX pour les OPEX associés à la digue, du fait d'une durée de vie importante et d'une faible mobilisation de ressources matérielles et humaines par rapport à l'investissement initial.
- Le productible, directement issu du facteur de charge et calibré suivant l'état de l'art actuel ; pour rappel, les projets analysés confirment un facteur de charge de 23% en moyenne, le faible écart-type sur l'échantillon de projets justifie une amplitude tout aussi faible dans les scénarii étudiés. Notons cependant que cette hypothèse sous-estime certainement certaines configurations de fonctionnement (options C et D du §3.4)
- Le Taux de Rentabilité Interne du projet (TRI), représentant l'exigence de rentabilité des pourvoyeurs de fonds à atteindre pour que le projet ne soit pas mené à perte. Le niveau retenu est de 4.5%, justifié par l'ingénierie financière optimisée suivante :

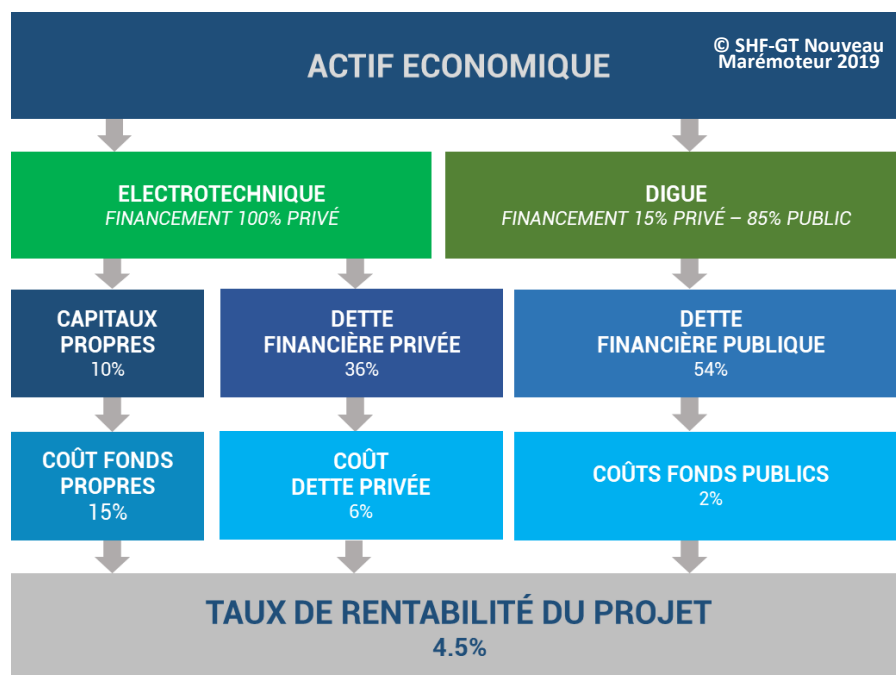


Figure 60 : Financement de l'actif économique du scénario référentiel – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

Ce premier travail réalisé au sein du GT fait d'ores et déjà apparaître un enjeu de financement public/privé sur ce type d'ouvrages, permettant d'envisager, compte tenu des externalités positives (protection du trait de côte, création d'emplois, ...) un poids du financement public élevé sur la digue, et par suite des exigences de rentabilité moindres (prise en compte par la collectivité de l'effet de levier issu des investissements rendus possibles suite à la construction de la digue).

NB : A noter enfin que la durée de vie du projet et des investissements moyens associés ont été établis à 40 ans. Une hypothèse jugée largement conservatrice considérant la durée de vie de la digue, de l'ordre de 100 ans.

7.2 Choix d'un scénario de référence et détermination de son seuil d'attractivité économique

Les scénarii suivants représentent un éventail de perspectives pour des projets dimensionnés à 1GW de puissance installée. Ils sont représentatifs de la majorité des potentiels cas de figure, dont 80% peuvent être compris entre le scénario « *conservateur* » et « *volontariste* ».

© SHF-GT Nouveau Marémoteur 2019	Scénario	Extrême	Conservateur	Référentiel	Volontariste	Extrême
Puissance installée		1 000 MW	1 000 MW	1 000 MW	1 000 MW	1 000 MW
CAPEX		3 500 €/kW	3 250 €/kW	3 000 €/kW	2 750 €/kW	2 500 €/kW
CAPEX total		3,50 G€	3,25 G€	3,00 G€	2,75 G€	2,50 G€
Durée de vie (années)		40 ans	40 ans	40 ans	40 ans	40 ans
Taux de rentabilité interne		6,0%	5,0%	4,5%	4,0%	3,5%
OPEX annuels (%CAPEX)		4,00%	3,63%	3,25%	3,13%	3,00%
Facteur de charge		21%	22%	23%	24%	25%
Productible annuel		1 840h	1 927h	2 015h	2 102h	2 190h
Seuil d'attractivité (S.A.)		373 M€	307 M€	261 M€	225 M€	192 M€
Dont CAPEX		233 M€	189 M€	163 M€	139 M€	117 M€
Dont OPEX		140 M€	118 M€	98 M€	86 M€	75 M€
FiT idéal pour atteindre le S.A.		203 €/MWh	159 €/MWh	129 €/MWh	107 €/MWh	88 €/MWh

Figure 61 : Détail des scénarios - 1GW – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

La modélisation économique de ces différents scénarii permet la détermination du seuil d'attractivité (SA) des projets, c'est-à-dire le niveau de revenus annuels à partir duquel le projet devient économiquement viable pour ses pourvoyeurs de fonds.

Il est important de distinguer le seuil d'attractivité (exprimé en millions d'euros/an) du « *Feed-in-Tariff* » théorique (FiT) pour le satisfaire, ce dernier étant un prix de vente de l'électricité virtuel dont l'unité d'œuvre est l'€/MWh.

Nous restons dans cette analyse en ligne avec le scénario « *Référentiel* », tout en admettant l'intérêt de mises en perspective ponctuelles avec les scénarios « *Conservateur* » et « *Volontariste* ».

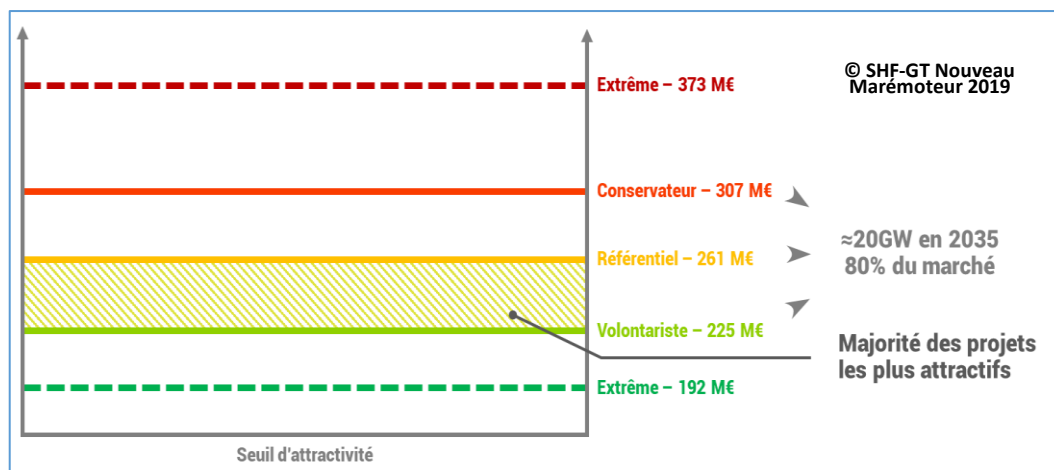


Figure 62 : Positionnement des différents scénarios - 1GW – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

Les conditions d'attractivité du scénario référentiel se résument à la définition d'un seuil d'attractivité de 261 M€ par an pour un projet marémoteur de 1GW évalué à 3 milliards d'euros d'investissement.

Si l'économie du projet ne reposait que sur la vente d'électricité, la couverture complète de ce seuil d'attractivité nécessiterait un FiT ou tarif d'achat préférentiel de l'électricité produite de 129 €/MWh.

Dans les standards actuels, qui restent très évolutifs, un tarif d'achat de l'électricité produite en 2025 ne peut excéder selon le GT 100€/MWh.

Considérant ce FiT « maximum », le revenu de l'électricité peut donc être estimé à :

- **Scénario Référentiel : 202 M€** vs SA 261 M – delta = -59 M€
 - *Scénario Volontariste : 210 M€ vs SA 225 M€ – delta = -15 M€*
 - *Scénario Conservateur : 193 M€ vs SA 307 M€ – delta = -114 M€*

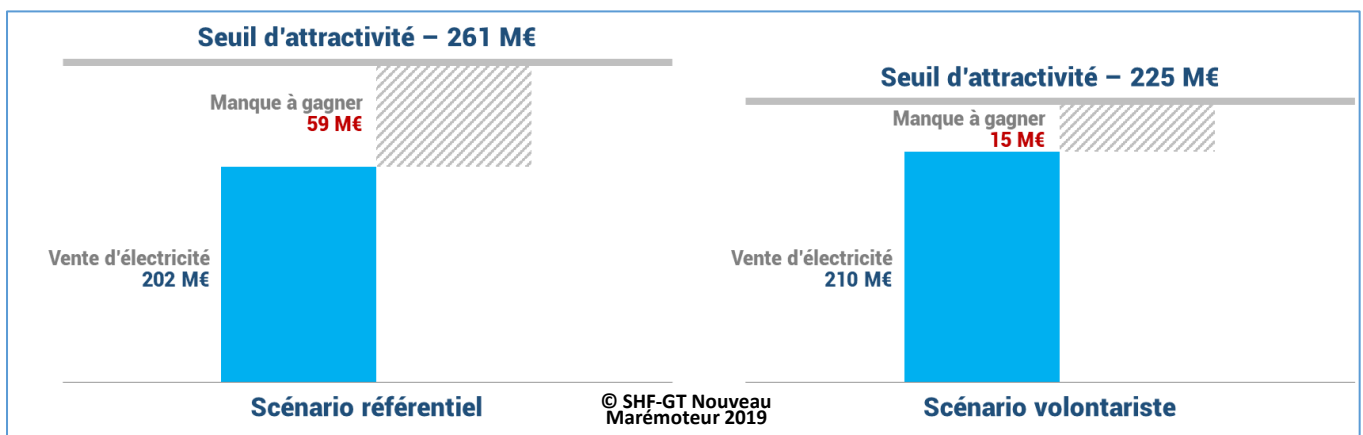


Figure 63 : Ecart vente d'électricité/seuil d'attractivité – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

Indépendamment du scénario considéré, les seuls revenus de la vente d'électricité ne parviennent pas à atteindre le seuil d'attractivité. Les tarifs d'achat préférentiels retenus dans cette évaluation sont dans les deux cas supérieurs aux standards des autres EMR, justifiant alors la pertinence du recours ou de la prise en compte du multiusage afin de renforcer l'attractivité économique du projet.

7.3 Conditions d'atteinte du seuil d'attractivité

Trois leviers d'action sont identifiés comme pouvant agir sur l'atteinte du seuil d'attractivité :

- La vente de l'électricité produite par le marémoteur,
- Le recours au multiusage,
- La prise en compte des externalités socio-économiques et environnementales.

7.3.1 Contribution de la vente d'électricité à l'atteinte du seuil d'attractivité

Comme mentionné plus haut, la vente d'électricité représente la principale source de revenus pour le nouveau marémoteur. Dans le scénario de référence ce sont 202 M€ obtenus par la vente annuelle d'un peu plus de 2TWh, malgré quoi 59 M€ de revenus sont toujours nécessaires pour atteindre le seuil d'attractivité du projet.

7.3.2 Contribution du multi-usages à l'atteinte du seuil de rentabilité

Les éléments suivants constituent une approche exploratoire, dans la mesure où il n'existe pas ou pas encore de moyens clairement identifiés de pouvoir « récupérer » les coûts des services du multi-usages.

Le périmètre du multiusage est défini par les activités pouvant directement tirer parti de la présence du lagon et en mesure de contribuer financièrement pour bénéficier de ces avantages. Les premières pistes de co-usages identifiées et valorisées par le GT sont les suivantes :

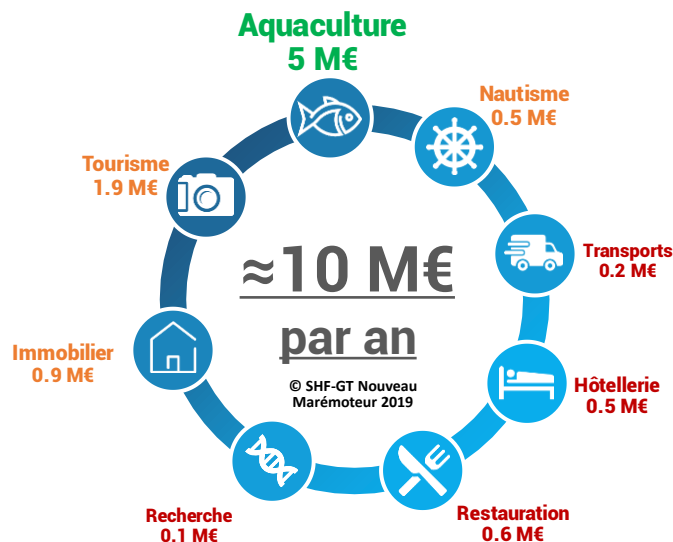


Figure 64 : Détail des revenus annuels du multiusage imputables au lagon – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

Les valeurs retenues sont structurées sous la forme d'une potentielle redevance considérant :

- Les niveaux de marge moyens des activités, issus de cas réels d'envergure analogue,
- Le niveau de dépendance du projet à la présence du lagon,
- L'impact du lagon sur les CAPEX traditionnels (*ex : besoins limités en lest, navires, cages, etc. dans le cas de l'aquaculture*),
- L'impact d'une redevance sur la pérennité de l'activité : *exemple, un restaurant haut-de-gamme tirant directement sa clientèle de la présence du lagon pourra supporter une redevance à hauteur de 10% du CA, tandis qu'une restauration d'entrée de gamme supportera un taux réduit à 6%.*

En Annexe à cette partie figure le détail des hypothèses ayant permis de valoriser les revenus annuels issus des activités du multiusage.

Analyse :

L'aquaculture est sans conteste le co-usage le plus attractif, le lagon apportant les avantages distinctifs suivants :

- Des coûts de transport et d'installation réduits,
- Un recours limité aux investissements matériels (cages, navires, filets...) et humains,

- Une meilleure accessibilité durant les opérations,
- Des espaces plus vastes maximisant la production et limitant les activités de traitement d'eau.

Les autres postes sont secondaires mais demeurent un ensemble significatif ; ils peuvent être catégorisés en deux rangs d'importance :

- Rang 2 : tourisme, nautisme, immobilier,
- Rang 3 : restauration, hôtellerie, transports, recherche.

Envisager ces projets à très grande échelle peut substantiellement bouleverser les équilibres. A titre d'exemple la ferme aquacole de l'atoll de Hao en Polynésie représente un investissement de 1.3 G€ pour une production de 50KT de poisson par an. Comparativement la production française était de 750 KT en 2016.

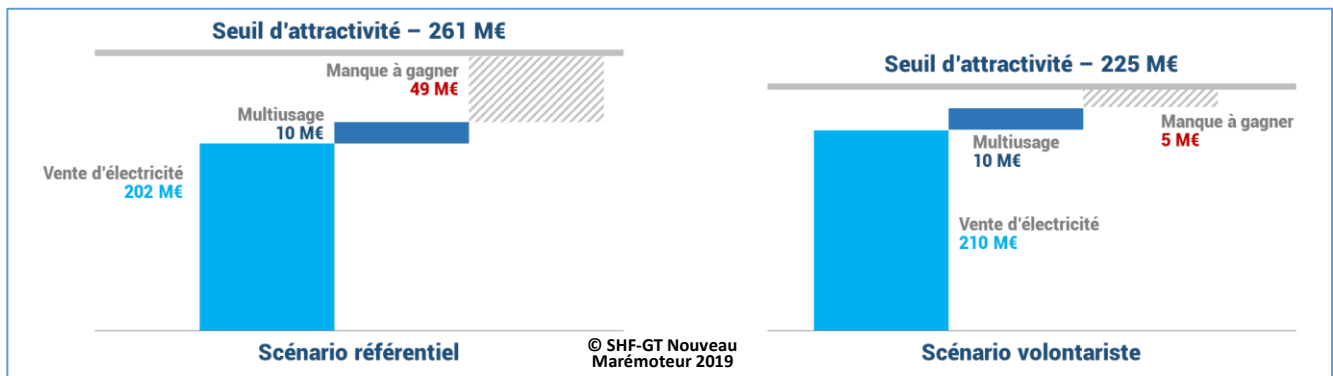


Figure 65 : Revenus de la vente d'électricité et du multiusage par rapport au seuil d'attractivité – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

Le multiusage représente un revenu potentiel de 10M€/an ; avec la vente d'électricité, le revenu total atteint ainsi 212M€/an, toujours en dessous du seuil d'attractivité avec toutefois un écart réduit à 49M€/an.

Dans ces conditions, le *FiT* nécessaire serait pour le scénario référentiel de 124€/MWh, toujours supérieur à la limite de 100€/MWh mentionnée précédemment.

Le scénario volontariste quant à lui présenterait un *FiT* nécessaire de 102€/MWh, soit une situation de quasi équilibre pouvant basculer dans l'attractivité économique du projet, dans ces hypothèses plus favorables que dans le scénario de référence.

Dans le cadre du scénario référentiel, vente d'électricité et revenus du multiusage inclus, il serait nécessaire pour rendre le projet économiquement attractif de :

- Augmenter le *FiT* à un niveau de 124€/MWh, inenvisageable avec ces seuls éléments selon le GT,
- Repenser le multiusage avec plus d'envergure, ce qui est actuellement une perspective trop floue pour être retenue,
- Identifier d'autres revenus.

C'est bien cette dernière piste qui a été retenue, en incluant au bilan économique global de ces projets de territoire un certain nombre de leurs externalités socio-économiques et environnementales.

7.3.3 Bénéfices socio-économiques et externalités environnementales positives

La considération du potentiel de création d'emplois et de préservation de l'environnement sont des éléments ayant une valeur sociale et politique importante que le GT a considéré comme pertinente de considérer dans cet exercice de valorisation. Bien qu'ils ne soient pas directement perceptibles en numéraire, ils représentent un élément à faire valoir sur des volets économiques clés, par exemple sur les taux d'intérêt de financements publics, de subventionnements, voire de prix d'achat de l'électricité, etc.

Les bénéfices socio-économiques du multiusage et des opérations et maintenance de la production électrique (O&M) sont principalement considérés par l'emploi généré. La valeur de l'emploi est mesurée par la valeur ajoutée portée par ce-dernier, soit sa contribution au *Produit Intérieur Brut*.

Sont ici uniquement considérés les emplois directs générés par l'O&M et le multiusage.

Sont volontairement exclus :

- Les emplois de la phase de construction (plusieurs milliers sur plusieurs années, mais éphémères par nature),
- Les emplois indirects, qui ne seront pas systématiquement présents à proximité du lieu géographique du projet (sous-traitance, ...)
- Les emplois induits.

Ces trois postes n'étant pas considérés dans l'analyse socio-économique, la méthodologie retenue est donc conservatrice.

Les externalités environnementales s'inscrivent dans deux stratégies :

- L'adaptation aux changements climatiques, dont la protection du trait de côte qu'apporte le marémoteur est un levier fort,
- L'atténuation de ces phénomènes, avec notamment les politiques de « pollueur-payeur » ou tout du moins la valorisation de « l'impact carbone » positif de ce type de projet permettant de produire de l'électricité renouvelable de façon importante (ici plus de 2 TWh/an).

7.3.3.1 Qualification de la création d'emplois

Selon les différents travaux d'évaluation émanant du GT, les emplois estimés générés par un grand projet marémoteur sont conséquents :

- 50 emplois pour les activités d'opération et maintenance de l'usine marémotrice,
- 500 emplois de multiusage autour du lagon.

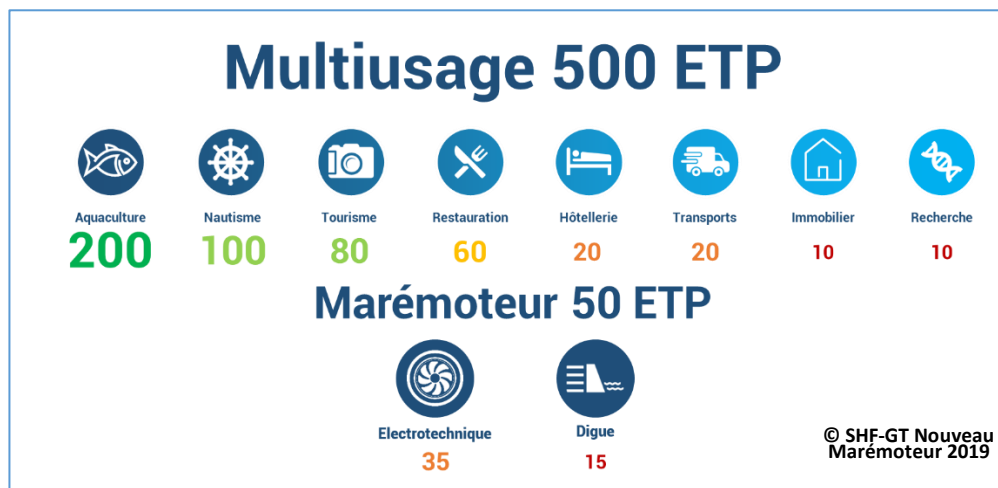


Figure 66 : Détail des emplois générés par le nouveau marémoteur – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

Sans conteste, c'est dans l'aquaculture que réside le plus grand potentiel (activité de production, transformation, stockage, emballage, logistique, etc.), immédiatement suivi par le nautisme et le tourisme qui à eux quatre représentent 70% du potentiel total.

7.3.3.2 Valorisation des emplois créés

La méthodologie employée considère :

- Les emplois générés (ETP),
- La valeur ajoutée par emploi en considérant le montant moyen de valeur ajoutée porté par cet emploi d'après les données INSEE 2016,
- L'addition des produits valeur ajoutée x ETP.

Typologie d'emploi	© SHF-GT Nouveau Marémoteur 2019	ETP du projet	Valeur ajoutée par branche (G€)	Emplois par branche (Milliers)	VA/emploi (€)	Valeur totale (€)
Hébergement & restauration		80	55,1	992	55 544	4 443 548
Fabrication d'équipements électriques		35	6	80,8	74 257	2 599 010
Fabrication de machines et équipements n.c.a.		15	12,5	152,4	82 021	1 230 315
Agriculture, sylviculture et pêche		200	34,6	336,8	102 732	20 546 318
Transports et entreposage		20	93,8	1295	72 432	1 448 649
Activités immobilières		10	253	308	821 429	8 214 286
Recherche-développement scientifique		10	34,1	459	74 292	742 919
Arts, spectacles et activités récréatives		180	26,8	573	46 771	8 418 848
TOTAL		550	516	4 197	86 625	47 643 893

Figure 67 : Valorisation de la création d'emplois directs – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

Les externalités socio-économiques positives représentent une valeur globale de 48 M€/an, cette valeur étant imputable à l'emploi direct créé autour du caractère multi-usage du projet.

Considérant l'ensemble des activités potentielles à développer, on observe une prépondérance en valeur des activités d'aquaculture, de tourisme & loisirs, et d'immobilier.

7.3.3.3 Valorisation des externalités environnementales

Considérant les méthodes disponibles actuellement, seule la protection du trait de côte et le bilan carbone ont été valorisés par le GT.

- La valorisation du trait de côte prend en compte les activités d'entretien des plages, de lutte contre l'érosion et les intempéries, et considère notamment les postes d'investissement en hommes et matériels. Nous rapportons la longueur de côte protégée par le lagon aux budgets d'entretien standards assurés en règle générale par les communes. Nous estimons à 2M€/an l'économie globale réalisée grâce à la présence de la digue sur la protection du trait de côte. (Équipements, ETP, nettoyage...).
- Le bilan carbone représente l'économie de CO₂ réalisée par une production énergétique par rapport à une autre. Elle se compose de standards de génération de CO₂ liés à la mise en place et à l'opération de systèmes énergétiques, par rapport à une moyenne nationale ; ainsi il convient de déterminer :
 - Le référentiel CO₂ pertinent : le marémoteur n'ayant pas ou peu d'historique, l'hydroélectrique est alors la « famille » la plus proche avec un taux retenu par l'ADEME de 6g CO₂equiv./kWh par opposition au charbon et des 1038 gCO₂equiv./kWh.
 - NB : La consommation moyenne française étant de 80 gCO₂equiv./kWh, très basse grâce à une part importante du nucléaire, ce levier se renforce dans des pays comme le Royaume-Uni, dont la production électrique est bien plus carbonée.
 - Le référentiel de coût du carbone : estimé par plusieurs groupes internationaux (Commission Stern-Stiglitz, Rapport Quinet, ...) et comme le prévoit la Loi de Transition Énergétique sur une trajectoire de 56€/t en 2020 et 100€/t en 2030, cette valeur sera retenue car en adéquation avec la date d'entrée en opération potentielle des premiers grands projets dépassant le GW de puissance installée.

⇒ Pour ensuite établir le différentiel de CO₂ généré :

- Pour un projet marémoteur de 1GW et une production de quelques 2TWh/an, l'équivalent CO₂ serait de 12KT annuelles (justifié par les phases de construction et d'entretien), soit environ 1,2M€ de valeur tutélaire,
- La moyenne française pour un projet de cette taille atteint 161KT, soit 16M€ de valeur tutélaire.

Le bilan carbone positif est alors évalué pour un projet français à 16M€ - 1,2M€ soit près de 15M€.

Ce chiffre peut être amené à plus que doubler dans d'autres pays plus fortement dépendants de sources d'énergie à forte base carbone.

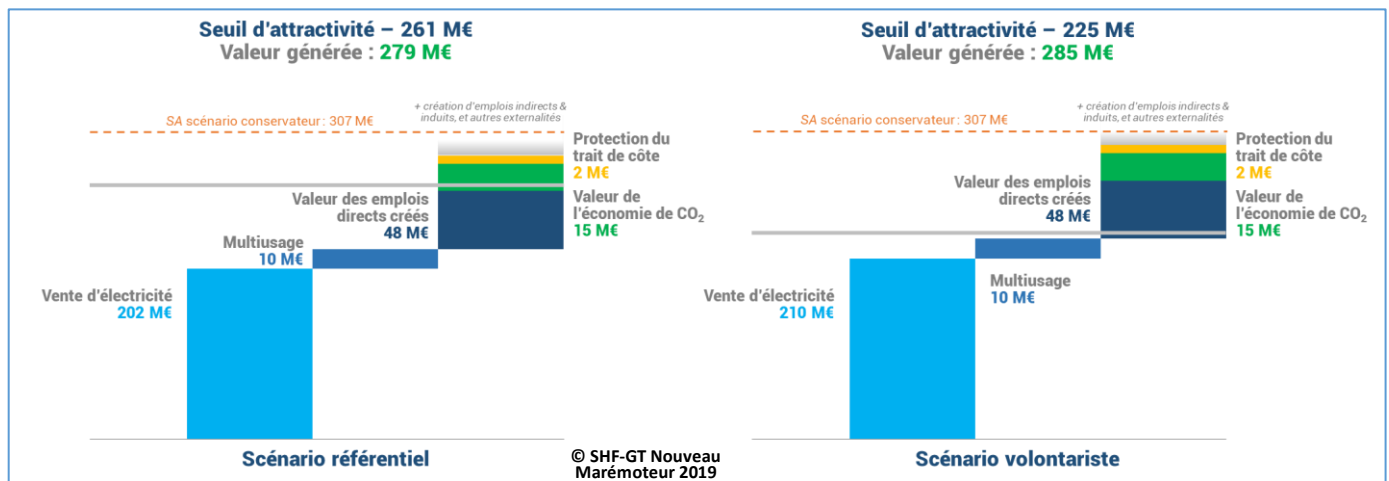


Figure 68 : Valeur générée par l'électricité, le multiusage et les externalités d'emplois et environnementales
– Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

En considérant l'ensemble de ces segments de valorisation économique, dans le scénario référentiel, le seuil d'attractivité est significativement dépassé par une « valeur générée » de 279M€ où emplois directs, protection du trait de côte et économies de CO₂ doivent être conjugués ensemble pour réussir.

Dans le scénario volontariste, la valeur des emplois directs créés fait dépasser le seuil d'attractivité du projet, auxquels peuvent aussi s'ajouter le bilan carbone positif, la protection du trait de côte. C'est un excédent ici égal à un minimum de +60M€/an qui est donc considéré.

NB : A noter que la phase de construction du projet et la création d'emplois associée (plusieurs milliers) n'est pas considérée ici. Son impact peut donc impacter positivement et avec substance les seuils d'attractivité définis dans la méthodologie et les périmètres d'analyse socio-économique retenus par le GT.

7.3.4 Bilan de l'analyse socio-économique des projets marémoteurs

Les scénarios de référence et volontariste considérant le multi-usage tendent à valider la pertinence économique, sociale et écologique de nouveaux projets marémoteurs.

Les seuils de revenus nécessaires permettant de valider l'attractivité de ce type d'investissement convergent vers une valeur cible de l'ordre 250 M€ / an.

La vente d'électricité représente de loin la principale source de revenus, mais elle est toutefois jugée insuffisante dans les conditions actuelles d'évolution du soutien des Etats (<100€/MWh, soit un revenu estimée moyen de l'ordre de 200 M€/an).

Les externalités sont l'un des éléments essentiels pour rendre le projet attractif : elles sont susceptibles de représenter une valeur annuelle et contributive au bilan économique du projet jusqu'à +77M€ (*multiusage + emplois + bilan carbone + protection du trait de côte*), permettant de dépasser significativement leur seuil d'attractivité.

Ainsi :

Les externalités d'un projet marémoteur - en particulier le caractère multi-usage (aquaculture, tourisme, ...) et la création d'emplois directs pérennes et non délocalisables (>500), représentent des leviers d'attractivité de premier rang, qui lient politique socio-économique et politique énergétique autour d'un grand projet de territoire.

7.4 Tests de sensibilité des variables clés du modèle d'attractivité des projets

La réalisation de tests de sensibilité vise à comprendre l'évolution de l'attractivité du projet en fonction de la modification de variables clés telles que la puissance installée, le financement, le niveau du prix d'achat de l'électricité produite.

7.4.1 Sensibilité à la puissance installée

Les perspectives de développement de ce type de nouveaux projets conduisent à envisager des puissances électriques installées allant jusqu'à 3GW ; l'échelle pouvant jouer un rôle positif sur les coûts, le GT a cherché à évaluer la sensibilité de cette variable dans l'analyse socio-économique réalisé précédemment.

Scénario © SHF-GT N.M.2019	1 GW	1,5 GW	2,0 GW	2,5 GW	3,0 GW
Puissance installée	1 000 MW	1 500 MW	2 000 MW	2 500 MW	3 000 MW
CAPEX	3 000 €/kW	2 800 €/kW	2 700 €/kW	2 600 €/kW	2 500 €/kW
CAPEX total	3,00 G€	4,20 G€	5,40 G€	6,50 G€	7,50 G€
Durée de vie (années)	40 ans	40 ans	40 ans	40 ans	40 ans
Taux de rentabilité interne	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%
OPEX annuels (%CAPEX)	3,25%	3,20%	3,15%	3,10%	3,00%
Facteur de charge	23%	23%	23%	23%	23%
Productible annuelle	2 015 MWh	3 022 MWh	4 030 MWh	5 037 MWh	6 044 MWh
Seuil d'attractivité (S.A.)	261 M€	363 M€	464 M€	555 M€	633 M€
<i>Dont CAPEX</i>	<i>163 M€</i>	<i>342 M€</i>	<i>587 M€</i>	<i>883 M€</i>	<i>1 223 M€</i>
<i>Dont OPEX</i>	<i>98 M€</i>	<i>134 M€</i>	<i>170 M€</i>	<i>202 M€</i>	<i>225 M€</i>
FiT idéal pour atteindre le S.A.	129 €/MWh	120 €/MWh	115 €/MWh	110 €/MWh	105 €/MWh
Revenus vente d'électricité (R.E.) <i>Hypothèse maximale avec 100 €/MWh</i>	201 M€	302 M€	403 M€	504 M€	604 M€
S.A. - R.E.	59 M€	60 M€	61 M€	51 M€	28 M€

Figure 69 : Sensibilité du seuil d'attractivité à la puissance installée – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

La dimension du projet impacte très significativement son attractivité : avant multiusage et externalités socio-économiques et environnementales, le « manque à gagner » ($S.A. - \Omega$) est de 59M€, soit un besoin de 23% du seuil d'attractivité à combler. Dans un scénario de 3GW, ce rapport devient 4%, le projet est alors sur le point de devenir strictement attractif sans même avoir recours au multiusage.

7.4.2 Sensibilité au financement

Les retours d'expérience pour réduire le risque des projets, l'essor du crowdfunding ou des *Green Bonds*, la maturité des technologies, l'intérêt social pour une énergie verte et des bénéfices socio-économiques ainsi que le développement de nouvelles solutions d'ingénierie financière, sont d'autant d'éléments permettant d'envisager des TRI de projet plus bas que ceux évalués par le GT dans les scénarii les plus probables : l'hypothèse la plus favorable retenue ici est 3%, vs. 4,5% dans le scénario de référence.

Scénario	1 GW	1 GW	1 GW	1 GW	1 GW
Puissance installée © SHF-GT N.M.2019	1 000 MW	1 000 MW	1 000 MW	1 000 MW	1 000 MW
CAPEX	3 000 €/kW	2 800 €/kW	3 000 €/kW	2 600 €/kW	2 500 €/kW
CAPEX total	3,00 G€	2,80 G€	3,00 G€	2,60 G€	2,50 G€
Durée de vie (années)	40 ans	40 ans	40 ans	40 ans	40 ans
Taux de rentabilité interne	7,0%	6,0%	5,0%	4,0%	3,0%
OPEX annuels (%CAPEX)	3,25%	3,25%	3,25%	3,25%	3,25%
Facteur de charge	23%	23%	23%	23%	23%
Productible annuel	2 015 MWh	2 015 MWh	2 015 MWh	2 015 MWh	2 015 MWh
Seuil d'attractivité (S.A.)	323 M€	277 M€	272 M€	216 M€	189 M€
Dont CAPEX	225 M€	186 M€	175 M€	131 M€	108 M€
Dont OPEX	98 M€	91 M€	98 M€	85 M€	81 M€
FiT idéal pour atteindre le S.A.	160 €/MWh	138 €/MWh	135 €/MWh	107 €/MWh	94 €/MWh
Revenus vente d'électricité (R.E.) <i>Hypothèse maximale avec 100 €/MWh</i>	201 M€	201 M€	201 M€	201 M€	201 M€
S.A. - R.E.	121 M€	76 M€	71 M€	14 M€	-12 M€

Figure 70 : Sensibilité de l'attractivité au coût du financement – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

L'attractivité d'un projet marémoteur est extrêmement sensible au TRI pratiqué. Dans un scénario référentiel considérant la valeur du multiusage et des externalités le projet n'est plus attractif au-delà d'un TRI de 5%.

Toutes choses égales par ailleurs, structurer un financement à un coût de l'actif inférieur à 5% est donc un enjeu prioritaire.

7.4.3 Sensibilité au tarif d'achat de l'électricité

Suivant les paramètres du scénario référentiel, avec 77M€ de valeur générée issue du multiusage et d'externalités et un seuil d'attractivité fixé à 261M€ :

- 100€/MWh → 202 M€ (électricité) + 77 M€ = 279M€ → strictement attractif
- 90€/MWh → 181 M€ (électricité) + 77 M€ = 258M€ → tendance neutre
- 80€/MWh → 161 M€ (électricité) + 77 M€ = 238M€ → très difficilement attractif

Dans un scénario référentiel, il est donc difficilement envisageable de se projeter sur un tarif d'achat de l'électricité en dessous de 90€/MWh tout en conservant le caractère attractif du projet. Néanmoins les leviers identifiés précédemment sur le dimensionnement et l'ingénierie financière peuvent influencer positivement sur ce constat.

7.5 Annexes

7.5.1 Tableau de données justifiant l'évaluation des revenus issus du multiusage

Aquaculture - économie d'infrastructure et d'OPEX liée au projet	5,0	51%
<i>dont économie d'infrastructure et d'OPEX liée au projet</i>	4,8	49%
<i>dont Conchyliculture/5% CA annuel</i>	0,1	1%
<i>dont culture algale/ 5%CA annuel</i>	0,1	1%
<i>dont ostréiculture/ 10% CA annuel</i>	0,1	1%
Tourisme/Loisirs	1,9	20%
<i>dont visites digue/site</i>	1	10%
<i>dont plage: 15€/personne/10% du CA</i>	0,3	3%
<i>dont voile/kyte: 20€ par personne/200 locations par jour/6 mois par an/10% CA</i>	0,1	1%
<i>dont location de vélos - 10€/personne/300.vélos.jour/comm. 10%</i>	0,1	1%
<i>dont camping: 15€/jour/personne/200personnes/8mois/10% CA</i>	0,1	1%
<i>dont événementiel: 5000personnes/mois x 30€/10% CA</i>	0,2	2%
<i>dont parc aquatique: 500personnes/jour/4mois/5% CA</i>	0,1	1%
<i>dont plongée: 80 personnes/jour/8mois.sur.12/10%CA</i>	0,2	2%
Nautisme	0,5	5%
<i>dont location navires : 40 navires/500€/jour - 10% du CA en commission</i>	0,36	4%
<i>dont location Jetski 30/jour/300€ par unité/6 mois/10% CA</i>	0,16	2%
Restauration	0,6	7%
<i>dont haut de gamme: 100 couverts/jour/60€ par plat/10%CA</i>	0,22	2%
<i>dont moyenne gamme: 300 couverts/jour/30€ par repas/8% CA</i>	0,26	3%
<i>dont entrée de gamme: 500 couverts/jour/15€ par repas/6% CA</i>	0,16	2%
Hôtellerie	0,5	5%
<i>dont haut de gamme: 50 chambres/jour/150€ par chambre/9%CA</i>	0,25	3%
<i>dont moyenne gamme: 80 chambres/jour/70€ par chambre/7% CA</i>	0,14	1%
<i>dont entrée de gamme: 100 chambres/jour/40€ par chambre/5% CA</i>	0,07	1%
Transport & services associés	0,2	2%
<i>dont carburant - 80€/visiteur/100k/1 véhicule.pour.4/commission 3% du CA</i>	0,06	1%
<i>dont services de mobilité - 1 visiteur.sur.5 /15€.par.personne/100k.visiteurs/3%CA</i>	0,01	0%
<i>dont stationnement: 400 véhicules.par.jour/50%année/2€ de commission</i>	0,1	2%
Immobilier	0,9	9%
<i>dont augmentation valeur immobilier: +2% - 30k contribuables - 1/14e revenu moyen</i>	0,9	9%
Recherche	0,1	1%
TOTAL	10	M€

Figure 71 : Tableau de données justifiant les 10 M€/an de revenus issus du multiusage – Source : SHF-GT Nouveau Marémoteur

8 BILAN ET RECOMMANDATIONS POUR LA FILIERE FRANÇAISE

8.1 Résumé des éléments clés d'analyse du marché international

La renaissance du marémoteur, ou plutôt du « nouveau marémoteur », fait écho à un foisonnement d'architectures nouvelles.

Aujourd'hui, les projets de référence sont ceux de la Rance (France) et de Siwha (Corée du Sud), et ne sont pas en mesure de répondre positivement et simultanément aux nouveaux enjeux économiques, sociaux et environnementaux.

A court terme, les perspectives de réinvestissement pourraient voir le jour rapidement si le projet de démonstrateur de Swansea Bay en Grande-Bretagne est lancé ; cette étape, sans être critique pour la filière, permettrait de confirmer le regain d'intérêt pour l'Europe, et plus largement des perspectives mondiales autour de 12 principaux pays et des projets de différentes maturités.

Au-delà de cet enjeu de relance, le moyen-long terme quant à lui fait état de perspectives favorables, avec un potentiel accessible de 20GW de puissance nouvelle d'ici à l'horizon 2035-2040.

Ces perspectives sont jugées crédibles par le GT et surtout accessibles sur les plans technique, juridique, environnemental, social et économique.

Pour cela, il semble nécessaire de considérer les nouveaux projets de marémoteur non plus comme des projets énergétiques, mais de véritables projets de territoire permettant de répondre favorablement et de façon globale à des enjeux de politique énergétique, sociale, économique et environnementale.

8.2 Bilan sur les conditions de réalisation spécifiques d'ordre socio-économique des nouveaux projets marémoteurs

Pour une filière économiquement viable, des conditions de réalisation sont nécessaires en plus d'autres leviers aujourd'hui bien identifiés sur l'ensemble des projets EMR (*acceptabilité, zonage, identification des meilleurs potentiels, génération d'impacts économiques...*) :

- Prioriser les projets à grande échelle : de 1GW à 3GW les projets gagnent significativement en attractivité jusqu'à presque pouvoir compter sur la seule vente d'électricité pour atteindre les seuils d'attractivité économiques spécifiques à ce type de projets (le prix d'achat devant systématiquement ne pas dépasser le seuil des 100€/MWh).
- Adapter la finance au projet par deux leviers :
 - L'ingénierie financière : TRI projet inférieur à 5%, innovations de financement (crowdfunding, green bonds), garanties et fonds publics, ...
 - Montages commerciaux : tarifs d'achat préférentiel de l'électricité, subsides, contrats de différence... entre 80 et 100€/MWh.

- Recourir au multiusage avec un effort particulier sur l'aquaculture avec des réflexions pour des projets à grande échelle.
- Valoriser les externalités du projet en termes de bénéfices écologiques (protection du trait de côte, bilan carbone) et d'emplois (> 500 emplois directs pérennes et non délocalisables).

8.3 Recommandations de stratégie et feuille de route nationale

Afin de positionner la France et ses acteurs de façon favorable devant les perspectives de marché identifiées, le GT identifie comme élément de premier plan l'élaboration d'un Plan Stratégique en France, dont le contenu viserait *a minima* :

- L'évaluation de la pertinence de lancer un programme pilote ou projet de démonstration dont la puissance serait déjà significative (>350MW) ;
A noter que les travaux du GT ont permis d'identifier plusieurs conditions de réalisation non réunies à ce stade pour ce type de projets dits « intermédiaires », mais il reste nécessaire selon les mêmes auteurs de lancer d'autres analyses d'approfondissement pour définitivement l'écarter, ou au contraire nuancer certains éléments jugés aujourd'hui trop risqués (notamment au niveau des coûts complets de production de l'électricité produite).
- La définition complète des conditions de développement d'un ou deux grands projets de territoires multi-usages, et dont la puissance électrique dépasserait le GW installée ;
- L'étude approfondie des solutions de stockage d'énergie adaptées à ce type d'ouvrages.

Pour mener à bien une véritable stratégie de filière, le GT recommande d'intégrer au sein d'une feuille de route nationale les étapes suivantes :

- **Horizon 2020-2021** : zonages et pré-qualifications de données de bases en Normandie ou Hauts-de-France (les deux régions identifiées comme les plus attractives en France), avec deux points d'ancrage et de vigilance :
 - Les travaux constitutifs des Documents Stratégiques de Façade (DSF) : zonage spatiale et risques de fermeture des zones planifiées comme les plus pertinentes.
 - Les travaux constitutifs de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE 2018 – 2028) : planification énergétique et risque de décalage entre les puissances identifiées comme viables à termes dans les EMR avec la taille des ouvrages envisagés ici (> 1GW).
- **Horizon 2021-2025** : engagement du développement d'un ou plusieurs projets pilotes ou projets « pré-commerciaux » d'au moins 350 MW de puissance installée, et plus généralement de taille adaptée au territoire étudiée.
- **Horizon 2025-2030** (ou avant si renoncement aux projets de taille intermédiaire) : engagement du développement d'un grand projet de territoire (voire deux) supérieur au GW de puissance.

Cette vision stratégique et sa mise en œuvre repose sur l'engagement d'une force de soutien politique claire et assumée, tant au niveau national que régional ; et ceci afin de repositionner le nouveau marémoteur comme un projet de territoire qui dépasse le seul cadre de la transition énergétique.

Ce soutien représentera une condition préalable à l'acceptabilité des populations et à la saisie des enjeux industriels par les acteurs privés.