



# Schéma Régional des Energies de la Mer 2018

Quel développement des énergies marines renouvelables pour la Réunion ?

Rédigé par :



Contrat n°DEECB/20180219

Schéma Régional des Energies Marines de la Réunion :

Rapport final phase 1 + phase 2 v5	15/10/2019		Reprise cartos.
Rapport final phase 1 + phase 2 v4	19/09/2019		Rémy Durand, Laurent Bridier
Rapport final phase 1 + phase 2 v3	03/09/2019		Rémy Durand, Laurent Bridier
Rapport final phase 1 + phase 2 v2	02/08/2019		Rémy Durand
Rapport final phase 1 + phase 2 v1	01/08/2019		Rémy Durand, Laurent Bridier
Rapport phase 1 + phase 2 v0	16/04/2019		Elodie Soundrom
Trame de rapport phase 2	19/12/2018		Elodie Soundrom
Rapport phase 1 v1 révisé	19/10/2018		Rémy Durand, Laurent Bridier
Rapport phase 1 v0	06/07/2018	Bérénice DIAZ	Pierre-Yves Ezavin
<b>Version</b>	<b>Date</b>	<b>Rédaction</b>	<b>Validation</b>

# Sommaire

<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>I</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>IV</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>V</b>
<b>GLOSSAIRE ET ABREVIATIONS</b> .....	<b>IX</b>
<b>SYNTHESE NON TECHNIQUE</b> .....	<b>11</b>
<b>CONTEXTE / PREAMBULE</b> .....	<b>13</b>
<b>1. ETAT DES LIEUX DE L'EXISTANT</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1. Etat de l'art des technologies et des projets énergies marines dans le monde</b> .....	<b>14</b>
1.1.1. Préambule : les énergies marines renouvelables, un secteur dynamique et foisonnant.....	14
a) Les centres de test, une activité en plein boom.....	14
b) Centres d'essais énergies marines en France.....	14
c) A la Réunion .....	15
1.1.2. Energie de la houle.....	15
a) Qu'est-ce que l'énergie houlomotrice ?.....	15
b) Ressource minimale nécessaire pour l'exploitation de la houle.....	17
c) Différents systèmes de conversion d'énergie .....	19
d) Une multitude de familles technologiques .....	21
e) Quelques exemples de réalisations.....	24
f) Conclusion et perspectives .....	27
1.1.3. Energie des courants marins ou énergie hydrolienne .....	28
a) Qu'est-ce que l'énergie hydrolienne ?.....	28
b) Ressource minimale nécessaire pour l'exploitation des courants marins.....	29
c) Quelle différence avec l'énergie marémotrice ? .....	29
d) Cinq grandes familles de technologies hydroliennes .....	30
e) Quelques exemples de réalisations.....	30
f) Conclusion et perspectives .....	33
1.1.4. Eolien en mer.....	34
a) Le vent : une ressource plus importante en mer qu'à terre .....	34
b) Ressource minimale en vent pour l'éolien en mer.....	34
c) Eoliennes posées ou éoliennes flottantes .....	34
d) Etat de l'art de l'éolien flottant .....	36
e) Situation en France .....	39
f) Conclusion et perspectives .....	39
1.1.5. Energie thermique des mers .....	40
a) Production d'électricité.....	40
b) Production d'eau douce .....	46
c) Production de froid (et/ou de chaud) .....	47
d) La valorisation commerciale de l'eau froide profonde, un moyen de rentabiliser des équipements à visée énergétique .....	53
e) Conclusion et perspectives.....	58
1.1.6. Energie osmotique .....	58
a) Qu'est-ce que l'énergie osmotique ?.....	58
b) Etat de l'art .....	60

c)	Conclusion et perspectives.....	62
1.1.7.	Stations de pompage-turbinage marines.....	62
a)	Principe.....	62
b)	Etat de l'art.....	63
c)	Autres techniques de stockage d'énergie en mer.....	64
d)	Conclusion et perspectives.....	65
1.1.8.	Eléments de coûts.....	65
a)	Coût du houlomoteur.....	66
b)	Coût de l'éolien en mer flottant.....	66
c)	Coût de l'énergie thermique des mers pour la production électrique.....	66
d)	Coût de l'énergie thermique des mers pour la production de froid.....	67
f)	Conclusion et perspectives.....	68
1.1.9.	Aspects environnementaux.....	69
a)	Principaux effets potentiels des énergies marines sur l'environnement.....	69
b)	Limites de la démarche d'évaluation des impacts.....	69
<b>1.2.</b>	<b>Etat des lieux à la Réunion.....</b>	<b>71</b>
1.2.1.	Données d'entrée disponibles et organismes de référence.....	71
a)	Données météo-océaniques.....	71
b)	Données qualité de l'eau.....	72
c)	Données de bathymétrie et géomorphologie.....	75
d)	Données écologiques.....	75
e)	Synthèse – données disponibles.....	76
1.2.2.	Principales caractéristiques du territoire réunionnais au regard des énergies marines renouvelables.....	77
a)	Un environnement contraint.....	77
b)	Une île dont les activités économiques liées à la mer sont minoritaires.....	83
c)	Une production électrique à 34% de renouvelable.....	88
d)	Le contexte réglementaire applicable aux projets énergies marines.....	94
e)	Synthèse – le contexte réunionnais.....	96
1.2.3.	Historique des projets menés à la Réunion.....	97
a)	Aperçu des projets.....	97
c)	Synthèse du précédent SREMER 2009.....	98
d)	Projets menés à la Réunion sur le houlomoteur.....	100
e)	Projets menés à la Réunion sur l'hydrolien.....	105
g)	Projets menés à la Réunion sur l'éolien en mer.....	106
h)	Projets menés à la Réunion sur l'énergie thermique des mers.....	107
i)	Projets menés à la Réunion sur l'énergie osmotique.....	113
j)	Carte de synthèse des études et des projets.....	113
k)	Retour d'expérience et bilan de consultation.....	116
l)	Synthèse – historique des projets à la Réunion.....	117
1.2.4.	Synthèse du gisement potentiel d'énergies marines connu et identifié.....	118
a)	Eolien en mer flottant : un potentiel de quelques centaines de mégawatts.....	118
b)	Un potentiel houlomoteur intéressant sur la moitié Sud de l'île.....	121
c)	Des courants marins à priori trop faibles pour l'hydrolien.....	125
d)	Des marées de trop faible amplitude pour être exploitées.....	127
e)	Energie thermique des mers : un potentiel connu et reconnu.....	128
f)	Un potentiel d'énergie osmotique certain, mais pour plus tard.....	128
g)	Synthèse – gisement potentiel.....	130
<b>1.3.</b>	<b>Conclusion partie 1 : les pistes à creuser pour la Réunion.....</b>	<b>131</b>
1.3.1.	Energie de la houle : de nouveaux concepts pour relancer la filière ?.....	131
a)	Les systèmes implantés à terre sur une côte rocheuse basse.....	131
b)	Systèmes intégrés à un ouvrage côtier.....	132
c)	Les systèmes en mer.....	133
1.3.2.	Energie éolienne en mer : envisageable mais sous conditions.....	134
a)	Les Puffins et Pétrels, des espèces à fort enjeux écologiques.....	134
b)	Des zones potentielles situées sur des corridors de vol d'oiseaux marins.....	136
d)	Un impact à quantifier.....	137

1.3.3.	Energie thermique des mers : plus qu'une source d'énergie, un levier de développement à l'échelle d'un territoire .....	138
1.3.4.	Synthèse – énergies marines exploitables à la Réunion.....	139
<b>2.</b>	<b>ETUDE STRATEGIQUE SUR LES EMR LES PLUS INTERESSANTES POUR LA REUNION.</b>	<b>140</b>
<b>2.1.</b>	<b>Zones propices identifiées.....</b>	<b>140</b>
2.1.1.	Eolien en mer flottant .....	140
2.1.2.	Energie thermique des mers .....	142
2.1.3.	Energie de la houle.....	145
a)	Zones propices aux systèmes houlomoteurs implantés en pleine mer .....	145
b)	Zones propices aux systèmes houlomoteurs implantés sur le trait de côte.....	147
c)	Synthèse - zones propices énergie de la houle .....	148
<b>2.2.</b>	<b>Stratégie de développement.....</b>	<b>148</b>
2.2.1.	Analyse Forces/Faiblesses/Opportunités/Freins ou menaces.....	148
2.2.3.	Discussions thématiques et approfondissement.....	150
a)	Synergies de développement avec d'autres projets .....	150
b)	Acteurs.....	153
c)	Procédures de sélection de partenaires et de financement.....	160
2.2.4.	Objectifs et feuille de route .....	162
2.2.5.	Orientations et propositions d'actions.....	163
2.2.6.	Détail des actions .....	166
a)	Actions de planification .....	166
b)	Actions de communication .....	168
c)	Actions de lobbysime et de réseau.....	170
d)	Actions de veille .....	173
e)	Actions d'étude .....	174
f)	Projets à lancer.....	176
<b>2.3.</b>	<b>Conclusion partie 2 : les défis à relever .....</b>	<b>179</b>
	<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>180</b>
	<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>I</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>II</b>
	<b>ANNEXES .....</b>	<b>XII</b>

## Liste des tableaux

TABLEAU 1 : TECHNOLOGIES HOULOMOTRICES DE STADE AVANCE .....	25
TABLEAU 2 : TECHNOLOGIES HYDROLIENNES DE STADE AVANCE .....	31
TABLEAU 3 : EOLIENNES FLOTTANTES DE STADE AVANCE .....	36
TABLEAU 4 : CLASSES DE TURBINES EOLIENNES SUIVANT LES CONDITIONS DE VENT (D'APRES IEC 61400-1 EDITION 2016) .....	38
TABLEAU 5 : CLASSIFICATION DES DEPRESSIONS, TEMPETES ET CYCLONES TROPICAUX (METEO FRANCE).....	38
TABLEAU 6 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UN CYCLE OUVERT PAR RAPPORT AUX CYCLES FERMES.....	41
TABLEAU 7 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU CYCLE DE RANKINE.....	42
TABLEAU 8 : PERFORMANCE DES CYCLES THERMODYNAMIQUES. SOURCE : D'APRES P. MARCHAND, 1984. ....	46
TABLEAU 9 : CARACTERISTIQUES DE SWAC EXISTANTS SUR EAU DE MER.....	49
TABLEAU 10 : ESTIMATIONS DES COUTS DE L'ENERGIE DE LA HOULE, DU COURANT ET DE L'ENERGIE THERMIQUE DES MERS. SOURCE : OCEAN ENERGY SYSTEM 2015 .....	65
TABLEAU 11 : ORDRES DE GRANDEUR DES COUTS DES DIFFERENTS TYPES D'ENERGIES MARINES .....	68
TABLEAU 12 : LISTE DES DONNEES LOCALES IN SITU.....	71
TABLEAU 13 : FREQUENCE ET PERIODICITE MINIMUM DU CONTROLE DE SURVEILLANCE DCE (EN ITALIQUE : FREQUENCE ET PERIODICITE ADAPTEES). SOURCE : ROPERT ET. AL. 2012 .....	73
TABLEAU 14 : PRINCIPAUX EFFETS POTENTIELS PAR TYPE D'ENERGIE MARINE.....	81
TABLEAU 15 : HAUTEUR MOYENNE DE LA HOULE AUSTRALE POUR DIFFERENTES PERIODES DE RETOUR. SOURCE : BCEOM 2007. ....	82
TABLEAU 16 : STATISTIQUES DE HOULE CYCLONIQUE POUR DIFFERENTES PERIODES DE RETOUR. SOURCE : BCEOM 2007. .....	83
TABLEAU 17 : COUTS DE L'ELECTRICITE A LA REUNION PAR FILIERE EN 2013. SOURCE : PPE 2016-2023.....	90
TABLEAU 18 : RUBRIQUES DE LA NOMENCLATURE POUR L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE POTENTIELLEMENT VISEES POUR LES PROJETS D'ENERGIE MARINE (ANNEXE A L'ARTICLE R122-2 DU CODE DE L'ENVIRONNEMENT, MODIFIE PAR DECRET N°2018-435 DU 4 JUIN 2018 - ART. 1) .....	95
TABLEAU 19 : RUBRIQUES DE LA NOMENCLATURE LOI SUR L'EAU (ARTICLE R214-1 DU CODE DE L'ENVIRONNEMENT, MODIFIE PAR DECRET N°2017-81 DU 26 JANVIER 2017 - ART. 3).....	96
TABLEAU 20 : LISTE DES PROJETS EMR MENES A LA REUNION .....	97
TABLEAU 21 : POTENTIEL ENERGETIQUE DE LA HOULE AU LARGE DE LA REUNION CALCULE SUR 10 ANS DE DONNEES. SOURCE : ARER 2003.....	100
TABLEAU 22 : SITES POTENTIELS POUR L'EOLIEN EN MER FLOTTANT IDENTIFIES EN 2015 PAR LA SPL ENERGIES REUNION .....	106
TABLEAU 23 : OISEAUX MARINS PROTEGES A LA REUNION. SOURCE : SEOR .....	135
TABLEAU 24 : DISPOSITIFS DE FINANCEMENT DU PROGRAMME HORIZON 2020 .....	155
TABLEAU 25 : MAITRES D'OUVRAGE POTENTIELS POUR DES PROJETS HOULOMOTEURS INTEGRES SUR OUVRAGES COTIERS .....	159
TABLEAU 26 : POTENTIEL ET OBJECTIFS PROPOSES POUR LA REUNION PAR FILIERE D'ENERGIE MARINE.....	163

## Liste des figures

FIGURE 1 : CENTRALE HOULOMOTRICE INTEGREE DE MUTRIKU, ESPAGNE (SOURCE : THE CLIMATE GROUP).....	13
FIGURE 2 : ORIGINE DE LA HOULE. SOURCE : SHOM.....	15
FIGURE 3 : MOUVEMENTS DES PARTICULES D’EAU ET PROPAGATION D’UNE ONDE SOURCE : BANQUE D’IMAGE AQUARET..	16
FIGURE 4 : MOUVEMENTS DES PARTICULES D’EAU ET DEFERLEMENT A LA COTE. SOURCE : BANQUE D’IMAGE AQUARET ....	16
FIGURE 5 : EXEMPLE DE PLAGE DE FONCTIONNEMENT D’UNE MACHINE HOULOMOTRICE SELON LA HAUTEUR (ORDONNEE) ET LA PERIODE (ABSCISSE) DE LA HOULE. SOURCE : PLAQUETTE DRAKOO 10 kW DE HAHN OCEAN DU 01-2018. ....	17
FIGURE 6 : PRINCIPE DE CALCUL DU PRODUCTIBLE D’UN PROJET HOULOMOTEUR. CROISEMENT DE LA MATRICE DES OCCURRENCES (AUSSI APPELE CORRELOGRAMME) DU SITE AVEC LA MATRICE DE PUISSANCE DE LA MACHINE. SOURCE : A. BABARIT – ECOLE CENTRALE DE NANTES – 2016.....	18
FIGURE 7 : PRINCIPE DES SYSTEMES DE CONVERSION HYDRAULIQUE DE L’ENERGIE HOULOMOTRICE – TURBINE A EAU.....	19
FIGURE 8 : EXEMPLE DE REALISATION, LA TECHNOLOGIE CETO. SOURCE : CARNEGIE WAVE ENERGY.....	19
FIGURE 9 : PRINCIPE DES SYSTEMES DE CONVERSION HYDRAULIQUE DE L’ENERGIE HOULOMOTRICE – TURBINE A AIR.....	20
FIGURE 10 : EXEMPLE DE REALISATION, LA TECHNOLOGIE LIMPET. SOURCE : THE OPEN UNIVERSITY.....	20
FIGURE 11 : PRINCIPE DES SYSTEMES DE CONVERSION DIRECTE DE L’ENERGIE HOULOMOTRICE EN ENERGIE ELECTRIQUE....	21
FIGURE 12 : EXEMPLE DE REALISATION, LES TECHNOLOGIES SEABASED ET PENGUIN. SOURCE : SEABASED AB ET WELLO OY .....	21
FIGURE 13 : CLASSEMENT DES SYSTEMES HOULOMOTEURS SELON LA DISPOSITION A LA DIRECTION DE LA HOULE (D’APRES HAKIM MOUSLIM, ECOLE CENTRALE DE NANTES) .....	21
FIGURE 14 : CLASSEMENT DES SYSTEMES HOULOMOTEURS SELON LE TYPE DE MECANISME. SOURCE : BANQUE D’IMAGE AQUARET, UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON, WAVEDRAGON .....	22
FIGURE 15 : DIFFERENTES PRESENTATIONS DE SYSTEMES HOULOMOTEURS REPOSANT SUR LA TECHNOLOGIE DE LA COLONNE D’EAU OSCILLANTE (OWC EN ANGLAIS : OSCILLATING WATER COLUMN).....	23
FIGURE 16 : CENTRALE DE MUTRIKU DE 296 kW (ESPAGNE) ET DE BUKCHON, ILE DE JEJU, 135 kW (COREE DU SUD) ....	26
FIGURE 17 : DEMONSTRATEUR ECOWAVE POWER 10 kW A GIBRALTAR (ESPAGNE) ET WAVESTAR 600 kW A HANSTHOLM (DANEMARK) .....	26
FIGURE 18 : PROTOTYPE P37 FLOATING POWER PLANT DE 33 kW VENT + 50 kW HOULE (DANEMARK) ET UNE DES 3 UNITES DE 100 kW INSTALLE SUR L’ILE DE SHENGSHAN (CHINE).....	26
FIGURE 19 : SYSTEME « VOLTA » DE POLYGEN LTD (GRANDE BRETAGNE) ET PROTOTYPE ECHELLE ½ « MWAVE » DE BOMBORA WAVE POWER (AUSTRALIE) .....	27
FIGURE 20 : BOUEE « PENGUIN » WELLO OY (FINLANDE) DE 500 kW EN ECOSSE ET « UNDIGEN W200 » WEDGE GLOBAL (ESPAGNE) DE 200 kW AUX CANARIES.....	27
FIGURE 21 : EXEMPLE DE COURBES PUISSANCE/VITESSE D’HYDROLIENNES : CENTRALE D’ULDOLMOK EN COREE DU SUD, DE 1,5 MW DE PUISSANCE NOMINALE TOTALE (A GAUCHE), ET HYDROLIENNE EXPERIMENTALE TESTEE EN CHINE, AVEC UNE PLAGE DE FONCTIONNEMENT CIBLEE SUR DES VITESSES PLUTOT FAIBLES, CE QUI N’EST PAS LE CAS LE PLUS COURANT (A DROITE). SOURCES : KIOST 2017, XU ET AL. 2015. ....	29
FIGURE 22 : FAMILLES DE SYSTEMES HYDROLIENS. SOURCE : SYNDICAT DES ENERGIES RENOUVELABLES / BANQUE D’IMAGE AQUARET.....	30
FIGURE 23 : HYDROLIENNE ANDRITZ HYDRO HAMMERFEST 1,5 MW ET HYDROLIENNE ATLANTIS RESSOURCE 1,5 MW ..	32
FIGURE 24 : BARGES HAINENG III D’UNE PUISSANCE TOTALE DE 600 kW (CHINE) ET CENTRALE HYDROLIENNE D’ULDOLMOK DE 1,5 MW EN COREE DU SUD.....	32
FIGURE 25 : HYDROLIENNE OPEN HYDRO 2 MW INSTALLEE EN BAIE DE FUNDY, CANADA, ET HYDROLIENNE SABELLA 1,1 MW .....	33
FIGURE 26 : HYDROLIENNE FLUMILL (NORVEGE) ET HYDROLIENNE A AILE PORTANTE SEAPOWER DE 100 kW (ITALIE)...	33
FIGURE 27 : FONDATIONS OFFSHORE CLASSIQUES. SOURCE : EWEA 2013 .....	34
FIGURE 28 : DISTANCE A LA COTE ET PROFONDEUR MOYENNE DES PARCS EOLIENS EN MER EUROPEENS EN SERVICE, PAR PAYS (SAUF EOLIENNES FLOTTANTES EN TEST), A GAUCHE : PAR PAYS, A DROITE : PAR ANNEE. SOURCE : FRAUNHOFER INSTITUTE FOR WIND ENERGY AND ENERGY SYSTEM TECHNOLOGY .....	34
FIGURE 29 : BATHYMETRIE AUTOUR DE LA REUNION.....	35
FIGURE 30 : VISIBILITE DU PARC EOLIEN DE SCROBY SANDS DEPUIS LA COTE. CREDITS : LYNN LODGE 2011 .....	35
FIGURE 31 : TYPES DE PLATEFORME FLOTTANTE POUR EOLIENNE EN MER. SOURCE : EWEA 2013 .....	36
FIGURE 32 : PARC EOLIEN EN MER FLOTTANT DE 30 MW A BUCHAN DEEP, ECOSSE, INAUGURE EN 2017. CREDITS : STATOIL HYDRO .....	37
FIGURE 33 : A GAUCHE, EOLIENNE FLOTTANTE « FLOATGEN » EN REMORQUAGE EN 2018 A SAINT-NAZAIRE. CREDITS : IDEOL – A DROITE, EOLIENNE FLOTTANTE « WINDFLOAT 1 » AU PORTUGAL. CREDITS : PRINCIPLE POWER INC. ....	37
FIGURE 34 : FUKUSHIMA MIRAI (2 MW-2013) ET FLOTTEUR DE FUKUSHIMA SHIMPUU SANS LA TURBINE (7 MW-2015). CREDITS : FUKUSHIMA OFFSHORE WIND CONSORTIUM.....	38

FIGURE 35 : FUKUSHIMA HAMAKAZE (5 MW-2016) ET EOLIENNE DE GOTO (2 MW-2015). CREDITS : FUKUSHIMA OFFSHORE WIND CONSORTIUM & GOTO FOWT .....	38
FIGURE 36 : SCHEMA DE PRINCIPE DU PROCEDE DE PRODUCTION D'ELECTRICITE ETM EN CYCLE OUVERT.....	41
FIGURE 37 : SCHEMA DE PRINCIPE DU PROCEDE DE PRODUCTION D'ELECTRICITE ETM EN BOUCLE FERMEE, SELON LE CYCLE DE RANKINE .....	42
FIGURE 38 : BARGE ETM "MINI-OTEC" AU LARGE D'HAWAII EN 1979. SOURCE : YEE PRECAST DESIGN GROUP LTD.....	43
FIGURE 39 : TIMBRES SUR LA CENTRALE ETM SUR L'ILE DE NAURU, 1982. SOURCE : LUIS VEGA.....	43
FIGURE 40 : CENTRALE ETM EN CYCLE OUVERT A HAWAII. SOURCE : LUIS VEGA, NELHA. ....	44
FIGURE 41 : CENTRALE PILOTE ETM DE 20 kW EN COREE DU SUD (2013). SOURCE : KRISO.....	44
FIGURE 42 : CENTRALE PILOTE ETM DE 100 kW A OKINAWA (2013). SOURCE : UNIVERSITE DE SAGA.....	45
FIGURE 43 : CENTRALE PILOTE ETM DE 100 kW DU NELHA CONNECTEE AU RESEAU (2015). SOURCE : MAKAI OCEAN ENGINEERING.....	45
FIGURE 44 : CENTRALE THERMIQUE DE DESALINISATION A BASSE TEMPERATURE DE KAVARATTI, LA CAPITALE DE L'ARCHIPEL DE LAKSHADWEEP, AU LARGE DES COTES SUD-OUEST DE L'INDE. SOURCE : NIOT. ....	47
FIGURE 45 : SCHEMA DE LA CLIMATISATION A L'EAU DE MER PROFONDE (SWAC). SOURCE : D'APRES UN SCHEMA DE MAKAI OCEAN ENGINEERING. ....	48
FIGURE 46 : PRINCIPE DE LA POMPE A CHALEUR MARINE.....	50
FIGURE 47 : CENTRALE DE GEOTHERMIE MARINE « THASSALIA » A MARSEILLE. SOURCE : ENGIE.....	51
FIGURE 48 : SCHEMA DE PRINCIPE DU SYSTEME D'HYDROMARETHERMIE.....	52
FIGURE 49 : ECHANGEUR SONDE IMMERGE DU SYSTEME NEREE.....	52
FIGURE 50 : POSSIBILITE DE COGENERATION AVEC L'EAU DE MER PROFONDE ET L'ENERGIE THERMIQUE DES MERS.....	53
FIGURE 51 : CULTURE DE RAISIN ISABELLE AU NELHA, HAWAII (© DEWPOINT), CULTURE D'EPINARDS A KUME, OKINAWA, JAPON ET CULTURE HYDROAPONIQUE DE LAITUES A HANEDA, TOKYO (© ESPEC CORP.) .....	56
FIGURE 52 : EQUIPEMENTS D'EXTRACTION DU LITHIUM DE L'EAU DE MER PROFONDE A L'UNIVERSITE DE SAGA AU JAPON, SOLUTION DE CHLORURE DE LITHIUM ET PRECIPITE SEC OBTENUS AU BOUT DE 150 JOURS D'OPERATION. SOURCE : Y. IKEGAMI - IOES, 2015. ....	57
FIGURE 53 : PRINCIPE DU PROTOTYPE D'UPWELLING ARTIFICIEL JAPONAIS « TAKUMI ». SOURCE : PROFESSEUR OUCHI, UNIVERSITE DE TOKYO.....	57
FIGURE 54 : PRINCIPE DE L'ELECTRODIALYSE INVERSE. SOURCE : D'APRES REAPOWER.....	59
FIGURE 55 : SCHEMA DE LA PRESSION OSMOTIQUE (D'APRES AIMAR P. ET AL., 2010).....	60
FIGURE 56 : PRINCIPE DE L'OSMOSE A PRESSION RETARDEE. SOURCE : D'APRES STATKRAFT ET AFP.....	60
FIGURE 57 : CENTRALE PILOTE (50 kW) D'ENERGIE OSMOTIQUE PAR ELECTRODIALYSE INVERSE AUX PAYS-BAS. SOURCE : REDSTACK.....	61
FIGURE 58 : CENTRALE PILOTE D'ENERGIE OSMOTIQUE DU SALIN D'ETTORE-INFERSA, MARSALA, ITALIE. SOURCE : TEDESCO ET AL. 2016 .....	61
FIGURE 59 : CENTRALE PILOTE D'ENERGIE OSMOTIQUE PAR PRESSION RETARDEE EN NORVEGE. SOURCE : STATKRAFT .....	62
FIGURE 60 : STEP LITTORALE A TERRE (© EDF SEI), ATOLL ARTIFICIEL (© ECOREM), STEP EN MER (© BUOYANT-ENERGY.COM).....	63
FIGURE 61 : STEP MARINE D'OKINAWA.....	63
FIGURE 62 : PROJET DE STEP MARINE STENSEA, CONCEPT ET PROTOTYPE ECHELLE 1/10 <sup>E</sup> . SOURCE : FRAUNHOFER IWES .....	64
FIGURE 63 : STOCKAGE D'ENERGIE SOUS FORME D'AIR COMPRIE A TORONTO.....	64
FIGURE 64 : SYNTHESE DES EFFETS POTENTIELS DES ENERGIES MARINES SUR L'ENVIRONNEMENT(B. DIAZ 2012).....	70
FIGURE 65 : TYPOLOGIE DES MASSES D'EAU COTIERES DCE. LE 5 <sup>E</sup> TYPE N'EST PAS REPRESENTE A CETTE ECHELLE, IL S'AGIT DES MASSES D'EAU RECIFALES.....	73
FIGURE 66 : MASSES D'EAUX COTIERES ET RESEAU DE SUIVI PHYSICO-CHIMIE DCE.....	74
FIGURE 67 : PRINCIPAUX PROCESSUS DE TRANSFERT DES SEDIMENTS VOLCANOCLASTIQUES DANS LE DOMAINE PROFOND : A) ECOULEMENT EN DOMAINE SOUS-MARIN B) CONTINUTE DIRECTE EN MER DES ECOULEMENTS VOLCANIQUES FORMES A TERRE C) TRANSFERT EN MER DES SEDIMENTS PAR LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE TERRESTRE. SISAVATH 2011, MODIFIE D'APRES BABONNEAU 2002. ....	77
FIGURE 68 : ZONAGES REGLEMENTAIRES ENVIRONNEMENTAUX LE LONG DU LITTORAL REUNIONNAIS .....	79
FIGURE 69 : EMPRISE DES ZNIEFF MARINES ET LITTORALES.....	80
FIGURE 70 : SYNTHESE DU REGIME DES HOULES A LA REUNION (D'APRES GABRIE, 1984, PRECISE PAR LES RESULTATS D'HYDRORUN) (P = PERIODE ; H = HAUTEUR).....	82
FIGURE 71 : VOCATION DES ESPACES DU GRAND PORT MARITIME DE LA REUNION D'APRES LE PROJET STRATEGIQUE 2014-2028.....	84
FIGURE 72 : INFRASTRUCTURES PORTUAIRES DE L'ILE. SOURCE : D'APRES L'ATLAS POLMAR 2012 MODIFIE. ....	85
FIGURE 73 : REPARTITION ET EVOLUTION DE LA PECHE REUNIONNAISE SUIVANT LA ZONE DE CAPTURE ET LE TONNAGE CAPTURE. SOURCE : IEDOM 2017 .....	86

FIGURE 74 : REPARTITION DES NAVIRES DE PECHE PROFESSIONNELS PAR PORT DE PECHE PRINCIPAL ET PAR RAYON D'ACTION EN 2017. SOURCE : SYSTEME D'INFORMATION HALIEUTIQUE DE L'IFREMER, 2018. ....	86
FIGURE 75 : ACTIVITE DANS LES ZONES DE PECHE COTIERE EN MOIS.NAVIRES PAR ZONE DE PECHE (SECTEURS REPRESENTES : 0-3 MILLES, 3-12 MILLES ET 12-20 MILLES). SEULES LES DEUX PRINCIPALES ZONES DE PECHE PAR METIER ET PAR MOIS DU NAVIRE SONT PRISES EN COMPTE POUR LE CALCUL. SOURCE : SOURCE : SYSTEME D'INFORMATION HALIEUTIQUE DE L'IFREMER, 2018.....	87
FIGURE 76 : PRODUCTION ELECTRIQUE TOTALE PAR TYPE D'ENERGIE EN 2016. SOURCE : OER 2017 .....	88
FIGURE 77 : PARC DE PRODUCTION ELECTRIQUE ET RESEAU DE DISTRIBUTION HTB. SOURCE : EDF SEI 2017.....	89
FIGURE 78 : SITES POTENTIELS POUR LA HOULE A LA COTE (ON SHORE), COTIERE (NEAR SHORE) ET AU LARGE (OFFSHORE). SOURCE : SREMER 2009. ....	98
FIGURE 79 : SITES POTENTIELS POUR LES COURANTS. SOURCE : SREMER 2009. ....	99
FIGURE 80 : SITES POTENTIELS POUR L'ENERGIE THERMIQUE DES MERS A LA COTE (ON SHORE). SOURCE : SREMER 2009. ....	99
FIGURE 81 : ZONE D'ETUDE DU POTENTIEL OFFSHORE. SOURCE : ARER 2003.....	100
FIGURE 82 : LOCALISATION DU PROJET SEAWATT A SAINT-PIERRE. SOURCE : SEAWATT.....	101
FIGURE 83 : MACHINE PELAMIS DE 2 <sup>e</sup> GENERATION EN ECOSSE. SOURCE : EMEC.....	101
FIGURE 84 : REMORQUAGE DU FLOTTEUR DU PROTOTYPE CETO AU PORT-OUEST / VUE D'ENSEMBLE DU SYSTEME CETO 4E GENERATION DEPLOYE A LA REUNION. SOURCE : EDF EN.....	102
FIGURE 85 : MAILLAGES ET EMPRISES DU MODELE GROSSIER ET DU MODELE RAFFINE D'ETAT DE MER DEVELOPPE PAR EDF EN POUR LE PROJET « HOULE AUSTRALE » (A GAUCHE) ET VUE DU MODELE RAFFINE SUR LA ZONE DE PROJET (A DROITE). SOURCE : EDF EN 2009.....	103
FIGURE 86 : ESTIMATION DU POTENTIEL HOULOMOTEUR AUTOUR DE LA REUNION. SOURCE : SPL ER 2010.....	104
FIGURE 87 : DE GAUCHE A DROITE, TECHNOLOGIES HOULOMOTRICES LIMPET, SDE, SSG.....	104
FIGURE 88 : SITE ENVISAGE POUR UN PROJET HOULOMOTEUR INTEGRE SUR DIGUE, LA CALE DE HALAGE A LA MARINE DE SAINT-PHILIPPE, VERSION ACTUELLE EN HAUT, VERSION PROJET SECURISEE (SANS DISPOSITIF HOULOMOTEUR) EN BAS. SOURCE : EGIS 2010.....	105
FIGURE 89 : ZONES POTENTIELLES POUR L'EOLIEN EN MER FLOTTANT IDENTIFIEES EN 2015 PAR LA SPL ENERGIES REUNION .....	106
FIGURE 90 : PLAN D'ECHANTILLONNAGE DES PRELEVEMENTS D'EAU PROFONDE AU LARGE DE LA VILLE DU PORT (D'APRES CARTE SHOM).....	108
FIGURE 91 : CIRCUIT DE SWAC ET D'IRRIGATION AU PORT A PARTIR DE L'ATERRAGE DE LA POINTE DES GALETS (ATT 2) .....	108
FIGURE 92 : PLAN D'ECHANTILLONNAGE DES PRELEVEMENTS D'EAU PROFONDE AU LARGE DE LA VILLE DE SAINTE-ROSE (D'APRES CARTE SHOM).....	109
FIGURE 93 : PLAN DU RESEAU URBAIN DE CLIMATISATION DU SWAC NORD DU SIDEO. SOURCE : CLIMABYSS AVRIL 2012. ....	110
FIGURE 94 : PROJET DE POLE PORTUAIRE, INDUSTRIEL ET ENERGETIQUE DE BOIS-ROUGE. SOURCE : NAVAL ENERGIE.....	112
FIGURE 95 : ZONE D'IMPLANTATION POTENTIELLE D'UNE CENTRALE D'ENERGIE OSMOTIQUE A SAINTE-ROSE. SOURCE : ARER 2009. ....	113
FIGURE 96 : CARTOGRAPHIE DES ETUDES ENERGIES MARINES REALISEES A LA REUNION.....	114
FIGURE 97 : CARTOGRAPHIE DES PROJETS D'ENERGIES MARINES PASSES ET EN COURS A LA REUNION EN 2018.....	115
FIGURE 98 : ANTICYCLONE DES MASCAREIGNES ET ALIZES DANS LE SUD DE L'OCEAN INDIEN (METEO FRANCE). ....	118
FIGURE 99 : CIRCULATION DES ALIZES A L'APPROCHE DE LA REUNION - VENTS D'EST SUD-EST (METEO FRANCE). ....	118
FIGURE 100 : CIRCULATION DES ALIZES A L'APPROCHE DE LA REUNION - VENTS DE SUD-EST A GAUCHE, DE NORD-EST A DROITE. (SOURCE : METEO FRANCE) .....	119
FIGURE 101 : GISEMENT EOLIEN EN MER AU LARGE DE LA ZONE REUNION-MAURICE.....	119
FIGURE 102 : DESCRIPTION DES ETATS DE MER AUTOUR DE LA REUNION A PARTIR DES HOULOGRAPHES DU RESEAU CANDHIS (PROFONDEURS 20 A 35 M). DISTRIBUTION DES OCCURENCES DE COUPLES HAUTEUR SIGNIFICATIVE (Hs) / PERIODE SIGNIFICATIVE (Ts). LES OCCURENCES LES PLUS FAIBLES SONT EN BLEU, LES PLUS FORTES EN JAUNE. SOURCE : EMMANUEL CORDIER 2018. ....	121
FIGURE 103 : VARIABILITE MENSUELLE DE LA PUISSANCE DE LA HOULE A VINCENDO (ARER 2010). ....	122
FIGURE 104 : PUISSANCE ANNUELLE MOYENNE DE LA HOULE ENTRE SAINT-PIERRE ET MANAPANY. MODELE DE PROPAGATION NUMERIQUE A LA COTE NEREE. SOURCE : NEREE 2010.....	122
FIGURE 105 : PUISSANCE LINEIQUE (kW/M) DE LA HOULE EN MOYENNE ANNUELLE D'APRES LES DONNEES HYDRORUN (10 ANS D'ARCHIVES) ET LES ETUDES ARER, BCEOM ET EDF EN.....	124
FIGURE 106 : VITESSE MOYENNE ANNUELLE DU COURANT BAROTROPE AUTOUR DE LA REUNION. SOURCE : HYDRORUN ..	125
FIGURE 107 : REPARTITION DES DIRECTIONS ET VITESSES DES COURANTS MARINS PAR DIRECTION MESUREE EN 2009 DANS LA PASSE DE L'HERMITAGE A DEUX PROFONDEURS DIFFERENTES (3 M ET 27 M). SOURCE : PARETO .....	126

FIGURE 108 : ROSES DES COURANTS EN SURFACE ET AU FOND A LA POSSESSION ET AU LARGE DE SAINT-DENIS DE SEPTEMBRE 2014 A DECEMBRE 2015. SOURCE : ARTELIA-iXSURVEY, SUIVI DU CHANTIER DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL, 2016.....	127
FIGURE 109 : GISEMENT POTENTIEL D'ENERGIE THERMIQUE DES MERS POUR DE LA PRODUCTION ELECTRIQUE : DIFFERENCE DE TEMPERATURE FOND/SURFACE EN MOYENNE ANNUELLE.....	129
FIGURE 110 : SYSTEMES A COLONNE D'EAU OSCILLANTE : SHANWEI, PROVINCE DE GUANGDONG, CHINE, 100 kW – ILE D'ISLAY, ECOSSE, 500 kW (LIMPET) - ILE PICO, ARCHIPEL DES AÇORES, PORTUGAL, 700 kW.....	131
FIGURE 111 : SYSTEME A BRAS OSCILLANT SUR L'ILE DAGUAN, PROVINCE DE SHANDONG, CHINE - 100 kW – 2000 (WANG ET ALL. 2011).....	132
FIGURE 112 : SYSTEME "ECO WAVE POWER" DE 10 kW AU PORT DE GIBRALTAR (ESPAGNE) A GAUCHE, A DROITE AUTRE SYSTEME DU MEME TYPE DE 50 kW INSTALLE EN 2012 PAR L'UNIVERSITE DE RIO DE JANEIRO AU PORT DE PECEM (BRESIL).....	132
FIGURE 113 : CONCEPT DE DIGUE A SYSTEME HOULOMOTEUR INTEGRE DEVELOPPE PAR LE KRISO DANS LE CADRE DE RESEAUX INSULAIRES ISOLEE ET MICROGRID.....	133
FIGURE 114 : PETREL NOIR DE BOURBON ECHOUÉ AU SOL (GAUCHE), PETREL DE BARAU EN VOL (MILIEU), PUFFIN DU PACIFIQUE DANS UN TERRIER EN FALAISE (DROITE). CREDITS : MARTIN RIETHMULLER, CELLULE LIFE+PETREL (PETRELS) ET SEOR (PUFFIN).....	135
FIGURE 115 : FLUX D'OISEAUX MARINS SORTANTS DE L'ILE, DEDUITS DES DONNEES RADAR. PETREL DE BARAU A GAUCHE, PUFFIN DU PACIFIQUE A DROITE. SOURCE : B. GINESTE, 2016.....	136
FIGURE 116 : SUIVI GPS DE PUFFINS DU PACIFIQUE DE LA COLONIE DE PETITE-ILE. TRAJETS LONGS ET TRAJETS COURTS. EXTRAIT DU TRAVAIL ENCORE NON PUBLIE DE DANIELLE VAN DEN HEEVER, UNIVERSITE DE LA REUNION, EN COLLABORATION AVEC PIERRE PISTORIUS, NELSON MANDELA UNIVERSITY.....	136
FIGURE 117 : SUPERPOSITIONS POTENTIELLES ENTRE ENJEUX BIOLOGIQUES LIES AUX OISEAUX MARINS ET ENJEUX ENERGETIQUES DE L'EOLIEN EN MER. NB : CE SCHEMA EST ILLUSTRATIF, IL N'A AUCUNE VALEUR SCIENTIFIQUE. ....	137
FIGURE 118 : CARTE DES ZONES POTENTIELLES POUR L'EOLIEN EN MER FLOTTANT.....	141
FIGURE 119 : DISTANCE LA PLUS COURTE ENTRE LA COTE ET LA MASSE D'EAU A 5°C A LA REUNION.....	142
FIGURE 120 : CARTE DES ZONES PROPICES A L'ENERGIE THERMIQUE DES MERS A LA REUNION.....	143
FIGURE 121 : HIERARCHISATION SPATIALE DU POTENTIEL VALORISABLE D'ENERGIE THERMIQUE DES MERS AUTOUR DE LA REUNION.....	144
FIGURE 122 : CARTE DES ZONES PROPICES A L'EXPLOITATION DE LA HOULE EN PLEINE MER.....	145
FIGURE 123 : HIERARCHISATION SPATIALE DES ZONES POTENTIELLES POUR L'EXPLOITATION DE L'ENERGIE DE LA HOULE AUTOUR DE LA REUNION.....	146
FIGURE 124 : CARTE DES ZONES PROPICES A L'EXPLOITATION DE LA HOULE A TERRE : SITES D'IMPLANTATION POTENTIELS (EN BLEU) ET GISEMENT ENERGETIQUE (AFFICHAGE DE LA COUCHE RESTREINT AUTOUR DE LA BANDE COTIERE).....	147
FIGURE 125 : PROJET DE BASSIN DE BAINADE AU BARACHOIS (CINOR) ET MODELE DE DIGUE EN CAISSON AVEC VALORISATION ENERGETIQUE MISE EN PLACE AU PORT DE ROME (WAVENERGY.IT).....	150
FIGURE 126 : DIGUES EN BLOCS CUBIQUES RAINURES DU PORT DE SAINTE-MARIE (CONSERVATOIRE DU LITTORAL) ET SYSTEME HOULOMOTEUR AJOUTE SUR LA DIGUE DU PORT DE NAPLES (CONTESTABILE ET AL. 2016).....	151
FIGURE 127 : SYSTEME COREEN INWAVE (SOURCE : INGINE) PORT DE SAINT-LEU (SOURCE : CLICANOO), SYSTEME BRESILIEN COPPE SUBSEA TECHNOLOGY (SOURCE : O GLOBO).....	151
FIGURE 128 :DISPOSITIFS HOULOMOTEURS DRAKOO, WAVE STAR ET SINN POWER.....	151
FIGURE 129 : PRINCIPAUX FINANCEMENTS EUROPEENS MOBILISABLES POUR LES PROJETS INNOVANTS DANS L'ECONOMIE MARITIME. SOURCE : CESER DE L'ATLANTIQUE 2016-2017.....	153
FIGURE 130 : PARCELLES DU CONSERVATOIRE DU LITTORAL A PROXIMITE DU CHU DE SAINT-PIERRE.....	177

## Glossaire et abréviations

Acronyme	Signification
<b>ADCP</b>	Acoustic Doppler Current Profiler : courantomètre à effet Doppler
<b>ARDA</b>	Association Réunionnaise de Développement de l'Aquaculture
<b>ARER</b>	Agence Régionale Energies Réunion, devenue SPL Energies Réunion, puis en 2019 SPL Horizon Réunion.
<b>ARVAM</b>	Agence pour la Recherche et la VALorisation Marine, organisme réunionnais
<b>Benthos</b>	Ensemble des organismes vivants aquatiques, mobiles ou fixes, qui vivent à l'interface eau/sédiment (sur ou à proximité du fond).
<b>BRGM</b>	Bureau de Recherche Géologique et Minière, organisme national référent sur les sols et les sous-sols.
<b>CANDHIS</b>	Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ
<b>CAPEX</b>	CAPital EXpenditures : coûts d'investissements
<b>CETMEF</b>	Centre d'études techniques maritimes et fluviales
<b>Complément de rémunération</b>	Principes du mécanisme de complément de rémunération  Le dispositif de complément de rémunération a été introduit aux articles L. 314-18 à L. 314-27 du code de l'énergie par la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV). Dans ce mécanisme où les producteurs d'électricité à partir d'énergie renouvelable commercialisent leur énergie directement sur les marchés, une prime vient compenser l'écart entre les revenus tirés de cette vente et un niveau de rémunération de référence fixé selon le type d'installations, par la puissance publique dans le cadre d'un arrêté tarifaire ou par le producteur dans le cadre d'une procédure de mise en concurrence.
<b>Cycle thermodynamique</b>	Dans un cycle thermodynamique, on fait circuler en boucle un fluide qui va successivement passer de l'état liquide à l'état gazeux à travers 4 étapes principales : compression (augmentation de pression), évaporation (liquide->gaz), détente (diminution de pression), condensation (gaz->liquide). Au cours des changements de phase, le fluide absorbe ou émet de la chaleur, ce que l'on peut exploiter. Au cours de la détente, on peut extraire de l'énergie électrique par turbinage.
<b>CRE</b>	Commission de Régulation de l'Énergie : organisme français.
<b>DCP</b>	Dispositif Concentrateur de Poisson. Assemblage d'objets flottants (bouées) et immergés (fanions) à différentes profondeurs, reliés par des cordages et arrimés à un corps-mort, dont le but est d'attirer les poissons pour faciliter la pêche.
<b>Effet DCP</b>	Effet attractif pour la faune marine que possède tout objet placé en mer.
<b>DMSOI</b>	Direction de la Mer Sud Océan Indien
<b>EMEC</b>	European Marine Energy Center : centre de test des énergies marines situé en Ecosse.
<b>EMR</b>	Energie Marine Renouvelable
<b>ENR</b>	Energie Renouvelable
<b>ETM</b>	Energie Thermique des Mers
<b>HOTEC</b>	High OTEC : centrale électrique à énergie thermique des mers optimisée. Au lieu de prendre la source chaude en mer (eau de surface à environ 25°C), on utilise une autre source, de température bien plus élevée (géothermie, industrie, chauffage solaire, etc.).
<b>IFREMER</b>	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer.
<b>IOES</b>	Institute of Ocean Energy - Saga University : organisme japonais de référence en matière d'énergie thermique des mers.
<b>KRISO</b>	Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering : organisme de R&D très actif en matière d'énergie de la houle et d'énergie thermique des mers.
<b>LCOE</b>	Levelized Cost of Energy. Coût complet moyen actualisé de l'énergie produite sur la durée de vie de l'installation, défini comme le rapport entre la somme des coûts annuels actualisés sur la somme des productions annuelles actualisées sur la période de calcul.

<b>LTTD</b>	Low Temperature Thermal Desalination : désalinisation basse température grâce à l'énergie thermique des mers. Ce procédé utilise un cycle thermodynamique ouvert.
<b>Mile</b>	Unité de longueur nautique. 1 mile marin = 1,85 km
<b>Necton</b>	Ensemble des animaux qui vivent en pleine eau (par opposition au benthos), et qui nagent activement (par opposition au plancton dont le déplacement est passif).
<b>NELHA</b>	Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority : organisme de référence en matière d'énergie thermique des mers.
<b>NOAA</b>	National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce : Institut national d'océanographie des Etats-Unis.
<b>NRL</b>	Nouvelle Route du Littoral, projet lancé en 2014 par la Région Réunion de construction d'une route en mer reliant Saint-Denis à la Possession par un viaduc de 5,4 km et des tronçons de digues.
<b>Offshore</b>	Hauturier / au large. Par extension, désigne aussi le secteur de l'industrie pétrolière ou gazière.
<b>Onshore</b>	Côtier / à terre
<b>OPEX</b>	OPerational EXpenditures : coûts d'opération
<b>OTEC</b>	Ocean Thermal Energy Conversion : conversion d'énergie thermique des mer en électricité / centrale électrique à énergie thermique des mers.
<b>OWC</b>	Oscillating Water Column : colonne d'eau oscillante
<b>PARETO</b>	Bureau d'étude réunionnais en environnement marin
<b>PPE</b>	Programmation Pluriannuelle de l'Energie
<b>R&amp;D</b>	Recherche et Développement
<b>SAR</b>	Schéma d'Aménagement Régional
<b>SHOM</b>	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
<b>SMVM</b>	Schéma de Mise en Valeur de la Mer
<b>Spar Buoy / Bouée espar</b>	Bouée tubulaire des phares et balises pour être utilisée dans les ports ou les mers sans marée. Par extension désigne les systèmes flottants de forme tubulaire.
<b>STEP</b>	Station de Transfert d'Energie par Pompage-turbinage.
<b>SWAC</b>	Sea Water Air Conditioning : climatisation à partir d'eau froide profonde.
<b>Thalassothermie</b>	Utilisation des calories de l'eau de mer pour produire du chaud ou du froid.
<b>Upwelling</b>	Phénomène observé lorsque, sous l'effet de vents forts et réguliers, la couche d'eau de mer de surface est poussée vers le large, laissant ainsi la place aux eaux océaniques profondes, qui remontent alors. Ces eaux profondes étant plus riches en nutriments, les poissons y sont plus abondants.
<b>Watt (W)</b>	Unité de la puissance pour l'énergie. 1 W = 1 Joule par seconde.
<b>Watt heure (Wh)</b>	Unité de la quantité d'énergie absorbée ou produite pendant un certain temps. Une puissance de 1 W fonctionnant pendant 1h produit une énergie de 1 Wh.
<b>WEC</b>	Wave Energy Converter : système de production d'énergie à partir de la houle
<b>ZNI</b>	Zone Non Interconnectée aux réseaux électriques continentaux
<b>ZNIEFF</b>	zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique

## Synthèse non technique

Un premier Schéma Régional des Energies de la Mer (SREMER) avait été réalisé en 2009 par l'ARER. Ce nouveau document vient l'actualiser. Son objectif est d'éclairer les décideurs sur le potentiel de développement des énergies marines à la Réunion et sur les pistes d'actions pour valoriser ce potentiel. Il n'a pas de valeur réglementaire mais s'inscrit en complément de la PPE.

Le document balaye les énergies marines suivantes : l'énergie de la houle, des courants marins, l'éolien en mer, l'énergie thermique des mers (qui se décline en de multiples applications), l'énergie osmotique et le stockage d'énergie par pompage / turbinage d'eau de mer. L'énergie marémotrice n'y est pas abordée car les marées à la Réunion sont de trop faible amplitude (< 1 m) pour être exploitées.

L'état de l'art montre un grand foisonnement de technologies, une évolution rapide du secteur mais un développement qui stagne au stade de prototypes pré-commerciaux.

- **L'éolien en mer posé, puis flottant**, est le secteur le plus mature : les avancées réalisées en terrestre bénéficient directement au maritime. Un parc flottant pilote est opérationnel en Ecosse depuis 2017 et l'Etat français a attribué 4 parcs lors d'un appel à projets, pour une mise en service prévue vers 2021.
- D'un principe proche, les hydroliennes exploitant **les courants marins** ont longtemps constitué un secteur de recherche privilégié par les industriels. Les machines mises au point sont principalement tournées vers l'exploitation des courants de marée à fortes vitesses. La dernière étape de production industrielle est prête mais subit le manque de visibilité politique, notamment en France, pourtant leader.
- Les machines exploitant **l'énergie de la houle** connaissent un développement plus modeste. Les puissances électriques développées sont beaucoup plus faibles qu'en éolien (plusieurs mégawatts) ou qu'en hydrolien (1 à 2 mégawatts) : de 0,1 à 0,5 mégawatts pour des encombrements souvent importants. Néanmoins, la palette de technologies est plus vaste et permet de s'adapter à davantage de configurations. L'Asie investit énormément dans cette énergie et affiche des résultats rapides et prometteurs.
- Basée sur la chaleur ou sur le froid stocké par les masses d'eaux en mer, **l'énergie thermique des mers** regroupe des usages divers et complémentaires : si la production électrique reste encore au stade de R&D, la production de froid, d'eau potable et la valorisation de l'eau de mer profonde comme matière première pour l'industrie agro-alimentaire ou cosmétique sont des secteurs matures et rentables développés depuis plusieurs dizaines d'années en Asie. En Europe, l'énergie thermique des mers se fait connaître pour l'alimentation des réseaux urbains de chaleur et de climatisation.
- Enfin, **l'énergie osmotique**, qui repose sur les différences de salinité entre deux masses d'eau, n'est pas envisageable en l'état : elle met en œuvre des matériaux d'une technicité élevée aux coûts encore trop élevés.
- Quant au **stockage d'énergie en mer**, quelques installations pilotes voient le jour mais dans des conditions bien plus faciles qu'à la Réunion, où sévissent fortes houles et fonds abrupts.

Pour les territoires insulaires comme la Réunion, non interconnectés à d'autres réseaux électriques continentaux, les énergies marines constituent une opportunité. En plus de **diversifier la production électrique**, les énergies marines comme le vent en mer ou la houle sont plus régulières et mieux prévisibles que le solaire par exemple. L'énergie thermique des mers est, elle, une énergie de base, non intermittente. Utilisée pour la climatisation, elle en réduit la consommation électrique de 80%.

A la Réunion, le potentiel valorisable d'énergies marines se situe sur l'éolien flottant, l'énergie thermique des mers et la houle. Les courants marins semblent en revanche trop faibles pour être exploitables.

- L'éolien flottant pourrait se développer à moyen terme (une à quelques dizaines d'années) en grandes profondeurs, à plusieurs kilomètres des côtes. Avec des éoliennes de puissances unitaires de 5 à 10 MW, même des « petits » parcs d'une dizaine d'unités rivaliseraient en potentiel avec les principaux moyens de production électriques actuels de l'île. Au total, les deux zones propices situées au Sud-Ouest et au Nord-Ouest de l'île offrent une capacité brute de plusieurs gigawatts chacune. Des incertitudes restent toutefois à lever : quel impact des éoliennes sur les oiseaux marins indigènes et protégés (pétrels et puffins), quel impact du parc éolien sur les pêcheries, quelles modalités d'atterrissage ?
- L'énergie thermique des mers est un point fort de l'île : les fonds escarpés rendent l'eau froide profonde accessible à moins de 10 km des côtes. Au moins 5 sites sont bien positionnés, à la fois par rapport à la ressource, et à la fois par rapports aux besoins et aux usages potentiels : Saint-Denis, Le Port, Saint-Pierre, Saint-Benoît, Saint-André. L'enjeu majeur pour cette énergie est de trouver un modèle économique qui permette d'amortir le coût élevé des conduites d'amenée de l'eau profonde. Ces modèles existent et ont été validés : en Polynésie Française pour la climatisation, à Hawaii et en Asie pour les marchés agro-alimentaires, en Inde pour la production d'eau douce en site isolé, les exemples sont nombreux. Ces

expériences montrent que la palette d'activités possibles et les retombées économiques qu'elles génèrent font de l'eau profonde un levier de développement pour les territoires. Il existe enfin d'autres techniques, comme l'hydromaréthermie, qui exploitent aussi la température de l'eau de mer mais à faible profondeur. Elles sont beaucoup plus économiques à l'investissement mais elles répondent à des besoins combinés, voire simultanés, de chaleur et de froid.

- L'énergie de la houle offre un potentiel intéressant sur la moitié Sud de l'île. Compte-tenu de l'éloignement des infrastructures du Port et des dimensions souvent imposantes des systèmes houlomoteurs, il paraît ambitieux d'envisager des implantations au large. Il semble donc plus prudent, dans un premier temps, de considérer des productions depuis le littoral. Vu les contraintes d'intégration paysagère, les protections environnementales et la puissance modérée des machines, ce type d'énergie est à envisager dans le cadre de projets pilotes à effet vitrine, avec des technologies soigneusement choisies et adaptées à l'île. En particulier, les systèmes houlomoteurs intégrés à des ouvrages côtiers (digues, quais ou jetées) sont plus faciles à déployer et moins coûteux. Si l'on considère le linéaire de côtes déjà aménagé par de tels ouvrages, plus quelques sites éventuels au large, on peut estimer que le territoire offre un potentiel de 1 à 20 MW.

Les nombreux projets ou études menés autour des énergies marines à la Réunion ces dix dernières années confirment le **potentiel de l'île** et illustrent sa visibilité à l'international auprès des industriels. Les projets PELAMIS, CETO ou encore le SWAC ont marqué les esprits chez le grand public. Malheureusement, aucun n'a abouti, sauf la climatisation marine de l'Hôpital de Saint-Pierre, en cours, et dont la livraison est prévue d'ici 2023. Les leçons qui peuvent être tirées de ces échecs passés, ainsi que les caractéristiques du territoire réunionnais qui ont pu être dressées dans le document, permettent de proposer quelques orientations d'actions pour **pérenniser les projets actuels et en développer de nouveaux**.

Pour développer ces filières à la Réunion, il faut **anticiper et préparer les enjeux techniques** qui se posent. Actuellement, un seul port industriel, le Port-Est, pourrait en théorie assurer le déploiement et à la mise à l'eau d'équipements d'énergies marines. En réalité, en fonction des machines envisagées, les tirants d'eau, les moyens nautiques, les surfaces à terre ou encore les moyens de levage pourraient s'avérer insuffisants. C'est pourquoi le Grand Port Maritime de la Réunion a prévu de s'adapter d'ici 2022, avec des surfaces dédiées à la filière énergies marines. Sur des projets d'ampleur, la filière pourrait également entraîner le développement d'infrastructures portuaires répondant à ses besoins. C'est un scénario envisageable à longue échéance dans l'Est, ou dans le Sud de l'île où se situe une partie du potentiel (éolien en mer et houle).

Par ailleurs, l'exposition à des houles puissantes (australes et cycloniques), l'éloignement des sites du Port, les délais et coût d'acheminement du matériel sur l'île sont autant de paramètres que les solutions techniques d'énergies marines devront intégrer pour être viables à la Réunion.

La question est donc de savoir si la Réunion pourrait représenter un territoire d'intérêt pour les industriels, en leur permettant de valider leurs technologies dans un **contexte bien spécifique : tropical, insulaire et cyclonique, caractéristiques clés de marchés potentiels internationaux stratégiques**. De surcroît, la France dispose d'une avance ou d'un savoir-faire reconnu dans certaines filières (énergie thermique des mers & éolien flottant). Cela pourrait représenter un atout face à d'autres territoires qui ont, soit des politiques davantage incitatives et des infrastructures déjà existantes (l'Ecosse, les Canaries, Hawaii, la Corée du Sud), soit des marchés potentiels bien plus conséquents (le Japon, la Chine).

Pour lever ces barrières et exploiter les opportunités offertes par le territoire, il est donc nécessaire **que la Réunion soit moteur, à la fois en local, en national et à l'étranger** :

- Sur le plan de la communication et du lobbying, pour faire reconnaître l'intérêt économique et énergétique des énergies marines par des réponses politiques et financières.
- Sur le plan de la mise en réseau, pour faire émerger des intérêts communs et concrétiser des projets.
- Sur le plan des études et de la R&D, pour anticiper et identifier des leviers aux questions opérationnelles et environnementales.
- Et enfin sur le plan de la planification, pour préparer le terrain aux projets futurs.

## Contexte / préambule

Un premier Schéma Régional des Energies de la Mer (SREMER) avait été réalisé en 2009 par l'ARER. Celui-ci avait permis un recueil des données locales, la localisation de sites potentiels, et l'évaluation du gisement. Il incluait l'énergie hydrolienne, houlomotrice, thermique, l'osmose inverse, la biomasse marine et l'éolien en mer.

Depuis, de nombreuses études ont été menées sur l'île, à différents stades de développement projet. Les technologies ont également évolué. Ce document est donc à actualiser tant du point de vue de l'état de l'art que de la connaissance du potentiel.

Pour autant, malgré un foisonnement de projets concentrés sur l'île ces dernières années, aucun n'a pour l'heure vu le jour. Il convient donc de s'interroger d'une part sur la stratégie à mettre en œuvre pour valoriser le potentiel de l'île, et d'autre part sur le rôle et les intérêts de la Région Réunion dans ce développement.



Figure 1 : centrale houlomotrice intégrée de Mutriku, Espagne (source : The Climate Group)

## 1. Etat des lieux de l'existant

### 1.1. Etat de l'art des technologies et des projets énergies marines dans le monde

L'état de maturité des différentes technologies et familles d'énergies marines est ici présentée. Sont inclus :

- L'énergie de la houle ;
- L'énergie des courants marins ;
- L'énergie thermique ;
- L'éolien en mer ;
- L'énergie osmotique ;
- Les STEP marines.

Le marémoteur n'est pas présenté vu l'absence de potentiel à la Réunion (amplitude de marée trop faible).

#### 1.1.1. Préambule : les énergies marines renouvelables, un secteur dynamique et foisonnant

##### a) Les centres de test, une activité en plein boom

Qu'elle soit privée ou publique, la recherche dans le domaine des énergies marines renouvelables est un secteur dynamique et foisonnant. A l'échelle mondiale, on compte **plusieurs centaines d'entreprises spécialisées** développant des concepts d'EMR, réparties dans **une trentaine de pays** (Europe, Asie, Amériques principalement).

Depuis une vingtaine d'années, de nombreux pays ont développé des **centres d'essais en mer spécialisés** permettant de tester le déploiement en mer des prototypes, leur tenue en mer et leur comportement en conditions réelles. Ces centres offrent ainsi : surfaces en mer autorisées et balisées pour l'installation des prototypes, connexion au réseau national électrique, équipements de suivis et de mesure, instrumentation météo-océanique et suivis historiques, expertises environnementales, moyens en mer, moyens de levage, port, laboratoires, infrastructures de fabrication et maintenance.

Ces centres sont présentés dans sur la carte en annexe 2.

On compte **une vingtaine de centres de tests actuellement opérationnels**, c'est-à-dire dont les infrastructures sont réalisées, ou en cours de réalisation avec au moins un prototype installé. En sus, au moins une dizaine de centres était en cours de création en 2017 (en Chine, au Japon, à Singapour, en Australie, en Nouvelle-Zélande, en Grande-Bretagne, en Irlande).

Ces structures sont généralement publiques, rattachées à des collectivités régionales, à des organismes nationaux ou à des centres de recherche. Certains sont toutefois privés : financés par la location des infrastructures ou la mise à disposition de données, ils se positionnent comme des prestataires aux services des développeurs. C'est le cas par exemple du Wave Hub Test Site à Hayle en Angleterre.

Le plus connu et le plus grand centre d'essai en mer est l'European Marine Energy Center (EMEC), situé en Ecosse. Financé par les pouvoirs publics en 2004, celui-ci est autonome financièrement depuis 2011. Il constitue aujourd'hui la référence en la matière et prodigue ses conseils dans le cadre d'actions de coopération internationale.

##### b) Centres d'essais énergies marines en France

En France, 3 centres de test des énergies marines existent :

- Le **SEM-REV**<sup>1</sup> de l'Ecole Centrale de Nantes pour les systèmes houlomoteurs et l'éolien flottant. Le câble de connexion au réseau a été posé en 2012.
- Le site de **Paimpol-Bréat** d'EDF pour l'hydrolien. Lancé en 2011 pour tester les hydroliennes OpenHydro de Naval Group (ex-DCNS), les deux entreprises ont annoncé sa fermeture fin 2017.
- Le site d'essai **SENEOH**<sup>2</sup> dans l'estuaire de la Gironde en plein cœur de Bordeaux. Opérationnel depuis 2016, il est destiné au test des hydroliennes d'échelle réduite ou réelle pour les marchés du fluvial, de l'estuarien et de l'océanique.

<sup>1</sup> SEM-REV : acronyme pour Site d'Expérimentation en Mer pour la Récupération de l'Energie des Vagues. Le site était initialement pensé pour l'énergie de la houle uniquement.

<sup>2</sup> SENEOH : Site Expérimental Estuarien National pour l'Essai et l'Optimisation d'Hydroliennes.

## c) A la Réunion

Un Centre de recherche, formation et innovation dédié aux énergies marines est en préfiguration à la Réunion depuis 2018-2019. Porté par le Groupement d'Intérêt Public Ecocité et la Région Réunion, ce projet est inscrit au Contrat de Transition Énergétique de la future Ecocité de l'Ouest. Une étude de définition des besoins doit être lancée en 2019-2020.

Le projet de développement économique de la zone de Bois-Rouge, porté par le Groupement d'Intérêt Public Pôle Portuaire, Industriel et Économique de Bois-Rouge (GIP PPIEBR) devrait également abriter des activités de recherche, développement et innovation en lien avec l'économie bleue, qui constitue l'un des axes du projet.

### 1.1.2. Énergie de la houle

#### a) Qu'est-ce que l'énergie houlomotrice ?

*La houle : une onde créée par le vent au large*

Les vagues sont générées par le vent au large sur l'ensemble des mers du globe. Quand le vent faiblit, ou si les vagues se propagent vers l'extérieur de la zone ventée, les vagues continuent à se propager librement jusqu'aux côtes, c'est ce qu'on appelle la houle.

La houle est une onde caractérisée par sa vitesse de propagation, sa longueur d'onde (la distance entre deux crêtes d'onde), sa période (le temps entre deux crêtes d'onde), et son amplitude (hauteur entre le creux et la crête de l'onde).

Les ondes formées par le vent vont se propager dans différentes directions et suivent différentes longueurs d'onde et vitesses. On parle « d'état de mer » ou de « mer de vent » pour représenter cette multitude d'ondes qui se croisent au large.

Aux abords des côtes, la houle est modifiée par la présence du fond : les frottements sur le fond marin ralentissent sa vitesse, la diminution de la hauteur d'eau en modifie la hauteur, la géographie des côtes en modifie la direction de propagation. Dès que la profondeur est inférieure à environ 2 fois la hauteur des vagues, les vagues déferlent. Une partie de leur énergie est transmise aux courants.

En pratique ces 4 régions (cf Figure 2) peuvent se chevaucher, par exemple la "mer du vent" est souvent mêlée à la houle. La propagation des vagues est aussi influencée par les courants, ce qui peut rendre les vagues monstrueuses au large de l'Afrique du Sud, et les variations du niveau d'eau ... et les vagues modifient aussi les courants et le niveau d'eau. Les vagues sont donc un élément de la dynamique océanique, qui ne peut pas être étudié tout à fait séparément.

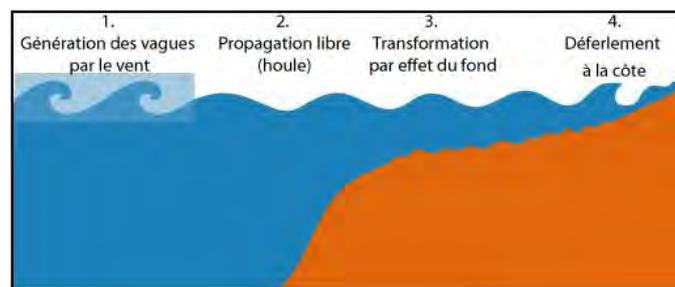


Figure 2 : origine de la houle. Source : SHOM

#### Principe physique

La houle est une perturbation oscillatoire des particules d'eau qui diminue avec la profondeur. Tant qu'il n'y a pas de déferlement, les particules d'eau tournent sur elles-mêmes en cercles concentriques et ce mouvement se propage d'une particule à l'autre, créant une onde à la surface de l'eau (cf Figure 3). Il n'y a alors aucun courant, aucun flux. La masse d'eau ne se déplace pas, elle est juste parcourue par l'onde, tout comme les sols au passage d'une onde sismique.

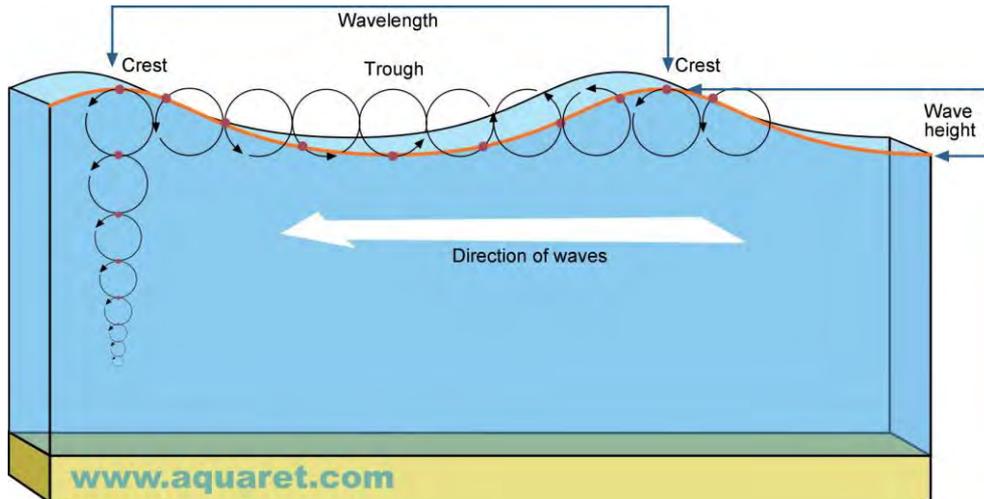


Figure 3 : mouvements des particules d'eau et propagation d'une onde Source : banque d'image AQUARET

L'énergie de la houle est la somme de son énergie cinétique (liée à la vitesse de déplacement de l'onde) et de son énergie potentielle (hauteur de la crête).

A la côte, l'énergie cinétique diminue à cause des frottements sur le fond marin. L'énergie totale de la houle restant constante, c'est alors l'énergie potentielle qui augmente : l'amplitude de la houle augmente jusqu'à déferler. Il y a alors un déplacement des particules d'eau, un flux et la création de courants côtiers (cf Figure 4).

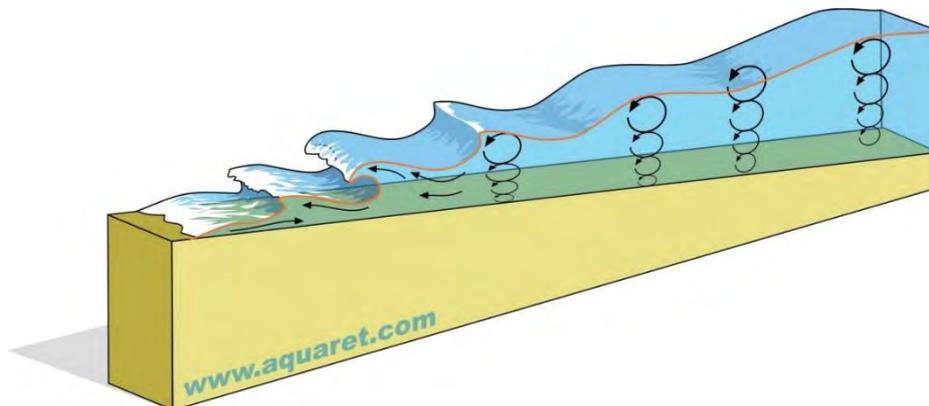


Figure 4 : mouvements des particules d'eau et déferlement à la côte. Source : banque d'image AQUARET

Ces sont ces différents mouvements des particules d'eau générés par la houle que les technologies houlomotrices exploitent. On peut ainsi :

- **Exploiter la variation du niveau d'eau à la surface de la mer** : technologie de la colonne d'eau oscillante, de la masse oscillante, du flotteur articulé, système à déversement (voir chapitre suivant) ;
- **Exploiter le mouvement oscillatoire des particules d'eau généré sous la surface** : technologie du bras oscillant ou du tube à onde de renflement.

Dans tous les cas, il s'agit de capter le mouvement de l'eau (en surface ou sous la surface) pour transformer cette énergie mécanique en énergie électrique.

Le potentiel énergétique de la houle est proportionnel à sa période multiplié par sa hauteur au carré :

$$P_{\text{théorique}} \text{ (kW/m linéaire)} = \text{coeff.} \cdot T \cdot H^2$$

Où coeff : coefficient variant selon la méthode de calcul (de l'ordre de 0,5), T : période de la houle, H : hauteur de la houle.

A cela s'ajoute la fréquence d'apparition de la houle sur un site donné.

## b) Ressource minimale nécessaire pour l'exploitation de la houle

Il n'existe pas vraiment de valeurs seuils figées dans le marbre pour l'exploitation de l'énergie de la houle. Trois gammes sont communément admises par la communauté scientifique (Kilcher & Thresher, 2016) :

- **5 kW/ml** est la valeur minimale utilisée dans les analyses à large échelle géographique ou temporelle :
  - Estimations du potentiel énergétique mondial,
  - Estimations grossières ou de première approche à un niveau national ou régional,
  - Analyses à long terme, qui supposent que les sites moins énergétiques de la gamme 5-10 kW/ml pourraient devenir économiquement viables,
  - Elle permet en outre de s'affranchir des spécificités de chaque technologie.
  - En dessous de 5 kW/ml, le potentiel est considéré insuffisant pour une exploitation énergétique (Mørk et al, 2010).
- **10-15 kW/ml** est la gamme de valeurs utilisée pour les analyses d'échelle régionale un peu plus fines (Spaulding et al. 2010 ; Van Cleve et al. 2013). Ce seuil peut aussi être vu comme la valeur minimale qui semble acceptable au cours des prochaines décennies, lorsque les technologies houlomotrices seront plus matures et plus compétitives.
- **20-30 kW/ml** correspond aux sites très énergétiques. Bien que certaines zones du monde possèdent des potentiels atteignant les 90 kW/ml, cette gamme de 20 à 30 kW/ml correspond au site « idéal » généralement visé pour une implantation de prototype à échelle réelle.

A l'aspect « gisement énergétique » s'ajoutent également des critères dépendants de la technologie houlomotrice. Plus l'analyse s'affine et plus le poids de ces éléments « techno-dépendants » augmente.

Chaque technologie ou modèle cible certaines conditions de mers, c'est-à-dire une houle comprise dans une certaine plage de hauteur et période (ces deux paramètres conditionnant la quantité d'énergie). Sur la Figure 5, on voit que la machine (de puissance maximale 10 kW) fonctionne de façon optimale pour des houles d'une hauteur de 1,3 - 1,4 m et de 5 à 7 s de période. En dehors de cette plage, la machine n'est pas à 100% de ses capacités.

### Peak Power Output Spectrum in kW

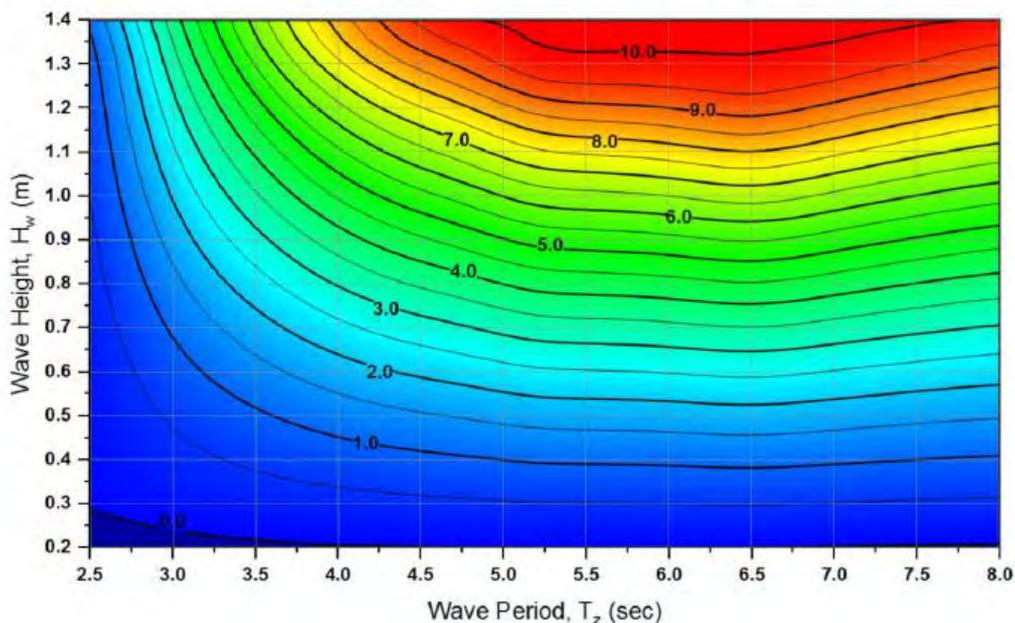


Figure 5 : exemple de plage de fonctionnement d'une machine houlomotrice selon la hauteur (ordonnée) et la période (abscisse) de la houle. Source : plaquette Drakoo 10 kW de Hahn Ocean du 01-2018.

L'enjeu consiste donc à concevoir ou à choisir la technologie la plus en adéquation avec les conditions observées sur le site.

Plus la houle sur site aura des occurrences élevées dans les hauteurs et périodes ciblées par la machine, meilleure sera la production d'énergie. Graphiquement, cela consiste à comparer la matrice des occurrences de houle du site à la matrice de puissance de la machine (cf Figure 6).

**Production  
d'énergie  
annuelle** = **Ressource** × **Courbe de puissance**

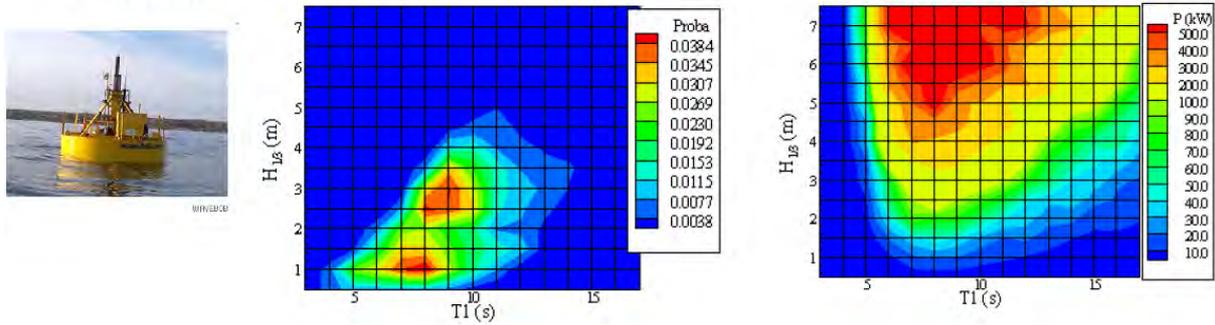


Figure 6 : principe de calcul du productible d'un projet houlomoteur. Croisement de la matrice des occurrences (aussi appelé corrélogramme) du site avec la matrice de puissance de la machine. Source : A. Babarit – Ecole Centrale de Nantes – 2016.

L'efficacité de la machine se mesure avec le **facteur de capacité**, qui est le rapport entre la puissance effectivement produite sur un site et la puissance nominale de la machine.

Un autre paramètre décrivant l'efficacité de la machine est la **largeur de capture ou facteur d'absorption**, qui mesure la capacité de la machine à absorber la houle à laquelle elle est exposée. C'est le rapport entre la puissance absorbée (puissance brute) et la puissance incidente (évaluée en multipliant le potentiel annuel moyen du site en kW/ml par la grandeur caractéristique de la machine).

### c) Différents systèmes de conversion d'énergie

Plusieurs types de conversion de l'énergie existent pour transformer l'énergie de la houle en électricité. Certains sont basés sur la conversion de l'énergie mécanique en énergie hydraulique, d'autres transforment directement l'énergie mécanique en énergie électrique.

- **Conversion hydraulique :**

Deux grandes méthodes sont utilisées sur les systèmes houlomoteurs :

- Conversion via une **turbine à eau** (Figure 7) : le mouvement de la houle actionne un piston qui comprime un fluide hydraulique (généralement de l'eau). Ce fluide circule dans une boucle et fait tourner une turbine. La turbine couplée à un générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Ce système de conversion est le plus répandu.

**On peut aussi utiliser directement l'énergie hydraulique pour pomper de l'eau ou désaliniser de l'eau.**

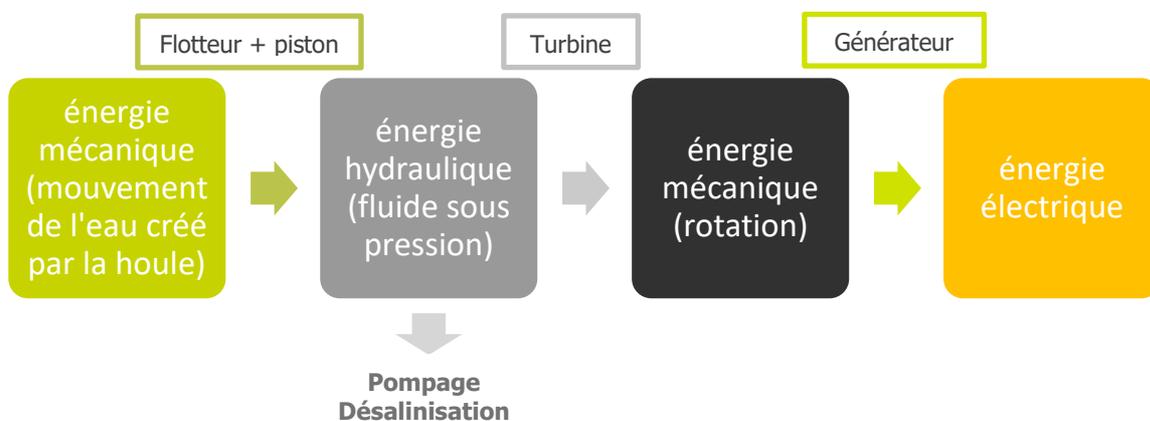


Figure 7 : principe des systèmes de conversion hydraulique de l'énergie houlomotrice – turbine à eau

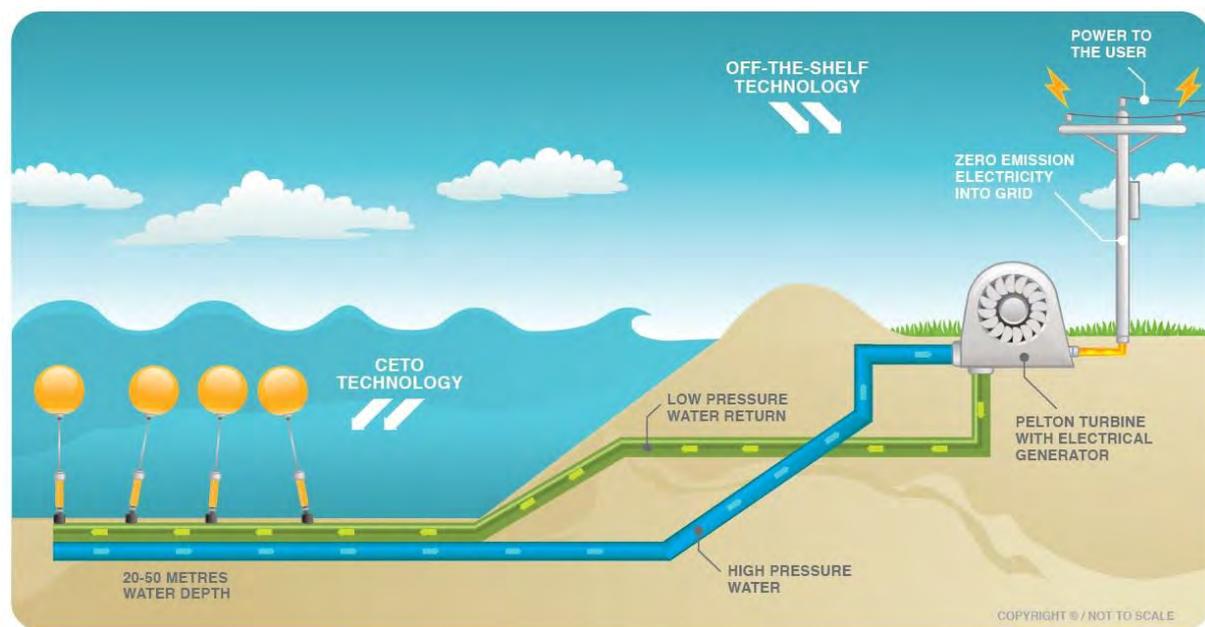


Figure 8 : exemple de réalisation, la technologie CETO. Source : Carnegie Wave Energy

- Conversion via une **turbine à air** (Figure 9) : c'est le même principe mais le fluide hydraulique utilisé est l'air. Le mouvement de la houle est canalisé dans un conduit et le déplacement d'air qu'il provoque actionne une turbine à air. Les systèmes houlomoteurs à colonne d'eau oscillante décrits au chapitre suivant reposent sur ce principe de conversion de l'énergie.

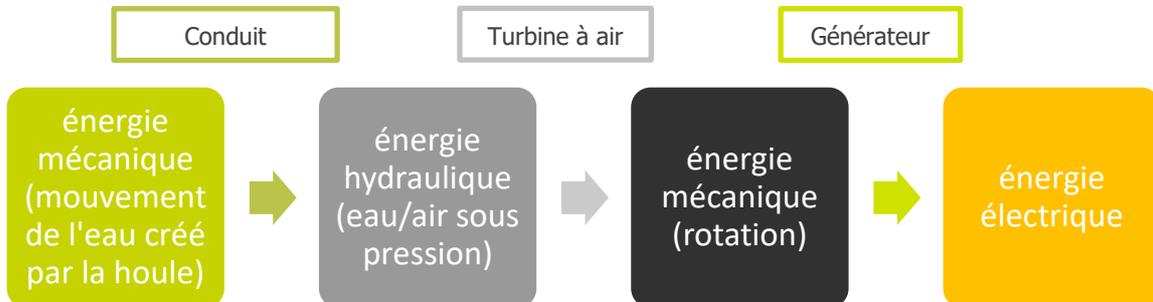


Figure 9 : principe des systèmes de conversion hydraulique de l'énergie houlomotrice – turbine à air

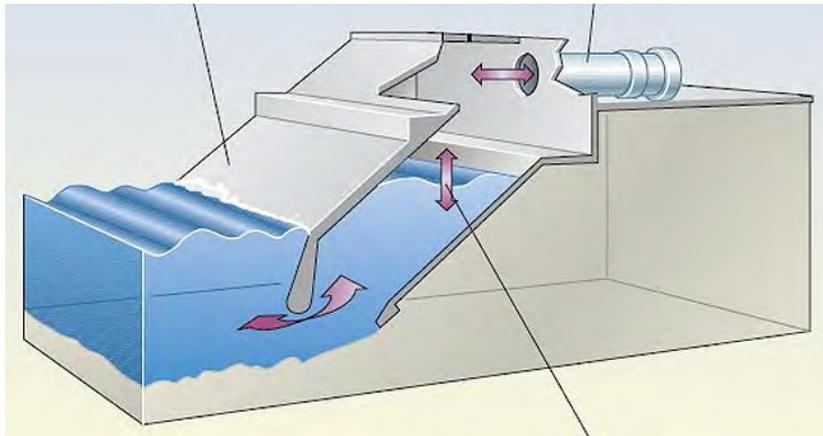


Figure 10 : exemple de réalisation, la technologie LIMPET. Source : The Open University

- **Conversion électrique directe** (Figure 11) :  
Les mouvements de la houle absorbés par le système houlomoteur font directement fonctionner un générateur. Les mouvements utilisés peuvent être de translation (exemple : système SeaBased) ou de rotation (exemple : système Resen Wave basé sur une roue à aubes ou système Penguin basé sur un volant d'inertie).

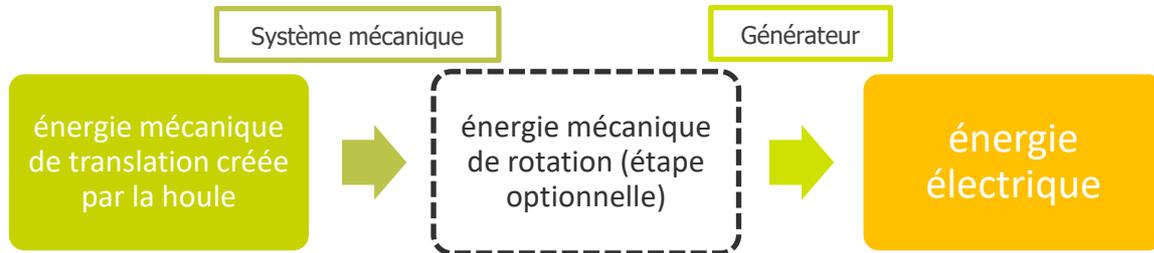


Figure 11 : principe des systèmes de conversion directe de l'énergie houlomotrice en énergie électrique

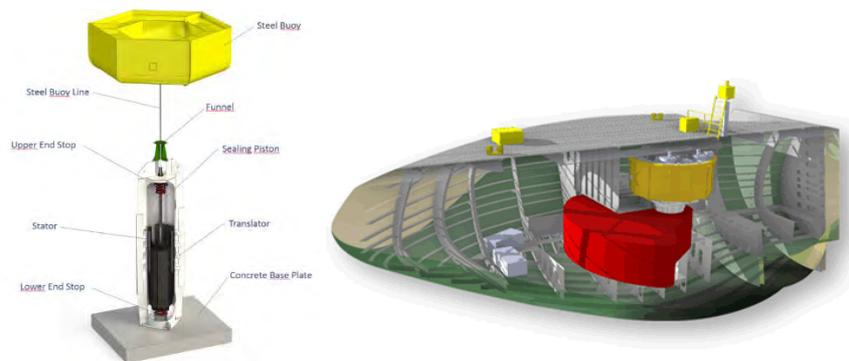


Figure 12 : exemple de réalisation, les technologies SeaBased et Penguin. Source : SeaBased AB et Wello OY

#### d) Une multitude de familles technologiques

Les systèmes houlomoteurs se déclinent en une multitude de familles technologiques. Différents classements des technologies existent, suivant le point de vue adopté. Nous en présenterons deux :

- Classement selon l'orientation à la houle :
  - système linéaire orienté de face ou de profil à la direction de la houle ;
  - ou système ponctuel indifférent aux directions de houle ;

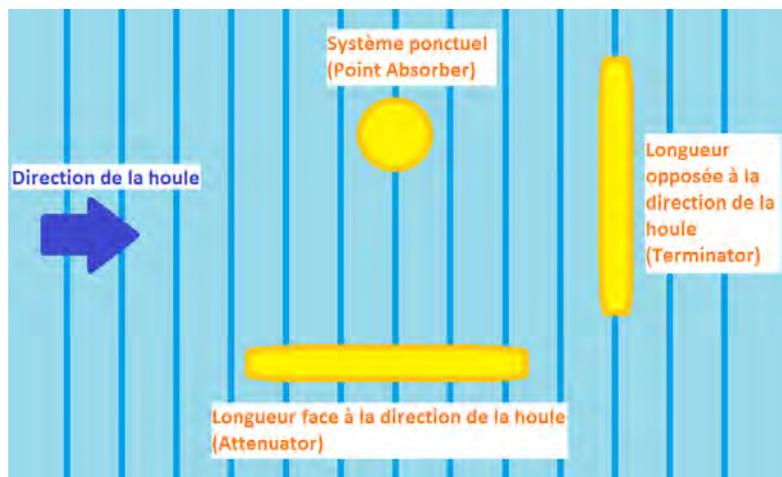
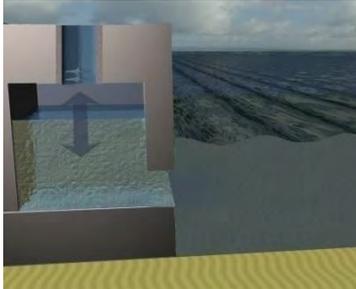


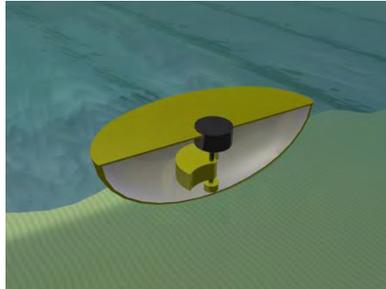
Figure 13 : Classement des systèmes houlomoteurs selon la disposition à la direction de la houle (d'après Hakim Mouslim, Ecole Centrale de Nantes)

- Classement selon le mécanisme de conversion de l'énergie :

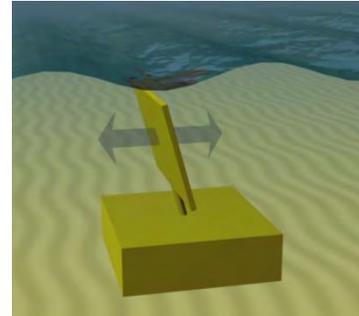
- Colonne d'eau oscillante ;
- Masse oscillante (type volant d'inertie) ;
- Bras oscillant ;
- Flotteur articulé ;
- Flotteur simple (bouée immergée ou non) ;
- Systèmes à déversement / surverse ;
- Tube à onde de renflement (encore très conceptuel).



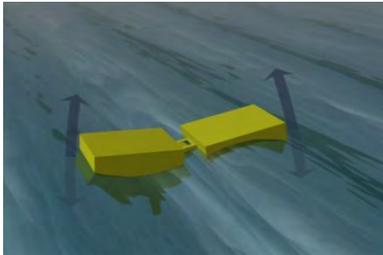
Colonne d'eau oscillante



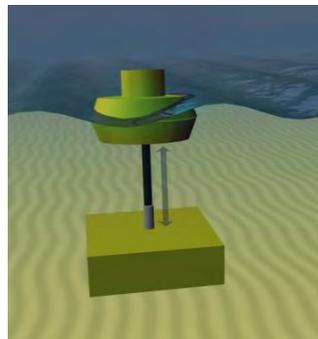
Masse oscillante



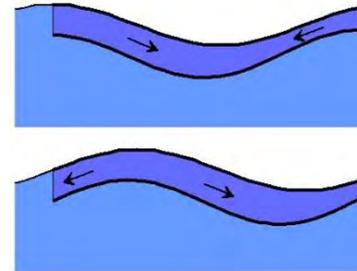
Bras oscillant



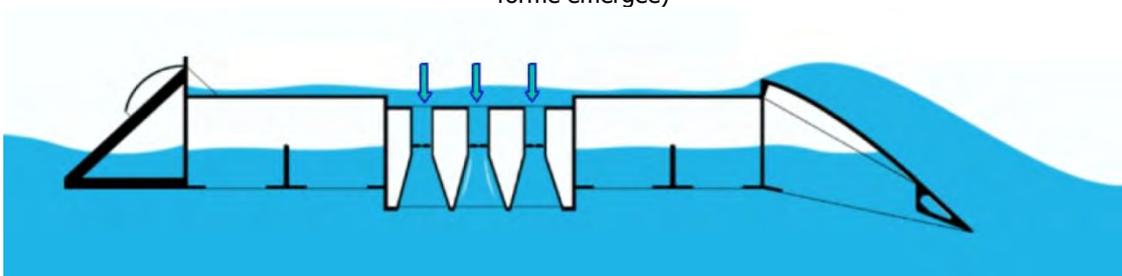
Flotteur articulé



Flotteur simple (présenté ici sous forme émergée)



Tube à onde de renflement

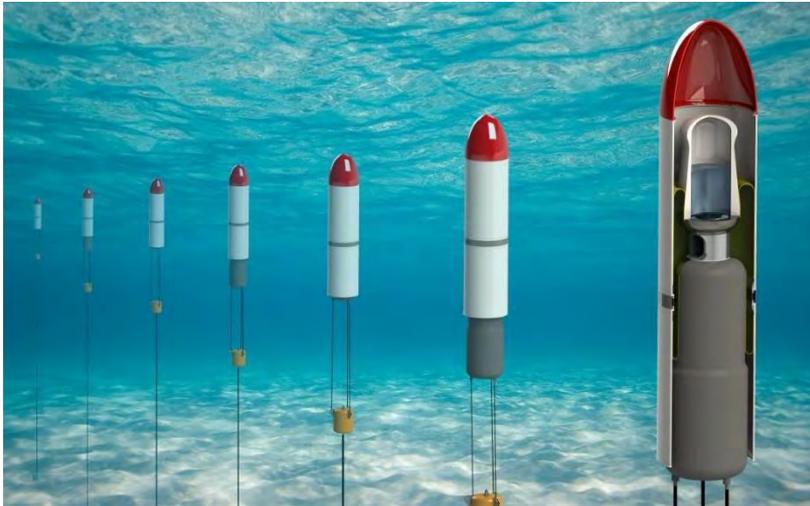


Système à déversement

Figure 14 : Classement des systèmes houlomoteurs selon le type de mécanisme. Source : banque d'image AQUARET, University of Southampton, WaveDragon

L'installation peut être située sur la côte (on shore), dans la bande côtière maritime (near shore) ou au large (offshore), être émergée ou immergée, être flottante (avec ancrages) ou posée sur le fond marin. Certains systèmes peuvent se décliner en plusieurs de ces variantes (exemple figures ci-après).

Figure 15 : différentes présentations de systèmes houlomoteurs reposant sur la technologie de la colonne d'eau oscillante (OWC en anglais : Oscillating Water Column)



Système OWC immergé (développé par le projet WetFeet)



Système OWC flottant partiellement émergé (« SparBuoy » développé par l'Institut Technique Supérieur de l'Université de Lisbonne – prototype échelle 1/16<sup>e</sup>)



Système OWC sur plateforme flottante (« OceanEnergy buoy » développé par la société irlandaise New Wave Technologies Limited – prototype échelle 1/4)



Système OWC posé sur le fond marin (centrale pilote de Yongsoo sur l'île de Jeju en Corée du Sud, développée par le Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO). D'une puissance de 500 kW, elle alimente le réseau électrique de l'île depuis juin 2016.



Système OWC onshore (centrale pilote de l'île d'Islay en Ecosse dénommée « LIMPET ». D'une puissance de 500 kW, elle alimente le réseau électrique de l'île depuis l'an 2000.

### e) Quelques exemples de réalisations

Ne sont présentés ici que les systèmes en service en 2017-2018 et dont la vocation est la production électrique. En effet, il existe des systèmes développés spécifiquement pour le pompage d'eau de mer, pour la production d'eau douce par désalinisation ou encore pour l'alimentation de systèmes autonomes de type bouées de balisage maritime ou bouées instrumentées.

Parmi les presque 250 développeurs de technologies houlomotrices recensés, seule une trentaine est parvenue à un stade de maturité technologique avancé. C'est à dire que le système répond à au moins un des critères suivants :

- Prototypage testé en mer de dimensions ou de puissance déjà significatives ;
- Prototypage testé en mer à échelle réelle (démonstrateur) ;
- Centrale pilote connectée au réseau ;
- Contrats de commercialisation signés ou livrés.

Les technologies arrivées à ce stade sont présentées dans le Tableau 1.

Globalement, on peut retenir les éléments suivants :

- Le système à flotteur simple émergé de type bouée offshore, le plus répandu et le plus étudié, semble néanmoins être le plus difficile à concrétiser. Parmi les 30 systèmes les plus au point, cette famille est la moins mature : aucune société n'est parvenue au stade de prototype à échelle industrielle testé en mer. Ceci tient au fait que cette famille technologique implique des unités de très grandes dimensions relativement à la puissance produite : une à plusieurs dizaines de mètres pour des puissances de quelques dizaines de kW à maximum 100 kW.
- A l'inverse, le système à colonne d'eau oscillante semble le mieux maîtrisé : c'est le plus répandu parmi les réalisations opérationnelles.
- Les flotteurs submergés ou les flotteurs sur plateforme ou sur digue semblent également plus facilement opérationnels : les projets reposant sur ces technologies ont atteint des phases de développement plus avancées que les autres (en termes de taille et d'équipement, d'ancienneté ou de maturité commerciale).

Tableau 1 : Technologies houlomotrices de stade avancé

Type de système houlomoteur	Exemples
<b>Colonne d'eau oscillante</b>	<p><u>Centrales pilotes à terre raccordées au réseau :</u>            Port de Sakata, Japon – 60 kW – 1990            Islay, Ecosse, GB – 500 kW - 2000            Shanwei, Chine – 100 kW – 2001            Port de Mutriku, Espagne – 296 kW – 2011            Yongsoo, Ile Jeju, Corée du Sud – 500 kW – 2016</p> <p><u>Unités offshore en développement :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unité Drakoo développé par <b>Hann Ocean</b> (Hong Kong), 10 kW en développement.</li> <li>• Bouée MARMOK-A-5 développé par <b>Oceantec Energias Marinas SL</b> (Espagne), 30 kW connecté au réseau sur le site de test du PLOCAN, Canaries.</li> </ul>
<b>Masse oscillante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bouée « Penguin » développé par Wello OY (Finlande). Prototype taille réelle de 600 kW testé en mer et connecté au réseau depuis 2012 à l'EMEC, Ecosse.</li> <li>• Plateforme flottante de 300 kW développée par le Korea Research Institute of Ships &amp; Ocean Engineering (<b>KRISO</b>), construite en 2016. Déploiement en mer sur l'île de Jeju prévu pour 2018.</li> </ul>
<b>Bras oscillant</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Centrale connectée au réseau de 100 kW sur l'île <b>Daguan</b>, province de Shandong, Chine depuis sept. 1999 du National Ocean Technology Center de Tianjin.</li> <li>• Démonstrateur de 3x100 kW sur l'île de <b>Shenghan</b>, Chine, dans le cadre d'un projet pilote d'île autonome incluant 150 kW éolien, 50 kW biomasse, et 25 kW de thermique solaire.</li> <li>• Démonstrateur de 300 kW du KRISO construit en 2016, déploiement et connexion au réseau prévu en 2018 à <b>Yongsoo</b>, Corée du Sud.</li> <li>• Système flottant avec membrane plastique et turbine à air « mWave » de la société <b>Bombora Wave Power</b> (Australie). En novembre 2017, commande de la société ENZEN pour une unité de son prototype flottant échelle 1/2 (déjà testé en 2015) à déployer à Albany, WA.</li> <li>• Système immergé « WaveRoller » de la société <b>AW Energy</b> (Finlande) testé dès 2005 à l'EMEC, Ecosse.</li> <li>• Système « Volta » entièrement en Polyéthylène de la société <b>Polygen Ltd</b> (GB), déployé à échelle réelle en 2015 au FabTest, Falmouth.</li> </ul>
<b>Flotteur articulé</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plateforme flottante « Sharp Eagle Whanshan » de <b>l'Académie des Sciences de Chine</b>, de 120 kW mise en service en 2015.</li> <li>• Plateforme flottante éolien en mer + houlomoteur de la société <b>Floating Power Plant</b> (Danemark), dont le prototype P37, de 37 m de large à échelle 1/2 (33 kW vent / 50 kW vague) a passé les tests en mer.</li> <li>• <b>PELAMIS</b> : développé depuis 1998 par la société Pelamis Wave Power Ltd, le système aura évolué en 3 versions successives d'échelle industrielle, avec 2 commandes des sociétés Enersis (Espagne) et E.ON (GB), le tout soldé par la faillite de la société en 2014 et la reprise du dernier prototype le P2-002 par Wave Energy Scotland (organisme public lié à l'EMEC).</li> </ul>
<b>Flotteur simple</b>	<p><u>Flotteurs immergés :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Carnegie Ltd</b> (Australie) et son système CETO 6 de 1 MW.</li> <li>• <b>SeaBased AB</b> (Suède) et ses 2 parcs pilotes : 35 unités / 1 MW connecté au réseau en 2015 à Sotenas, Suède et 6 unités / 180 kW connecté au réseau en 2015 à Ada Foah, Ghana.</li> </ul> <p><u>Flotteurs émergés :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Centrale pilote connectée au réseau à Bukchon, Ile Jeju, Corée du Sud – 2 unités pour 135 kW – 2015, développée par la société <b>INGINE</b> (Corée du Sud).</li> <li>• « Azura » de la société <b>Northwest Energy Innovations</b> (Nlle Zélande) : prototype 18 kW testé en 2015 au WETS, Hawaii.</li> <li>• « BOLT Lifesaver » de la société <b>Fred Olsen Ltd</b> (Norvège) : prototype échelle réelle 30 kW (50 kW nominal) testé 1 an en mer en 2017 au WETS, Hawaii.</li> <li>• « Undigen W200 » de la société <b>Wedge Global SL</b> (Espagne) : prototype 200 kW testé en 2015 au PLOCAN, Canaries.</li> <li>• « C3 » de la société <b>CorPower Ocean AB</b> (Suède) : prototype échelle 1/2 puissance inconnue en test en 2018 à l'EMEC, Ecosse.</li> <li>• « WaveEL-buoy » de la société <b>Waves4Power AB</b> (Suède) : prototype v3.0 puissance 100 kW testé en 2017 à Runde, Norvège.</li> </ul> <p><u>Sur digues ou pontons :</u></p>

Type de système houlomoteur	Exemples
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• « Wave Clapper Power Wing » de la société <b>Eco Wave Power</b> (Israël) : démonstrateur de 10 kW à 8 flotteurs installé en 2016 à Gibraltar.</li> <li>• Unité prototype de puissance inconnue installée fin 2015 au port d'Heraklion, Grèce par la société <b>Sinn Power</b> (Allemagne). Contrat pour une ferme pilote de 21 unités au Cap Vert en 2018.</li> </ul> <p><u>Plateformes sur pieux :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• « <b>WaveStar</b> » de la société danoise éponyme. Plateforme de 600 kW à 2 flotteurs connectée au réseau danois depuis février 2010 à Hanstholm.</li> <li>• Version coréenne de 30 kW construite et installée près de Hupo-hang en mer de l'Est, Corée par la société <b>Hwa-Jin Enterprise</b>. Même conception que WaveStar mais avec 6 flotteurs.</li> </ul>



Figure 16 : Centrale de Mutriku de 296 kW (Espagne) et de Bukchon, île de Jeju, 135 kW (Corée du Sud)



Figure 17 : démonstrateur EcoWave Power 10 kW à Gibraltar (Espagne) et WaveStar 600 kW à Hanstholm (Danemark)



Figure 18 : Prototype P37 Floating Power Plant de 33 kW vent + 50 kW houle (Danemark) et une des 3 unités de 100 kW installé sur l'île de Shengshan (Chine)



Figure 19 : système « Volta » de Polygen Ltd (Grande Bretagne) et prototype échelle 1/2 « mWave » de Bombora Wave Power (Australie)



Figure 20 : Bouée « Penguin » Wello OY (Finlande) de 500 kW en Ecosse et « Undigen W200 » Wedge Global (Espagne) de 200 kW aux Canaries

## f) Conclusion et perspectives

La filière de l'énergie de la houle présente la particularité de rassembler un grand nombre de concepts différents permettant de nombreuses combinaisons et variantes. Les brevets se comptent par milliers. C'est **la filière** des énergies marines **la plus diversifiée**.

Les développeurs sont autant issus du secteur public (universités et collectivités locales) que privé. Les acteurs privés se distinguent des autres énergies marines par leur forte spécialisation, contrairement à l'hydrolien ou à l'éolien où les sociétés se positionnent sur d'autres domaines déjà mûres (hydraulique fluviale, éolien à terre, motorisation, générateurs, etc.). Ici, les entreprises ne se positionnent souvent que sur le développement de systèmes houlomoteurs, y consacrant tous leurs efforts. Il en résulte une plus grande fragilité économique. Ceci ajouté aux difficultés inhérentes au secteur (temps de développement long, concepts novateurs à éprouver, aléas importants du milieu marin, milieu agressif pour les systèmes et les matériaux) explique que très peu de projets aboutissent jusqu'à une réalisation opérationnelle grande nature. Les projets se succèdent sans jamais vraiment se ressembler.

Ainsi, la faiblesse de cette filière est sa **difficulté à pérenniser dans le temps les technologies développées et le savoir-faire gagné par les acteurs**. C'est la puissance publique qui vient garantir la continuité des projets à travers son soutien aux programmes de recherche universitaire ou à travers la réalisation d'unités pilotes. En Asie notamment (Corée du Sud, Chine, Japon), des programmes orientés sur l'indépendance énergétique en milieu insulaire ont abouti à des **réalisations particulièrement ambitieuses et prometteuses**.

L'autre particularité de cette filière est la **taille souvent imposante** des machines par rapport à la puissance produite (de l'ordre de 10 à 100 kW/unité). C'est une contrainte majeure d'implantation.

### 1.1.3. Energie des courants marins ou énergie hydrolienne

#### a) Qu'est-ce que l'énergie hydrolienne ?

##### *Différents types de courants marins*

---

L'énergie hydrolienne est l'énergie des courants marins. Les courants marins sont un déplacement de particules d'eau caractérisés par leur vitesse et leur direction d'écoulement.

Ils sont formés par différents phénomènes à plusieurs échelles géographiques :

- A l'échelle du globe, la **force de Coriolis** provoquée par la rotation de la Terre dévie les courants.
- Les forces gravitaires de la Lune et du Soleil créent les **courants de marée**.
- Les **différences de température et de salinité** créent des déplacements des différentes couches de masses d'eau : ce sont les circulations thermohalines. Les eaux plus froides et plus salées sont plus denses et coulent, tandis que les masses d'eau plus chaudes ou plus douces remontent. Ceci crée des courants de profondeur (+ 800 m de fond).
- Le **vent** crée des courants en surface des masses d'eau.
- Enfin la **houle** génère des courants à différentes échelles :
  - mouvements oscillatoires générés par le passage des ondes (cf Figure 4 page 16),
  - courant généré par le déplacement des particules d'eau dans la zone de déferlement (appelé « dérive littorale »),
  - courants de reflux provoqués par la réfraction de la houle à la côte.

##### *Les courants de marée privilégiés pour l'exploitation de l'énergie hydrolienne*

---

Les courants exploités pour l'énergie hydrolienne sont la plupart du temps les courants générés par la marée. D'une part car ce sont des courants aux vitesses généralement fortes, et d'autre part car ils sont réguliers et prévisibles.

Comme pour l'énergie éolienne, la puissance théorique exploitable est **fonction de la vitesse d'écoulement du courant et de la surface balayée par la turbine** :

$$P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$$

où  $\rho$  : masse volumique de l'eau, S : surface balayée, V : vitesse d'écoulement.

### b) Ressource minimale nécessaire pour l'exploitation des courants marins

Produire de l'énergie à partir des courants marins **requiert des vitesses de courants assez élevées, généralement comprises autour de 2 à 3 m/s**. La puissance produite augmente avec la vitesse du courant.

Les plages de fonctionnement des hydroliennes s'étendent de 0,5 à 1,5 m/s (vitesse minimale de démarrage) et vont pour certaines jusqu'à 4 - 5 m/s (arrêt de la machine au-delà de cette vitesse maximale). Les plages individuelles de chaque machine sont toutefois généralement plus réduites.

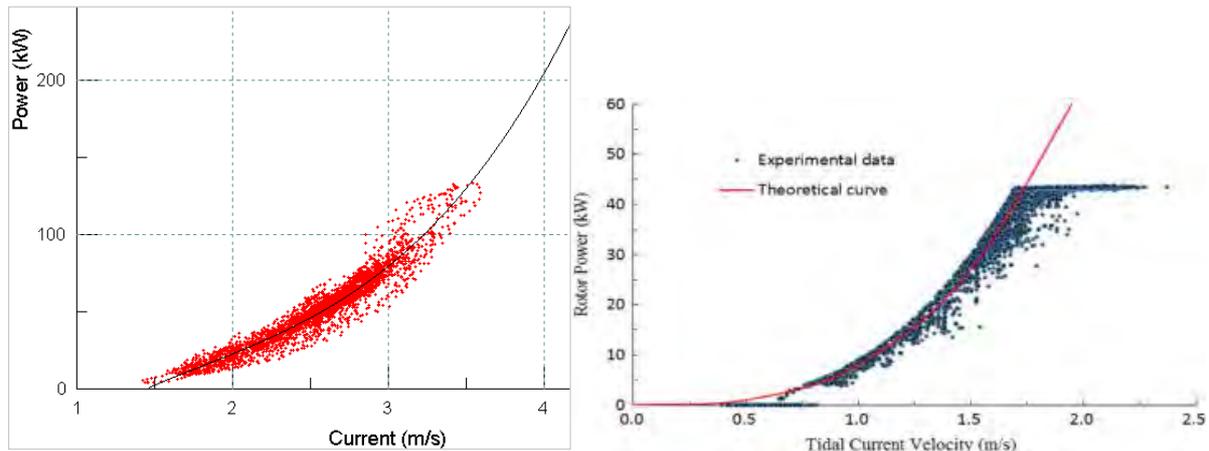


Figure 21 : Exemple de courbes puissance/vitesse d'hydroliennes : centrale d'Uldolmok en Corée du Sud, de 1,5 MW de puissance nominale totale (à gauche), et hydrolienne expérimentale testée en Chine, avec une plage de fonctionnement ciblée sur des vitesses plutôt faibles, ce qui n'est pas le cas le plus courant (à droite). Sources : KIOST 2017, Xu et al. 2015.

### c) Quelle différence avec l'énergie marémotrice ?

Strictement, l'énergie marémotrice peut se présenter sous forme d'énergie potentielle (différence de niveau d'eau provoqué par la marée) ou d'énergie cinétique (courants de marée) :

- L'exploitation des courants de marée relève de l'énergie hydrolienne, dans le sens où ce terme regroupe l'exploitation des courants de toute nature.
- Le terme marémoteur est réservé à l'exploitation de l'énergie potentielle de la marée.

Une usine marémotrice est constituée d'un bassin généralement créé au sein d'une baie et fermé par une digue. Le bassin se remplit naturellement à marée montante. Une fois rempli, il est vidé et l'eau est turbinée. Les applications de ce type sont assez restreintes. Elles nécessitent des conditions géographiques très particulières et un marnage élevé.

#### d) Cinq grandes familles de technologies hydroliennes

Cinq grandes familles de technologies hydroliennes existent :

- Turbines à axe horizontal ;
- Turbines à axe vertical ;
- Tubes à effet Venturi ;
- Vis d'Archimède ;
- Ailes portantes ou hydrofoil en anglais.

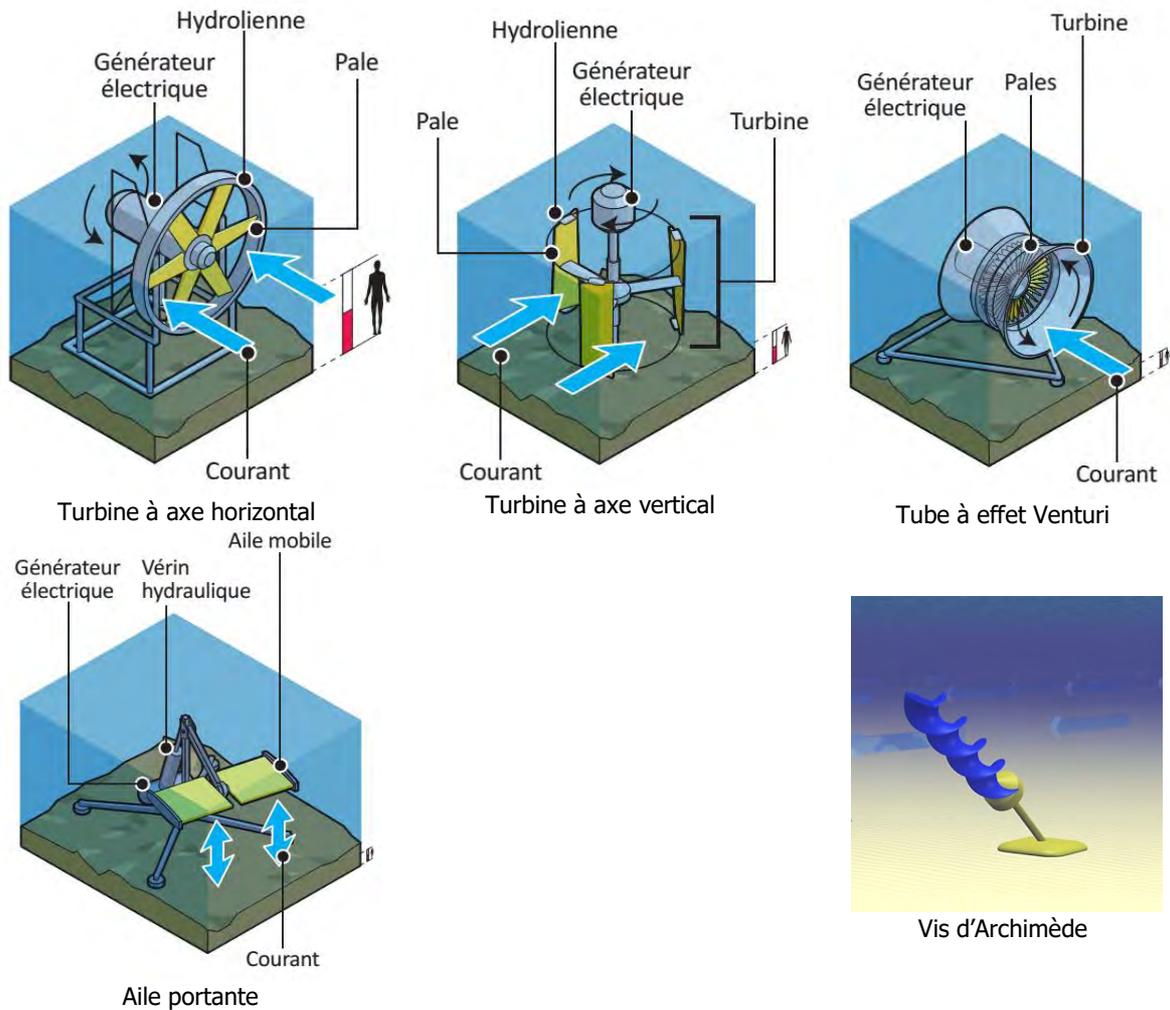


Figure 22 : familles de systèmes hydroliens. Source : Syndicat des Énergies Renouvelables / banque d'image AQUARET

#### e) Quelques exemples de réalisations

Parmi la centaine de développeurs de technologies hydroliennes recensée, seule une vingtaine est parvenue à un stade de maturité technologique avancé. Par ce terme, nous entendons au moins d'un des critères suivants :

- Prototype testé en mer de dimensions ou de puissances déjà significatives ;
- Prototype testé en mer à échelle réelle (démonstrateur) ;
- Centrale pilote connectée au réseau ;
- Contrats de commercialisation signés ou livrés.

Parmi les technologies arrivées à ce stade, on compte :

Tableau 2 : Technologies hydroliennes de stade avancé

Type de système hydrolien	Exemples
<b>Turbine à axe horizontal</b>	<p><u>Parc pilote raccordé au réseau :</u>  <b>Meygen</b>, Pentland firth, Ecosse - 6 MW - 2016.            2x1.5 MW, turbine « HS1500 » de la société <b>Andtriz Hydro Hammerfest</b> (Norvège)            2x1.5 MW, turbine « AR1500 » de la société <b>Atlantis Ressource Corporation</b> (GB).</p> <p><b>Plateforme</b> connectée au réseau <b>sur l'île de Xiushan</b>, municipalité de Zhoushan, province de Zhejiang, construite en 2016, 2 turbines installées de 400 kW + 600 kW pour une capacité prévue de 7 turbines - 3.4 MW.</p> <p><u>Démonstrateurs :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydrolienne « D10 » de 1,1 MW (à 4 m/s ; 500 kW à 3 m/s) du constructeur <b>Sabella</b> (France). Immergée et connectée au réseau électrique de l'île d'Ouessant en 2015. En maintenance préventive fin 2017, elle doit retourner sur site en février-mars 2018.</li> <li>• Plateforme flottante de 500 kW développée par <b>WaterWall Turbine Inc</b> (Canada), installée en 2016 sur l'île de Dent dans le cadre d'un microgrid insulaire alimentant un hôtel isolé (Dent Island Lodge).</li> <li>• Turbine CORMaT de 500 kW développée par <b>Nautricity</b> (GB), connectée au réseau depuis 2017 à l'EMEC, Ecosse.</li> <li>• Turbine flottante SR2000 de 2 MW développée par <b>Scottish Renewables</b> (GB), connectée au réseau depuis août 2017 à l'EMEC, Ecosse.</li> <li>• Turbine PLATO à flotteur submergé ancré de 100 kW développée par <b>Sustainable Marine Energy</b> (GB), testée en 2017 à l'EMEC, Ecosse.</li> <li>• Plateforme flottante PLAT-I de 280 kW de <b>Sustainable Marine Energy</b> (GB), testée fin 2017 à Connel, Ecosse, avant démontage et installation commerciale pilote connectée au réseau aux Philippines pour le compte de la société ENVIROTEK Pte Ltd.</li> <li>• Plateforme flottante pour hydroliennes « Universal Foundation System (UFS) » développée par <b>Tocado</b> (Pays-Bas), en test à l'EMEC depuis 2017 avec une turbine Tocardo T2 de 240 kW. C'est la première étape d'un parc pilote de 8 turbines aux Wall of Farness tidal energy site à l'EMEC, Ecosse. L'entreprise dispose déjà de plusieurs installations commerciales raccordées au réseau aux Pays-Bas sur des digues : parc de 3 turbines T1 (total : 300 kW) installé en 2015 à Afsluitdijk, parc de 5 turbines T2 (total : 1,2 MW) installé en 2016 à Eastern Scheldt.</li> <li>• Nombreux démonstrateurs développés depuis 2005 par <b>l'Université de Zhejiang</b>, en Chine. Notamment <b>plateforme</b> avec 2 turbines (60 kW en 2014 puis 120 kW en 2015) près de <b>l'île de Zhairuoshan</b>, municipalité de Zhoushan, province de Zhejiang.</li> </ul>
<b>Turbine à axe vertical</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydrolienne flottante « <b>KOBOLD</b> » développée par l'Institut National Italien de Test et d'Etude d'Architecture Navale. D'une puissance de 25-30 kW à 2 m/s, le prototype est installé en 2001 dans le détroit de Messina en 2001. Il a été raccordé au réseau national en 2005.</li> <li>• <b>Centrale pilote d'Uldolmok</b>, province de Jeollanam-do, Corée du Sud. Mise en service et connectée au réseau en 2009, de 1 MW + 500 kW en 2011, et développée par le Korea Institute of Ocean Science &amp; Technology (KIOST).</li> <li>• Centrales flottantes « <b>Wanxiang I</b> » (70 kW – 2002 – chenal de Guishan) et « <b>Wanxiang II</b> » (40 kW – 2005 – chenal de l'île de Duigangshan) testées à Daishan, province de Zhejiang, et développées par l'Université d'ingénierie de Harbin, Chine.</li> <li>• Barges flottantes « <b>Haineng I</b> » de 2 x 150 kW lancée en 2013 dans le chenal de Guishan par l'Université d'ingénierie de Harbin, Chine, complétée en 2015 par une deuxième centrale 2<sup>e</sup> génération, développée en collaboration avec la société Shanghai Daishan Power Technologies CO. Ltd. L'ensemble forme la centrale « <b>Haineng III</b> » d'une puissance nominale totale de 600 kW, connectée au réseau.</li> </ul>
<b>Vis d'Archimède</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Système développé par <b>Flumill</b> (Norvège), puissance inconnue, testé en mer en 2011 à l'EMEC sur le site de non connecté au réseau de Shapinsay Sound. Cette turbine est adaptée aux faibles vitesses de courant (&lt; 1 m/s). L'entreprise semble avoir malheureusement disparu en 2017.</li> <li>• L'entreprise <b>Jupiter Hydro</b> développe un système à 2 vis montées en V, mais le développement est moins avancé (échelle réelle pas encore atteinte).</li> </ul>
<b>Tube à effet Venturi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>OpenHydro</b> (Naval Energies, France) : Démonstrateurs au FORCE, baie de Fundy, Canada (1 unité 2 MW connectée au réseau depuis fin 2016, 2<sup>nde</sup> en 2018), à Paimpol Bréat (2x 1MW de début 2016 à fin 2017), en Ecosse à l'EMEC, et au Japon (1 unité prévue</li> </ul>

Type de système hydrolien	Exemples
	<p>à Goto pour 2018). Ouverture d'une usine de production d'hydroliennes en juin 2018 à Cherbourg, mais fermeture 1 mois plus tard et retrait de l'industriel Naval Energie de la filière hydrolienne. Contrats commerciaux pour des parcs en France (Raz-Blanchard, 7 unités de 2 MW, porté par EDF EN et lauréat en 2014 de l'Appel à Manifestation d'Intérêt de l'ADEME), au Pays de Galles (Morlais), en Ecosse (Brims), dans la Manche (Anglesey).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Hydroliennes « <b>MegaWattBlue</b> » de la société Guinard Energies (France). Leur particularité est de s'orienter dans le sens du courant. Plusieurs produits : « P66 » de 3,5 kW et « P154 » de 20 kW, en phase industrielle avec premières commercialisations, et le démonstrateur « P400 » de 250 kW à 3,6 m/s doit être immergé au Morbihan en début 2018.</li> </ul>
<b>Aile portante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Système « GEM » développé par <b>SeaPower Scrl</b> (Italie) : prototype taille réelle de 100 kW à 2,6 m/s testé en dans le lagon de Venise. Le système fonctionne avec des courants de faible vitesse (20 kW à 1,5 m/s).</li> <li>Prototype « DeepGreen » échelle réelle de 0,5 MW développé par <b>Minesto</b> (Suède), installée à Holy Head, Wales en 2018. Prototype plus réduit de 3 m testé en 2014 en Irlande du Nord.</li> </ul>



Figure 23 : Hydrolienne Andritz Hydro Hammerfest 1,5 MW et hydrolienne Atlantis Ressource 1,5 MW



Figure 24 : barges Haineng III d'une puissance totale de 600 kW (Chine) et centrale hydrolienne d'Uldolmok de 1,5 MW en Corée du Sud



Figure 25 : hydrolienne Open Hydro 2 MW installée en Baie de Fundy, Canada, et hydrolienne Sabella 1,1 MW



Figure 26 : hydrolienne Flumill (Norvège) et hydrolienne à aile portante SeaPower de 100 kW (Italie)

#### f) Conclusion et perspectives

Les projets les plus matures sont centrés sur des machines de **forte puissance** (du mégawatt au moins) adaptées **aux courants de marée de très fortes vitesses** (> 2 voire 3 m/s). Malgré de gros efforts déployés depuis plusieurs années en Europe et en Amérique du Nord, finalement peu de machines ont été installées pour des contrats de production d'électricité.

Par ailleurs, une partie des sites d'implantation ou de test se situe dans des **zones abritées** (baies, chenaux). Certaines technologies ne sont donc pas adaptées à des conditions plus exposées, en mer ouverte, et s'apparentent parfois plus à de **l'hydraulique fluviale**.

Quelques développeurs (notamment de systèmes à aile portante) travaillent sur des machines adaptées à de plus faibles vitesses de courant (1,5 à 2 m/s de vitesse moyenne pour le site de test « faibles vitesses » de Holyhead, Angleterre), mais ces systèmes sont aujourd'hui les moins matures.

### 1.1.4. Éolien en mer

#### a) Le vent : une ressource plus importante en mer qu'à terre

La ressource en vent en mer, au large, est plus constante en vitesse et direction, et offre des vitesses plus élevées. De plus, l'implantation en mer permet de s'affranchir des contraintes foncières, des impacts paysagers, des nuisances sur le voisinage (effet stroboscopique, bruit), ainsi que des turbulences néfastes aux machines créées par la végétation, le bâti, le relief, etc. (on parle de rugosité de surface des sols).

#### b) Ressource minimale en vent pour l'éolien en mer

L'éolien en mer requiert des vitesses de vent un peu plus élevées que ce qui est visé pour des parcs à terre, principalement parce que le surcoût d'une implantation en mer doit être compensé par une production plus importante. On considère généralement qu'il y a un potentiel lorsque les vitesses de vent à hauteur de moyeu sont au minimum de **7 à 8 m/s en moyenne annuelle** (Schwartz et al. 2010 - Lu et al. 2009). Il s'agit d'une première approche grossière : au-delà d'une simple valeur moyenne, l'estimation du productible d'un site nécessitera de connaître la distribution des vitesses de vent par classes de valeurs.

#### c) Éoliennes posées ou éoliennes flottantes

Il est admis que les éoliennes en mer dont les mâts reposent sur le fond marins sont limitées à des profondeurs d'environ 50 m. Toutefois, les parcs éoliens en mer actuels ne dépassent pas des profondeurs de 30 m.

Jusqu'à 30 m de fond, les fondations sont généralement de type monopile ou gravitaire. Au-delà, entre 30 et 50 m, les structures en châssis sont plus adaptées.

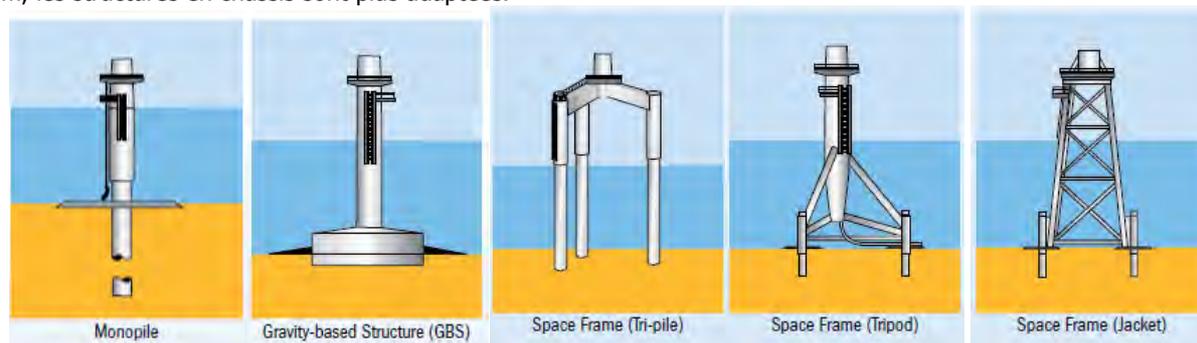


Figure 27 : Fondations offshore classiques. Source : EWEA 2013

Dans le domaine pétrolier, les plateformes offshore fixes posées au fond sont utilisées jusqu'à des profondeurs de 300 m. Bien que la profondeur d'implantation des parcs éoliens en mer n'ait cessé d'augmenter avec le temps (voir Figure 28 ci-après), il est peu probable que l'éolien en mer posé se développe au-delà des profondeurs 40-50 m. En effet, l'industrie se concentre désormais sur l'éolien flottant pour s'affranchir des contraintes de bathymétrie.

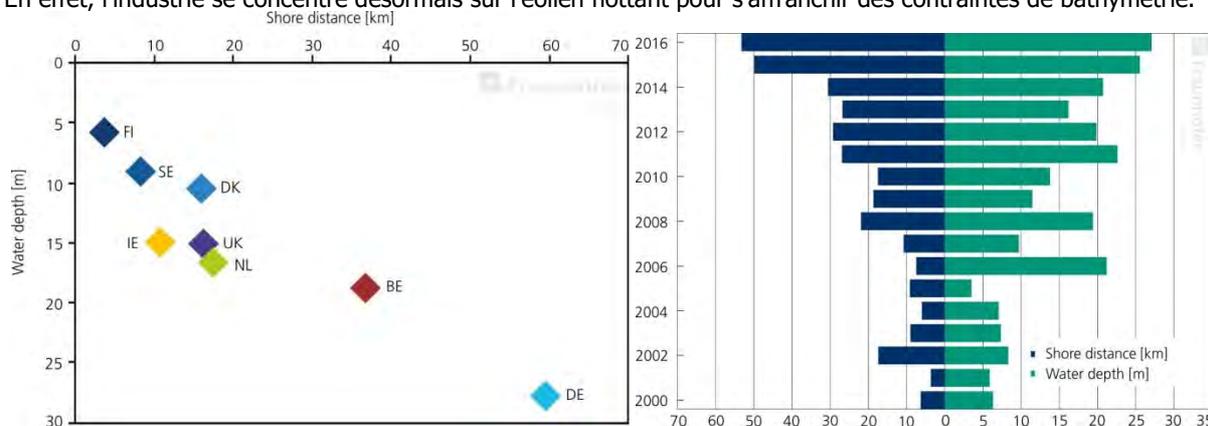


Figure 28 : distance à la côte et profondeur moyenne des parcs éoliens en mer européens en service, par pays (sauf éoliennes flottantes en test), à gauche : par pays, à droite : par année. Source : Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology

A la Réunion, la ligne bathymétrique des 50 m de profondeur se situe au maximum à 2 km des côtes dans le Nord et l'Ouest, et à environ 250-500 m de la côte au Sud et à l'Est (cf figure ci-après).

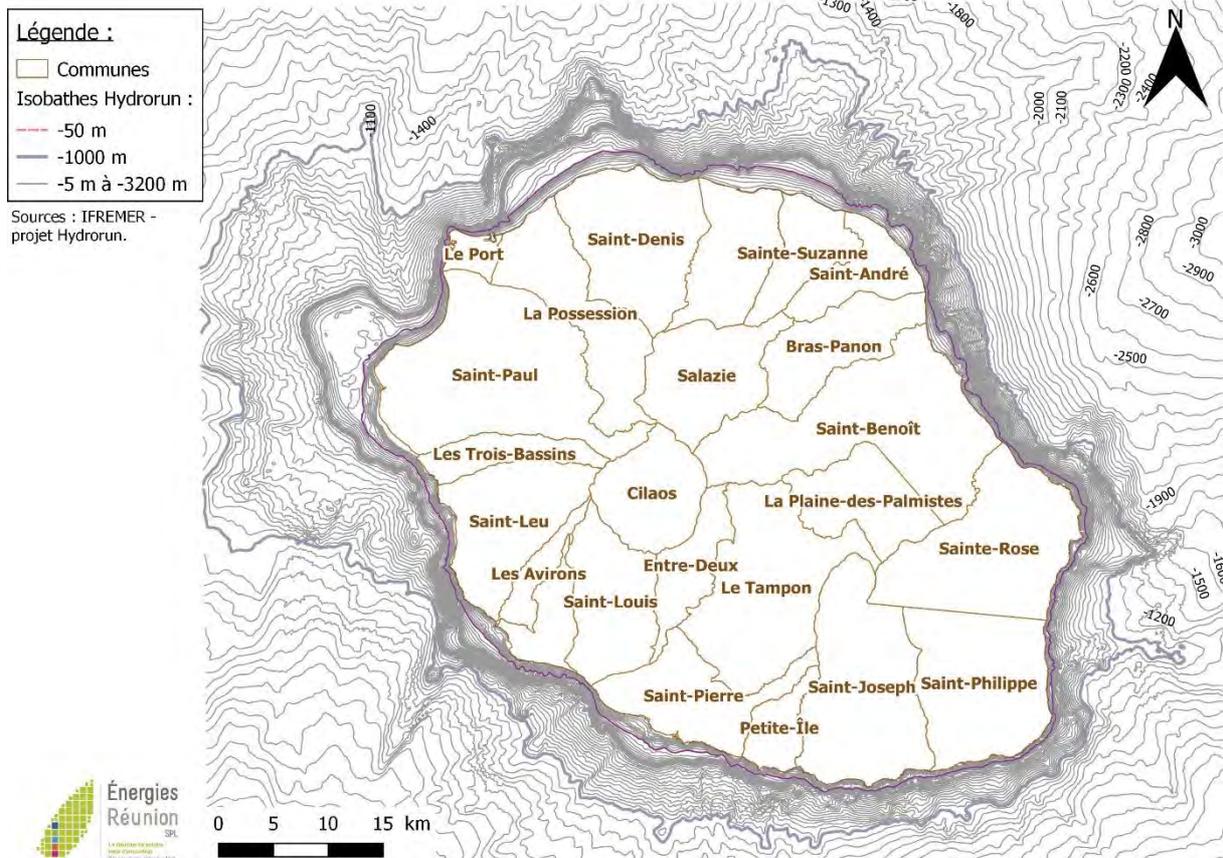


Figure 29 : Bathymétrie autour de la Réunion

La bande côtière de moins de 50 m de fonds est donc très étroite. La distance minimale à la côte d'un parc éolien en mer n'est pas réglementée en soi, mais elle est déterminée par les critères suivants :

- Distance de visibilité à la côte et impact visuel du parc. Ces éléments dépendent de la hauteur des éoliennes, de critères météorologiques et d'implantation (orientation du parc et alignement des éoliennes par rapport au soleil et à la côte, nébulosité de l'atmosphère) ;
- Présence de servitudes radio-électriques, aéronautiques, militaires, maritimes (ports) ;
- Présence de routes de navigation<sup>3</sup>.

A titre d'exemple, **France Energie Eolienne préconise une distance minimale à la côte de 10 km**. Les parcs les plus proches des côtes en Europe sont situés dans les 5-10 km de distance, à quelques exceptions près<sup>4</sup>.

En Grande Bretagne, le parc de Scroby Sands est implanté à 2,5 km de la côte, pour des éoliennes de 60 m de hauteur de nacelle et de 80 m de diamètre, soit une hauteur totale de 100 m. Ce parc date néanmoins de 2004, et comme indiqué en Figure 28, la distance moyenne à la côte tend à augmenter avec le développement de la filière.



Figure 30 : visibilité du parc éolien de Scroby Sands depuis la côte. Crédits : Lynn Lodge 2011

<sup>3</sup> Une note technique du Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer du 11/07/2016 existe à ce sujet.

<sup>4</sup> Source : Global Offshore Wind Farms Database, consultée en février 2018. Adresse URL : <http://www.4coffshore.com/offshorewind/>

On voit ainsi qu'à la Réunion, les zones adaptées à de l'éolien en mer posé (< 50 m de fonds) sont beaucoup trop proches des côtes et de leurs conflits d'usage. Par conséquent, **seule la technologie d'éolien en mer flottant est pour l'instant adaptée au territoire réunionnais.**

#### d) Etat de l'art de l'éolien flottant

L'éolien flottant est depuis quelques années en très fort développement. Les technologies sont aujourd'hui au stade de démonstrateurs, le premier parc a vu le jour en 2017 en Ecosse et d'autres devraient suivre dans les années à venir.

Les puissances unitaires actuelles s'étalent entre 2 et 7 MW. Trois grands types de flotteurs existent : la plateforme à câbles tendus (Tension Leg Platform – TLP), la plateforme semi-submersible (souvent en tripode), et le flotteur espar (Spar buoy).

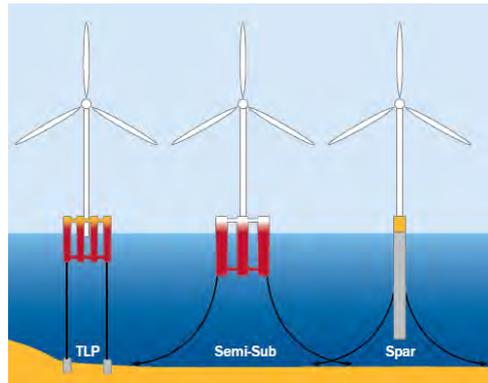


Figure 31 : Types de plateforme flottante pour éolienne en mer. Source : EWEA 2013

Le tableau ci-après présente les éoliennes flottantes les plus avancées actuellement, c'est-à-dire dont il existe des prototypes d'échelle réelle en mer.

Tableau 3 : Eoliennes flottantes de stade avancé

Nom de l'éolienne	Développeur	Lieu d'implantation	Avancement
<b>Floatgen</b>	Idéol	Site d'essais du SEM-REV au Croisic (France)	<b>Démonstrateur</b> de 2 MW construit en 2017, installé en mer en mai 2018. Localisation à 23 km des côtes et par 35 m de fond. Deux autres projets sont en développement : • Démonstrateur de 3 MW dans 50 à 100 m de profondeur au Japon. • Parc pilote de 24 MW en Méditerranée à Gruissan dans 55 m de profondeur.
<b>Hywind</b>	Technip et StatoilHydro	Karmoy (Norvège) Buchan Deep, au large de Peterhead (Ecosse)	<b>Démonstrateur</b> de 2,3 MW mis en service en 2009 en Norvège. <b>Parc</b> de 5 éoliennes de 6 MW mis en service en 2017 en Ecosse. Localisation à 25 km des côtes et par 95 à 120 m de fond.
<b>WindFloat 1</b>	Principle Power Inc.	Aguçadoura (Portugal)	<b>Démonstrateur</b> de 2 MW connecté au réseau national de 2011 à 2016, par 40-45 m de fonds. L'éolienne a été démontée pour passer à l'étape suivante : la version 2 de 8 MW.
<b>Goto FOWT</b>	TODA Corp., Hitachi Ltd., Fuyo Ocean Development Engineering Co. Ltd., Kyoto University, National Maritime Research Institute	Ile de Goto, préfecture de Nagasaki (Japon)	<b>Démonstrateur</b> de 2 MW mis en service en en 2015 à 10 km des côtes et par environ 90 m de fonds.

Nom de l'éolienne	Développeur	Lieu d'implantation	Avancement
<b>Mirai, Shimpuu, et Hamakaze</b>	Fukushima Offshore Wind Consortium, (incluant Mitsubishi Heavy Industry)	Fukushima (Japon)	<p><b>3 démonstrateurs différents</b> installés à 20 km des côtes et par 100 à 125 m de fonds :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Turbine de 2 MW (Fukushima Mirai) montée sur flotteur tripode semi-submergé, substation flottante (Fukushima Kizuna) et câble sous-marin installés fin 2013.</li> <li>• Turbine de 7 MW (Fukushima Shimpuu) sur flotteur semi-submergé en V, en 2015.</li> <li>• Turbine de 5 MW (Fukushima Hamakaze) sur flotteur espar en 2016.</li> </ul>



Figure 32 : parc éolien en mer flottant de 30 MW à Buchan Deep, Ecosse, inauguré en 2017. Crédits : Statoil Hydro



Figure 33 : à gauche, éolienne flottante « Floatgen » en remorquage en 2018 à Saint-Nazaire. Crédits : Idéol – à droite, éolienne flottante « WindFloat 1 » au Portugal. Crédits : Principle Power Inc.



Figure 34 : Fukushima Mirai (2 MW-2013) et flotteur de Fukushima Shimpuu sans la turbine (7 MW-2015).  
Crédits : Fukushima Offshore Wind Consortium



Figure 35 : Fukushima Hamakaze (5 MW-2016) et éolienne de Goto (2 MW-2015). Crédits : Fukushima Offshore Wind Consortium & Goto FOWT

S'agissant de la résistance de ces éoliennes aux **conditions extrêmes de vent** :

La **Commission Electrique Internationale** (IEC) définit, dans sa norme IEC 61400-1 (Normes de conception), trois classes de turbines éoliennes selon les conditions de vent auxquelles l'éolienne doit faire face. Plusieurs catégories sont définies suivant la vitesse du vent extrême de référence (T, I, II ou III) et l'intensité des turbulences (A, B, C), indiquée en indice (par exemple classe I<sub>B</sub>). L'édition de 2016 de la norme a ajouté des critères pour intégrer les conditions cycloniques (classe T).

Tableau 4 : classes de turbines éoliennes suivant les conditions de vent (d'après IEC 61400-1 édition 2016)

Classe IEC		T	I	II	III	S ou IV
Vitesse à hauteur de moyeu (m/s)	Moyenne annuelle maximale	nd	10	8.5	7.5	Non normalisé : suivant les références du constructeur
	Vent extrême de référence, vitesse moyenne sur 10 mn	57	50	42.5	37.5	
	Rafale de période de retour de 50 ans (vitesse moyenne sur 3 secondes)	79.8	70	59.5	52.5	
Intensité de turbulence	0.16	A				
	0.14	B				
	0.12	C				

Tableau 5 : classification des dépressions, tempêtes et cyclones tropicaux (Météo France)

Dénomination	Dépression tropicale	Tempête tropicale <sup>5</sup>	Cyclone, ouragan ou typhon <sup>6</sup>
Vitesse du vent min. (km/h)	29	62	118
(m/s)	8	17.2	32.7

<sup>5</sup> Ou dépression tropicale modérée et forte pour la zone Pacifique sud et Océan Indien sud-est.

<sup>6</sup> La dénomination diffère selon la région mais le phénomène est le même.

Les éoliennes cycloniques rabattables **Vergnet** implantées dans les DOM-TOM sont de **classe II maximum**. C'est-à-dire qu'elles sont conçues pour résister à des vents extrêmes de 42.5 m/s en position non rabattue. Couchées, elles sont conçues pour résister jusqu'à 85 m/s (300 km/h).

L'éolienne flottante japonaise Hamakaze de 5 MW a été dimensionnée par **Hitachi** pour des vents extrêmes de 55 m/s, soit **au-delà de la classe I**, et une classe de turbulence A. Le constructeur vise à terme la classe T (57 m/s).

Le développeur français **Ideol** prévoit également une conception adaptée aux conditions cycloniques pour son éolienne flottante Floatgen, c'est l'objet d'un démonstrateur prévu au Japon en collaboration avec Hitachi.

#### e) Situation en France

En août 2015, un **appel à projets pour de l'éolien flottant** a été lancé. Les lauréats sont les suivants :

- le projet "Provence Grand Large" porté par EDF EN, avec des turbines Siemens et des flotteurs SBM/IPFEN, sur la zone de Faraman en Méditerranée qui se compose de 3 éoliennes de 8 MW ; stade concertation publique
- le projet "les éoliennes flottantes Golfe du Lion" porté par Engie/EDPR/CDC, avec des turbines GE et des flotteurs Eiffage/PPI, sur la zone de Leucate en Méditerranée qui se compose de 4 éoliennes de 6 MW ;
- le projet "les éoliennes flottantes de Groix" porté par Eolfi/CGN à Groix en Bretagne qui se compose de 4 éoliennes General Electric de 6 MW et de flotteurs de conception DNCS fabriqués en collaboration avec VINCI.
- le projet "Eolmed" porté par Quadran à Gruissan en Méditerranée qui se compose de 4 éoliennes Servinon de 6 MW et de flotteurs Bouygues Travaux Publics et Ideol.

En 2018, ces projets sont dans l'ensemble au stade d'études techniques et d'instruction des procédures réglementaires. La construction doit intervenir dans l'année 2019 pour une mise en service d'ici 2020/2021.

Un appel d'offres national pour **des parcs commerciaux d'éolien flottant est attendu**. La concertation entre l'Etat et les industriels était en cours en 2018. Six zones sont envisagées, 4 en Méditerranée et 2 en Bretagne, pour une puissance totale installée de l'ordre de 300 à 400 MW. Les industriels estiment qu'il faudrait mettre en service environ 3 GW d'éolien en mer flottant d'ici 2024 pour véritablement lancer la filière.

#### f) Conclusion et perspectives

L'éolien flottant est une nouvelle technologie qui permet de s'affranchir de certaines contraintes comme la profondeur des fonds marins, la houle côtière ou encore les usages existants des zones littorales. Ce secteur se développe très rapidement à partir des connaissances acquises sur l'éolien terrestre et l'éolien en mer posé sur fondations. Des démonstrateurs de plusieurs mégawatts sont déjà en production en Asie et en Europe. Les éoliennes développées au Japon par les sociétés japonaises (Hitachi, Mitsubichi, etc.) ou étrangères (Ideol) apporteront certainement des **solutions pour les zones cycloniques** dans les années à venir. L'intégration récente de classes spécifiques aux conditions cycloniques par les organismes normatifs internationaux illustre l'intérêt que porte le secteur éolien aux marchés situés dans ces zones à risques.

### 1.1.5. Energie thermique des mers

L'énergie thermique consiste à **exploiter la température de l'eau de mer**, laquelle varie avec la profondeur. Par abus de langage, le terme ETM désigne généralement le procédé de conversion de l'énergie thermique des mers en électricité. Néanmoins, l'électricité n'est pas le seul produit possible, il existe d'autres types de valorisations directes ou indirectes de l'énergie thermique.

Par conséquent, dans le présent rapport, nous utiliserons les termes :

- « énergie thermique des mers » pour désigner ou l'ensemble des applications énergétiques possibles de l'eau froide profonde pompée en mer, ou la source d'énergie que représentent les différentes masses d'eau stratifiées de la mer,
- « électricité ETM » ou « centrale électrique ETM » pour désigner l'application en production électrique,
- « production de froid par eau profonde » pour désigner l'ensemble des applications et technologies (SWAC, thalassothermie, hydromaréthermie, refroidissement industriel, etc.),
- « SWAC » ou « climatisation marine » pour désigner la production de froid à partir d'eau de mer profonde à des fins de climatisation de bâtiments, sans utilisation de machines thermodynamiques (avec de simples échangeurs de chaleur),
- « thalassothermie » pour désigner la production de froid et/ou de chaud à l'aide d'eau de mer avec l'aide de machines thermodynamiques.

#### a) Production d'électricité

Le principe consiste à pomper de l'eau à environ 5°C à 1000 m de profondeur, et de l'eau à environ 25°C en surface. **L'eau froide et l'eau chaude sont utilisées comme source froide et source chaude dans un cycle thermodynamique pour faire tourner une turbine électrique.** Il faut une différence de température d'au moins 20°C entre la source chaude et la source froide pour que le procédé soit intéressant. C'est donc une technologie adaptée aux **zones tropicales uniquement**, sauf à utiliser une source chaude de haute température (effluent industriel, géothermie).

Différents cycles thermodynamiques<sup>7</sup> existent pour produire de l'électricité à partir d'énergie thermique des mers.

- Cycle ouvert ;
- Cycle fermé :
  - Cycle de Rankine ;
  - Cycle Kalina ;
  - Cycle Uehara ;
- Cycle hybride ouvert/fermé.

Selon le cycle utilisé, les applications, les rendements et les contraintes ne sont pas les mêmes.

Dans tous les cas, l'eau chaude et l'eau froide sont pompées et rejetées en circuit ouvert. L'eau chaude et l'eau froide sont souvent mélangées avant rejet afin d'obtenir une température intermédiaire.

#### *Le cycle ouvert, pour une installation à terre valorisant l'eau pompée*

En cycle ouvert, le fluide de travail est l'eau chaude de surface. Elle est utilisée en boucle ouverte, selon les étapes suivantes :

1. **L'eau chaude est pompée**, elle passe dans un désaérateur. En effet, les gaz dissous dans l'eau pompée (oxygène, azote, CO<sub>2</sub>) doivent être éliminés car ils sont plus volatils que l'eau. Par conséquent, s'ils passent dans l'évaporateur, ils seront vaporisés à la place de l'eau, et non condensés, ce qui diminuerait le rendement de l'évaporation.
2. Puis, 0,5 % de la masse d'eau chaude est **vaporisée** dans un évaporateur flash<sup>8</sup>. Le faible rendement de cette évaporation explique pourquoi il faut des quantités d'eau plus importantes en cycle ouvert qu'en cycle fermé. Le condensat est constitué d'eau légèrement plus concentrée en sel.
3. La vapeur basse pression est **turbinée**. Cette turbine doit fonctionner sous vide.
4. La vapeur turbinée, de plus faible pression, est **condensée** pour revenir à l'état liquide. Pour cela, la vapeur turbinée est **refroidie à l'aide de l'eau froide profonde**. Selon le type d'échangeur utilisé, on peut produire de l'eau douce ou de l'eau salée. Dans un échangeur à contact, l'eau condensée est salée

<sup>7</sup> Dans un cycle thermodynamique, il s'agit de faire circuler en boucle un fluide qui va successivement passer de l'état liquide à l'état gazeux à travers 4 étapes principales : compression (↑pression), évaporation (liquide->gaz), détente (↓pression), condensation (gaz->liquide). Au cours des changements de phase, le fluide absorbe ou émet de la chaleur, ce que l'on peut exploiter. Au cours de la détente, on peut extraire de l'énergie électrique par turbinage.

<sup>8</sup> Flash évaporation : procédé qui consiste à vaporiser un liquide en diminuant la pression. L'autre procédé courant est la vaporisation par ébullition, donc par augmentation de la température, à l'aide d'une chaudière à vapeur.

lors du contact avec l'eau froide. Dans un échangeur à surface, il n'y a pas de contact avec l'eau froide salée. On peut donc produire de l'eau douce.

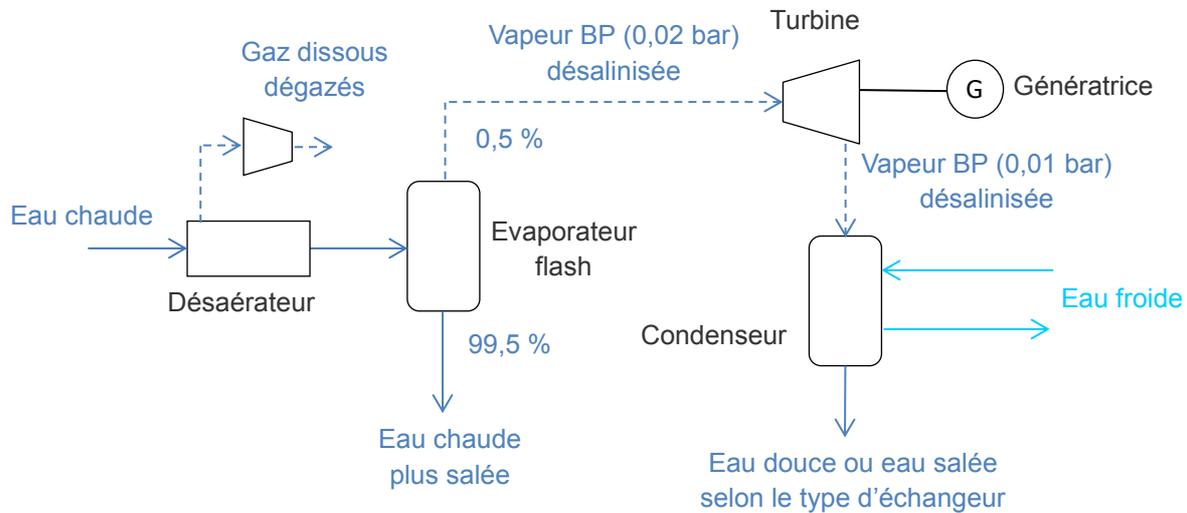


Figure 36 : schéma de principe du procédé de production d'électricité ETM en cycle ouvert.

Tableau 6 : avantages et inconvénients d'un cycle ouvert par rapport aux cycles fermés.

Avantages du cycle ouvert	Inconvénients du cycle ouvert
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement thermodynamique un peu plus grand que le cycle fermé.</li> <li>• Production d'eau douce possible directement si le condenseur est un échangeur à paroi.</li> <li>• Si échangeur à contact : <ul style="list-style-type: none"> <li>• évaporateur et condenseur moins onéreux,</li> <li>• meilleur transfert thermique car pas de pertes aux parois,</li> <li>• moins de salissures car surfaces plus faibles,</li> <li>• moins de pertes de charges,</li> <li>• moins encombrant.</li> </ul> </li> <li>• Pas de risque lié au fluide de travail.</li> <li>• Débits d'eau plus faibles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extracteurs d'air nécessaires pour dégazer l'eau avant évaporation.</li> <li>• Le maintien du vide est une contrainte technique majeure : <ul style="list-style-type: none"> <li>• le vide doit être parfait : toute fuite diminue le rendement,</li> <li>• le travail à très basse pression induit une turbine de grand diamètre : plus coûteuse et plus encombrante.</li> </ul> </li> <li>• 5 à 10 % d'énergie consommée par le dégazage et le maintien du vide.</li> </ul>

Le cycle ouvert est **plus adapté à une installation à terre**, pour les raisons suivantes :

- Parce qu'on travaille en basse pression, la détente dans la turbine est plus faible que lorsqu'on part d'une vapeur haute pression. Par conséquent, les pales de la turbine doivent être plus grandes, pour être entraînées plus facilement.
- Le cycle ouvert présente l'avantage de pouvoir **produire de l'eau douce**. Dans ce cas, il est plus pratique de réaliser le cycle thermodynamique à terre. En mer, il faudrait transporter l'eau douce jusqu'à la terre. Généralement, on ne désalinise qu'une partie de l'eau. Cela permet d'utiliser un échangeur à contact pour le flux principal, ce qui est plus pratique techniquement, et plus économique que les échangeurs à parois.

### Cycles fermés

Le cycle de base est le cycle de Rankine. Le fluide de travail peut-être un corps pur ou un mélange. L'ammoniac est le fluide le plus courant car ses propriétés thermodynamiques sont bien adaptées aux plages de températures

de l'énergie thermique des mers. Dans le cycle, l'eau chaude cède sa chaleur pour vaporiser l'ammoniac. L'eau froide récupère la chaleur libérée par la condensation de la vapeur turbinée.

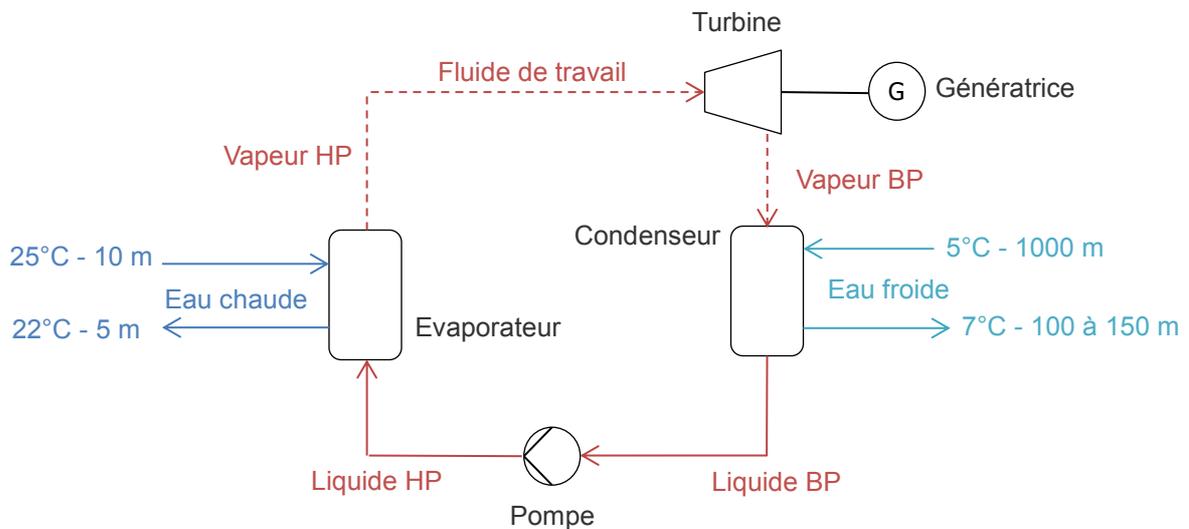


Figure 37 : schéma de principe du procédé de production d'électricité ETM en boucle fermée, selon le cycle de Rankine

Tableau 7 : avantages et inconvénients du cycle de Rankine.

Avantages du cycle fermé	Inconvénients du cycle fermé
Turbine plus petite	Echangeurs à surface nécessaires : davantage de salissures
Cycle thermodynamique bien mieux connu, technologie répandue dans d'autres domaines	L'ammoniac est agressif pour les matériaux

Le cycle de Kalina (1985) et le cycle d'Uehara (1994-1995) sont deux améliorations successives du cycle de Rankine. Dans les deux cas, le fluide de travail est un mélange d'eau et d'ammoniac. Ces cycles sont plus performants, mais aussi plus complexes et plus coûteux (plus de composants).

#### Quelques réalisations

1928 : à Ougrée **en Belgique**, Georges Claude, un inventeur français, valide le principe en produisant de l'électricité avec une machine thermique de 60 kW alimentée par de l'eau chaude à 33°C, puisée dans le circuit de refroidissement d'un haut fourneau, et par de l'eau froide à 12°C pompée dans la Meuse.

1929 : à **Cuba**, dans la baie de Mantazas, Georges Claude commence la construction d'une usine ETM à terre, avec la machine thermique de 60 kW utilisée en Belgique. Au cours de ce projet, **l'ingénieur cubain García Vásquez met au point une technique de mise à l'eau de la conduite, toujours utilisée aujourd'hui** : la conduite est mise à l'eau sur des rails, portée par flotteurs puis coulée. En septembre 1930, après de nombreuses difficultés, **l'installation fonctionne 11 jours, et produit 22 kW.**

1979 : **projet « Mini OTEC »** à Hawaii, mené par le Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority (NELHA) et les sociétés Lockheed Martin et Makai Ocean Engineering.

Il s'agit d'une centrale ETM flottante à cycle fermé, construite sur une barge reconvertie. La conduite d'eau froide mesurait 655 m de long pour 61 cm de diamètre. L'installation fonctionnera pendant 4 mois. Elle produisit 50 kW de puissance brute, et 15 kW de puissance nette.



Figure 38 : barge ETM "Mini-OTEC" au large d'Hawaii en 1979. Source : Yee Precast Design Group Ltd.

1981 : **centrale ETM à terre à Nauru**, par la Tokyo Electric Power Corporation (TEPCO).

La centrale est à cycle fermé et le fluide de travail est le fréon. Elle fonctionna plusieurs mois et produisit 31 kW nets, pour une puissance brute de 120 kW.



Figure 39 : timbres sur la centrale ETM sur l'île de Nauru, 1982. Source : Luis Vega.

1993-1998 : **prototype à terre en cycle ouvert** à Hawaii au NELHA.

La centrale atteignit un maximum de 255 kW électrique de puissance brute, pour une puissance nette de 100 kW et pour une production d'eau douce de 0,35 l/s. La centrale a été détruite en 1999 une fois les essais terminés.



Figure 40 : centrale ETM en cycle ouvert à Hawaii. Source : Luis Vega, NELHA.

2000 : projet de **centrale flottante de 1 MW entre le Japon et l'Inde.**

Dès 1997, un partenariat lie le National Institute of Ocean Technology (NIOT, Inde) et l'Université de Saga (Japon). En 2000, ils réalisent une centrale flottante à cycle fermé de 1 MW nommée « Sagar Shakthi ». La turbine ne sera finalement pas installée et le projet sera réorienté vers la désalinisation. La recherche du NIOT s'est ensuite concentrée sur la production d'eau douce par ETM en cycle ouvert.

2012 : **prototype à terre en cycle fermé DCNS – Région Réunion**, de 15 kW à l'IUT de Saint-Pierre, la Réunion.

2013 : **centrale pilote cycle fermé de 20 kW** à Jugwang-Myeon, comté de Goseong, Province de Gangwon, Corée du Sud, développé par le Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO). Il s'agit d'un prototype à échelle réduite d'un projet de centrale de 1 MW. Le fluide de travail utilisé est le difluorométhane ( $CH_2F_2$  ou R32).

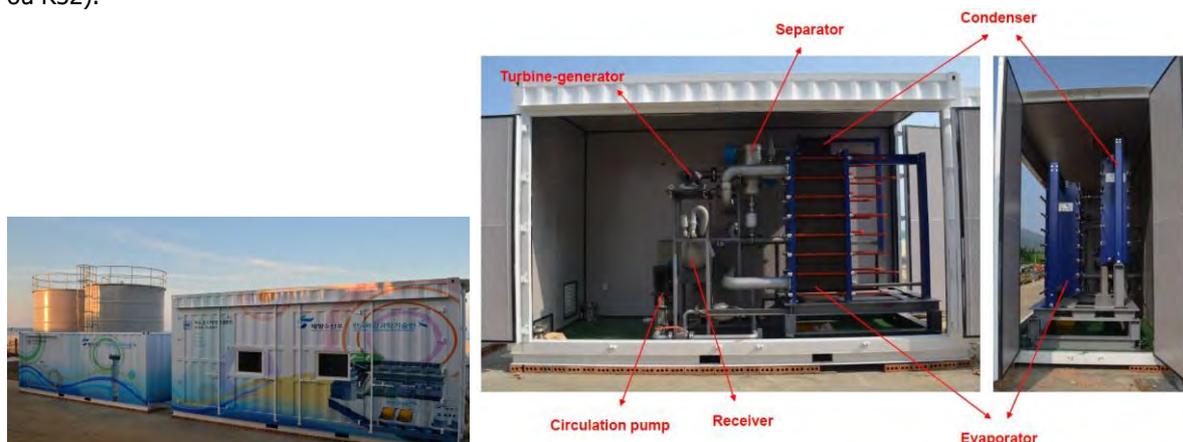


Figure 41 : centrale pilote ETM de 20 kW en Corée du Sud (2013). Source : KRISO

2014-2015 : **centrale pilote de 200 kW multi-sources** en cycle fermé de Rankine en Corée du Sud, à Goseong sur le site du KRISO. La source froide est l'eau de mer profonde, mais la centrale est conçue pour tester plusieurs options de source chaude sur site : eau de mer de surface, géothermie, centrale de cogénération de 500 kW à partir de copeaux de bois, eau chaude solaire.

2013 : **centrale pilote cycle fermé de 100 kW** sur l'île de Kume, Okinawa, Japon, développée par l'Institute of Ocean Energy de l'Université de Saga (IOES), Japon, et construite par les sociétés IHI Plant Construction, Xenesis

et Yokogawa Electric. La centrale est installée sur un site qui, comme le NELHA à Hawaii, comporte un centre de recherche (Okinawa Prefectural Deep Sea Water Research Center) et une pépinière d'entreprises (Okinawa Deep Sea Water Business Park).

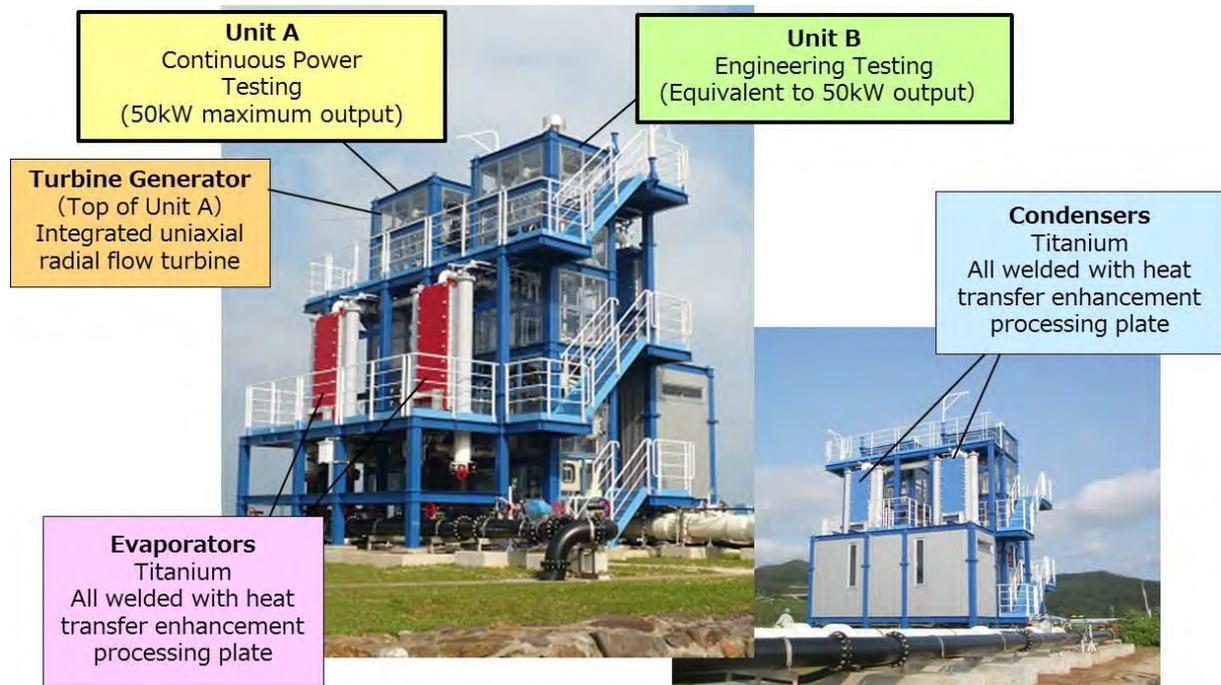


Figure 42 : centrale pilote ETM de 100 kW à Okinawa (2013). Source : Université de Saga

2015 : **centrale pilote en cycle fermé connecté au réseau** à Hawaii sur le site du NELHA.

En 2009, l'US Navy passe commande à la société Makai Ocean Engineering pour la conception et la réalisation d'une plateforme de test sur l'ETM et d'un laboratoire de recherche sur la corrosion marine. Les infrastructures ont été livrées en 2011 (laboratoire et plateforme de test des échangeurs). Fin 2014, une turbine de 100 kW a été ajoutée, et le centre est baptisé « Ocean Energy Research Center ». En août 2015, la centrale pilote ETM est connectée au réseau électrique de l'île.



Figure 43 : centrale pilote ETM de 100 kW du NELHA connectée au réseau (2015). Source : Makai Ocean Engineering

## Performances

Les performances des différents cycles sont définies ci-dessous :

Tableau 8 : performance des cycles thermodynamiques. Source : d'après P. Marchand, 1984<sup>9</sup>.

Paramètre	Définition	Cycle ouvert	Cycle fermé de Rankine	Cycle d'Uehara <sup>10</sup>
Efficacité théorique maximale	$\frac{\text{Travail net théorique}}{\text{Chaleur fournie par l'eau chaude}}$	7,4 %		/
Efficacité réelle	$\frac{\text{Travail net réel}}{\text{Chaleur fournie par l'eau chaude}}$	2,7 %	2,1 %	5 %
Rendement du cycle thermodynamique	$\frac{\text{Efficacité réelle}}{\text{Efficacité théorique max}}$	36,4 %	28,5 %	/

L'efficacité désigne le rapport entre énergie produite et énergie consommée. Par abus de langage, on la désigne souvent sous le terme de rendement thermodynamique. L'efficacité peut être supérieure à 1 (pompe à chaleur) ou inférieure à 1 (moteur).

L'efficacité théorique maximale prend en compte le travail net théorique. Dans le cas d'un cycle de Rankine, il s'agit du travail de la turbine, moins le travail de la pompe de compression du fluide de travail.

L'efficacité réelle prend en compte les pertes d'énergies : les pertes de chaleur dans les échangeurs, les pertes de charge. En cycle ouvert, il y a moins de pertes d'énergies grâce aux échangeurs à contacts (pas de pertes aux parois, moins de pertes de charges).

Le rendement désigne le rapport entre l'efficacité réelle et l'efficacité théorique maximale. Le rendement est compris entre 0 et 1.

L'efficacité globale prend en compte tout le procédé : cycle thermodynamique, pompage de l'eau en surface et en profondeur, pompes à vides pour le cycle ouvert, conversion d'énergie mécanique à énergie électrique par le turbo-alternateur. C'est le rapport de l'énergie électrique produite sur l'énergie électrique consommée. L'efficacité globale augmente de façon logarithmique avec la puissance de la centrale. Par contre, le procédé est assez sensible à la température : une variation de 1°C peut faire varier la puissance produite de 15 %.

## Débits d'eau

Les débits d'eau nécessaires pour une centrale électrique ETM sont importants : 3 à 5 m<sup>3</sup>/s/MWe par source (froide ou chaude). Il faut noter que le refroidissement industriel en circuit ouvert consomme environ 25 fois plus d'eau que le circuit fermé.

### b) Production d'eau douce

#### Principe

Le cycle ouvert peut être utilisé pour de la désalinisation sans forcément avoir de production électrique associée : il s'agit de la **désalinisation basse température** ou Low Temperature Thermal Desalination (LTTD).

L'énergie thermique n'est pas convertie en électricité, mais facilite simplement le processus de vaporisation et de condensation. L'application est alors plus simple qu'en cogénération, car on ne s'occupe pas du rendement de conversion électrique. Elle est moins coûteuse car il n'y a pas de turbine et de transformateurs électriques.

L'intérêt par rapport aux procédés classiques de désalinisation réside dans l'économie d'énergie. **La seule consommation d'énergie concerne les pompes à vide pour les échangeurs et les pompes pour amener l'eau de mer.**

<sup>9</sup> P. Marchand, « Energie Thermique des Mers - Evaluation pour la Commission des Communautés Européennes », préparé pour la CCE, Direction Générale de l'Energie, réf EUR 9895 FR, mai 1984.

<sup>10</sup> GEC Co. Ltd, entreprise japonaise du Dr. Uehara (inventeur du cycle), page « OTEC Principe » consultée le 12 juin 2012, adresse URL : [http://www.otec.ws/otec\\_principle.html](http://www.otec.ws/otec_principle.html)

*Quelques réalisations*

L'Inde est très active dans ce domaine : le National Institute of Ocean Technology (NIOT) a ouvert la première centrale thermique de désalinisation à basse température au monde en 2005, sur l'île de Kavaratti, dans l'archipel de Lakshadweep. Elle produit de l'eau douce en pompant de l'eau à 350 m de profondeur, pour un  $\Delta T$  de 15 °C. Sa capacité est de 100 m<sup>3</sup>/j.

Face au succès de cette première réalisation, deux autres centrales ont été réalisées en 2011 sur les îles de Minicoy et Agatti du même archipel.



*Figure 44 : centrale thermique de désalinisation à basse température de Kavaratti, la capitale de l'archipel de Lakshadweep, au large des côtes sud-ouest de l'Inde. Source : NIOT.*

Depuis 2003, l'Université de Saga au Japon dispose également d'une plateforme d'essai pour la désalinisation sur son site à Imari. Celle-ci fonctionne en hybride sur un cycle fermé d'Uehara. La capacité de production d'eau douce est de 10 t/j.

**c) Production de froid (et/ou de chaud)**

La mer, par son volume important, possède une inertie thermique qui peut être exploitée pour alimenter des réseaux de froid ou des réseaux de chaleur. Différentes techniques existent :

- **Les échanges simples** à travers un échangeur de chaleur, aussi appelés « free-cooling » ou « free-heating » :
  - par exemple le SWAC, climatisation par eau de mer profonde,
- **Les échanges forcés** grâce à une machine thermodynamique :
  - par exemple la thalassothermie, ou pompe à chaleur sur eau de mer,
- **Les systèmes hybrides** : par exemple l'hydromaréthermie, qui combine ces deux modes d'échange.

Ces 3 familles sont présentées ci-après. Les applications présentées sont généralement destinées au secteur tertiaire (bâtiments collectifs, réseaux urbains, etc.), mais il faut garder à l'esprit que les applications industrielles sont également possibles. Ces applications industrielles sont à étudier au cas par cas. Moins généralisables, elles ne sont pas présentées ici.

*Climatisation directe par eau de mer (SWAC)*

*Principe*

**L'eau profonde (à environ 5°C) est utilisée pour refroidir l'eau du réseau de climatisation.** Le procédé est extrêmement simple : il se résume à un **échangeur de chaleur**. L'eau profonde circule en boucle ouverte dans un échangeur de chaleur. Elle refroidit l'eau glycolée qui circule en boucle fermée dans le réseau de distribution.

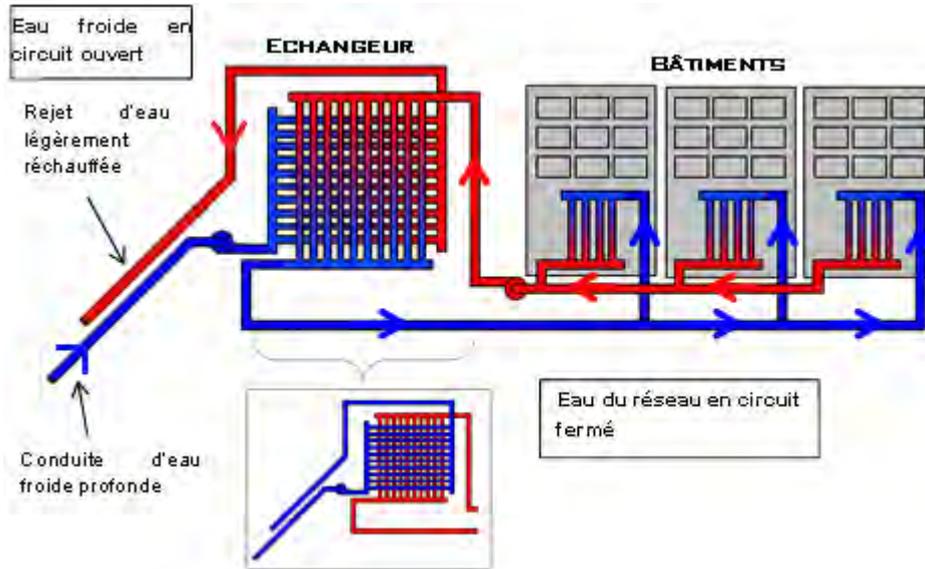


Figure 45 : schéma de la climatisation à l'eau de mer profonde (SWAC). Source : d'après un schéma de Makai Ocean Engineering.

*Avantages*

C'est un procédé beaucoup plus simple que le refroidissement par groupe froid ou par groupe à absorption. Ces deux procédés classiques de production de froid nécessitent un circuit fermé avec un fluide frigorigène, qui est évaporé et condensé dans des échangeurs. Avec l'eau pompée en profondeur, la différence de température est plus élevée. On peut donc refroidir directement sans passer par un cycle thermodynamique. Les avantages sont nombreux :

- On n'a **besoin que d'un échangeur au lieu de plusieurs** (pour les évaporateurs et condenseurs) : l'installation est beaucoup moins coûteuse ;
- **Pas de fluide frigorigène** (cas du groupe froid). Or, ces fluides sont très réglementés car ils sont nocifs pour l'environnement et parfois dangereux à manipuler ;
- **Pas de compresseur** donc moins de dépenses d'énergie (réductions de 80 %) ;

*Quelques réalisations*

On appelle ce procédé SWAC pour Sea Water Air Conditioning. Cependant, le procédé n'est **pas exclusif à l'eau de mer**, on peut aussi l'appliquer en utilisant l'eau froide profonde des lacs. Il existe quelques installations dans le monde :

- Site du **NELHA à Hawaii** sur l'île d'Oahu (1986). L'eau profonde disponible sur le site dès 1986 a été relativement peu exploitée pour le froid par le NELHA. Des petits SWAC ont d'abord été fabriqués artisanalement et utilisés pour les bâtiments de recherche à l'aide des radiateurs d'automobile d'occasion réutilisés, avec un résultat étonnamment efficace. La durée de vie limitée des matériaux due à la corrosion était compensée par le coût négligeable des pièces. Par la suite de vraies installations ont vu le jour en 1993, mais elles sont restées cantonnées au centre de recherche et n'ont pas été étendues au parc d'entreprise.
- Complexe commercial Purdy Wharf à **Halifax, Canada** (1986), à partir des eaux de l'Atlantique Nord. Il a été complété en 2010 par un système additionnel pour le complexe Alderney 5 ;
- Réseau urbain de climatisation de la **ville de Stockholm**, à partir des eaux de la mer Baltique (1995) ;
- Campus de l'Université de Cornell et de l'Ithaca High School, **New York**, à partir des eaux du lac Cayuga (2000) ;
- Réseau urbain de climatisation de la **ville de Toronto**, à partir des eaux du lac Ontario (2004) ;
- Réseau urbain de la **ville d'Amsterdam**, à partir des eaux du lac Nieuwe Meer pour le quartier de Zuidas (2006) étendu par la suite au quartier de Zuidooost (2009) ;

- L'hôtel Intercontinental **Bora Bora Resort & Spa** en Polynésie Française (2006). Il s'agit de la première installation commerciale d'un SWAC marin en milieu tropical ;
- Réseau urbain de climatisation de la **ville de Genève**, à partir des eaux du lac Léman (2008). 13 bâtiments du quartier des Nations Unies pour 20 MW sont alimentés depuis 2008, 60 MW additionnels couvrent le centre-ville depuis 2016, et 60 MW additionnels planifiés d'ici 2022 pour le quartier de Genève Aéroport ;
- **Centre informatique / serveurs Google** en Finlande à Hamina (2011) à partir des eaux de la mer Baltique ;
- L'hôtel **The Brando** sur l'île de Tetiaroa près de Tahiti en Polynésie Française (2014) ;

Tableau 9 : Caractéristiques de SWAC existants sur eau de mer

Nom du site	Localisation	Caractéristiques	Acteurs
National Energy Laboratory of Hawaii Authority (NELHA) research campus	Île d'Hawaii, Keahole Point	1993 : construction du bâtiment « Hale He'ena », laboratoire qui intègre un SWAC. 2004 : construction du complexe d'accueil des visiteurs, le « Hawaii Gateway Energy Center », bâtiment de 350 m <sup>2</sup> à haute performance énergétique intégrant un SWAC dont l'eau rejetée par le condenseur alimente les toilettes et le réseau d'irrigation des jardins. 20 kW de panneaux photovoltaïques alimentent la pompe du circuit. 2016 : rénovation du bâtiment « Hale Tako », incubateur d'entreprises de 5500 m <sup>2</sup> , dont les travaux intègrent un SWAC. Pompes à 674 m. 2017 : rénovation du bâtiment « Hale Kaa », locaux administratifs, dont les travaux intègrent un SWAC.	NELHA Entreprises ?
Hôtel Intercontinental Bora Bora Resort & Spa	Île de Bora Bora, Polynésie Française	Pompes à -927 m Débit : 270 m <sup>3</sup> /h Longueur conduite : 2,3 km Ø 400 mm Refoulement à -45 m Longueur conduite : 80 m Ø 630 mm Puissance : 1,6 MW <sub>froid</sub> Date : 2006	MOA : Tahiti Beachcomber SA (filiale Pacific Beachcomber SC) MOE : Makai Ocean Engineering (Hawaii) Travaux : entreprises locales
Hôtel The Brando	Île de Tetiaroa, Polynésie Française	Pompes à -960 m Longueur conduite : 2,6 km Ø 450 mm Puissance : 2,4 MW <sub>froid</sub> Date : 2014	MOA : Tahiti Beachcomber SA (filiale Pacific Beachcomber SC) MOE : Créocéan (France) Autres intervenants : ODEWA (BE local), DV Offshore, Fimatec Travaux : entreprises locales
Seawater Utilization Plant Research Center (SUPCR)	Ville de Goseong, Corée du Sud	3 installations en tandem SWAC + pompe à chaleur : • 2011 : 210 kW desservant 2100 m <sup>2</sup> de bâtiments. • 2012 : 175 kW desservant 16500 m <sup>2</sup> de bâtiments. • 2013 : 350 kW desservant 33000 m <sup>2</sup> de bâtiments. Pompes à 500 m	KRISO

## Pompe à chaleur sur eau de mer

### Principe

La pompe à chaleur consiste à transférer de la chaleur grâce à un cycle thermodynamique, qui constitue le moyen de transfert. On dépense donc de l'énergie pour alimenter un compresseur qui fait tourner le cycle thermodynamique, permettant ainsi de transférer la chaleur d'un endroit à l'autre. L'intérêt de la pompe à chaleur est qu'elle restitue 3 à 4 fois plus d'énergie qu'elle n'en consomme.

La pompe à chaleur peut fonctionner selon deux modes : chauffage ou rafraîchissement, et elle peut être réversible c'est-à-dire passer d'un mode à l'autre selon les besoins.

- En mode chauffage, on va extraire la chaleur d'une source chaude extérieure (chaleur accumulée par les sols ou par la mer, chaleur dégagée par un procédé ou par des êtres vivants<sup>11</sup>) vers le bâtiment ou l'eau à réchauffer.
- En mode rafraîchissement, on va extraire la chaleur de l'intérieur du bâti et la transférer à l'extérieur. L'eau de mer est utilisée comme source froide pour condenser le fluide caloporteur de la pompe à chaleur. On peut profiter de cette chaleur extraite pour réchauffer par exemple l'eau sanitaire.

Dans le cas de la pompe à chaleur marine, l'eau de mer est utilisée en mode chauffage comme source chaude, et en mode rafraîchissement comme source froide. L'intérêt d'utiliser l'eau de mer est que sa température est beaucoup plus stable au cours de l'année que l'air extérieur, la ressource est donc plus importante.

Plusieurs appellations sont utilisées pour désigner ce principe : pompe à chaleur marine, géothermie marine, thalassothermie.

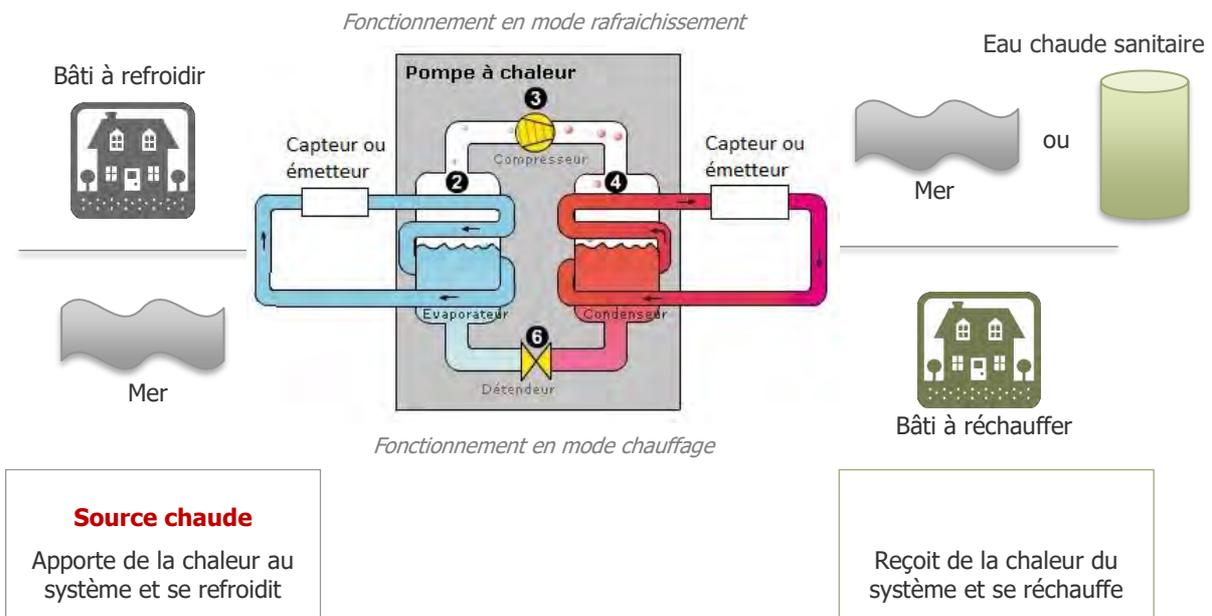


Figure 46 : principe de la pompe à chaleur marine

### Intérêt

Le concept de la pompe à chaleur est particulièrement intéressant en cas **d'usages mixtes** qui induisent des **besoins simultanés de chaud et de froid**. Dans ce cas, la chaleur peut être récupérée gratuitement sur la production de froid.

**En milieu tropical**, sauf cas d'usages industriels, le besoin est principalement centré sur la climatisation. La pompe à chaleur n'est pas la plus adaptée à cet usage. En effet, celle-ci **ne permet qu'un rafraîchissement d'au maximum de 5°C de moins que la température d'entrée**. La machine à absorption est alors plus indiquée. Les contraintes de la pompe à chaleur marine sont liées à la qualité de l'eau de mer, à l'encrassement des échangeurs et à la résistance à la corrosion, ainsi qu'à l'impact environnemental de la prise d'eau et de son rejet. Des pré-traitements sont parfois nécessaires sur l'eau pompée (dessableurs, filtres). Le biofouling et la corrosion

<sup>11</sup> Dans un bâtiment d'élevage par exemple.

nécessitent d'utiliser des matériaux plus résistants (titane). Enfin, la pose d'une prise d'eau en mer et le rejet d'eau dont la température a été modifiée peuvent avoir des incidences environnementales qui nécessitent d'être intégrées.

#### Quelques réalisations

Le principe est déjà largement utilisé. En France, on peut citer de façon non exhaustive :

- **Monaco depuis 1963.** Monaco a été l'un des premiers pays à développer ce type d'énergie sur son littoral. La Principauté a installé sa première pompe à chaleur sur eau de mer en 1963 au Stade nautique Rainier III pour chauffer l'eau de la piscine, et en compte aujourd'hui plus de 80 dont un réseau urbain public voué à être étendu. Quelques exemples de bâtiments chauffés ou refroidis grâce à des pompes à chaleur sur eau de mer à Monaco : Le Grimaldi Forum, le Musée Océanographique, l'Auditorium Rainier III ou encore les établissements de la Société des Bains de Mer (SBM).
- **Le quartier des anciens chantiers navals de la Seyne sur Mer depuis 2008.** Il s'agit d'un réseau public réalisé par la Ville de la Seyne sur Mer sur le site des anciens chantiers navals, pour des usages mixtes résidentiels + tertiaire sur 54 000 m<sup>2</sup>. La capacité d'échange installée est de 4,8 MW<sub>th</sub>. L'eau de mer est pompée dans le port à 5 m de profondeur, à des températures de 15°C (hiver) à 22°C (été), et à un débit 160 m<sup>3</sup>/h.
- **Le quartier résidentiel de la Divette à Cherbourg depuis 2013.** Le système alimente un réseau de chauffage collectif pour 1300 logements alimenté à 84% par la pompe à chaleur, les 16% restant en période de grand froid étant couvert par une chaudière à gaz. L'eau de mer est pompée dans le port voisin et la capacité d'échange installée est de 2,2 MW<sub>th</sub>.
- **La zone d'aménagement Euroméditerranée à Marseille depuis 2016.** Dans le cadre de projets qui vise à alimenter 500 000 m<sup>2</sup> pour 21 MW<sub>th</sub> d'ici 2020, deux réseaux distincts ont été créés :
  - **Réseau de thalassothermie « Massileo »** conçu, réalisé et exploité par Optimal Solutions, filiale de Dalkia Groupe EDF. Fin 2017, une première tranche couvrant 58 000 m<sup>2</sup> a été livrée en démonstration sur l'îlot Allar de la future Ecocité « Smartseille ». Le système couvre 75% des besoins en chaleur, froid et eau chaude sanitaire. L'eau de mer est pompée dans le port à une profondeur de 4 m, à des températures de 12 à 26 °C et à un débit de 425 m<sup>3</sup>/h. La puissance totale pour cet îlot est de 2,6 MW chaud et de 2,3 MW froid. La longueur du réseau est pour l'instant de 1,4 km. Le projet vise à alimenter 500 000 m<sup>2</sup> pour 21 MW<sub>th</sub> d'ici 2020.
  - **Réseau et centrale de géothermie marine « Thassalia »** du groupe Engie. Fin 2016, une première tranche couvrant le quartier d'Arenc et de la Joliette a été inauguré. Les bâtiments raccordés aujourd'hui sont les bâtiments des Docks (Constructa), le Calypso et l'Hermione (Euromedcenter) et le Golden Tulip, soit 100 000 m<sup>2</sup>. Le système couvre 70% de la consommation énergétique, l'électricité représente 25% et les 5% restant sont dus aux chaudières à gaz d'appoint. L'eau de mer est pompée dans le port à une profondeur de 7 m, à des températures de 14 à 22 °C et à un débit total de 1000 l/s. La longueur du réseau est pour l'instant de 1,5 km. A terme, il est projeté de couvrir 500 000 m<sup>2</sup> sur 3,1 km de réseau pour produire 19 MW<sub>th</sub> froid et 19 MW<sub>th</sub> chaud.



Figure 47 : centrale de géothermie marine « Thassalia » à Marseille. Source : Engie.

Ces réalisations sont basées sur des boucles d'eau de mer tempérées. En milieu tropical, l'eau de mer est plutôt utilisée comme source froide pour le condenseur des groupes froids dans les réseaux collectifs de climatisation. Elle remplace les systèmes fonctionnant avec un refroidissement à air, sources de pollution thermique (rejet d'air chaud responsables d'îlots de chaleur) et de pollution sonore.

La **ville de Hong-Kong** par exemple a lancé un vaste chantier de réaménagement urbain (projet urbain de Kai Tak) intégrant la création d'un réseau urbain de climatisation. Les quartiers suffisamment proches du littoral utiliseront l'eau de mer pour leurs groupes froids.

### L'hydromaréthermie

#### Principe

L'hydromaréthermie est un système hybride de production de chaud et de froid à partir d'énergie thermique des mers, qui combine les techniques d'échanges simples et d'échanges forcés. Il s'agit d'une technologie brevetée récente (2013) commercialisée par MAPE TECH SA.

Le système se distingue par :

- **l'absence de pompage** d'eau de mer. Celui-ci est remplacé par un échangeur sonde posé au fond de l'eau sur le littoral, ou enfoui sous le sable en zone littorale. Cet échangeur sonde capte la chaleur de la mer et la transfère à une boucle d'eau douce sans additifs reliée à la pompe à chaleur. Il n'y a aucun contact entre l'eau de mer et l'eau douce.
- Un système de **régulation complexe** qui optimise chaque mode de fonctionnement (échange simple ou échange forcé à l'aide de pompes à chaleur), chaque source (mer, chaleur extraite en mode froid) et chaque **strate d'eau** au sein du circuit caloporteur (gestion différenciée dite « multivoies » selon la densité/T°C de l'eau dans le circuit).
- Une efficacité élevée et l'absence de système d'appoint.

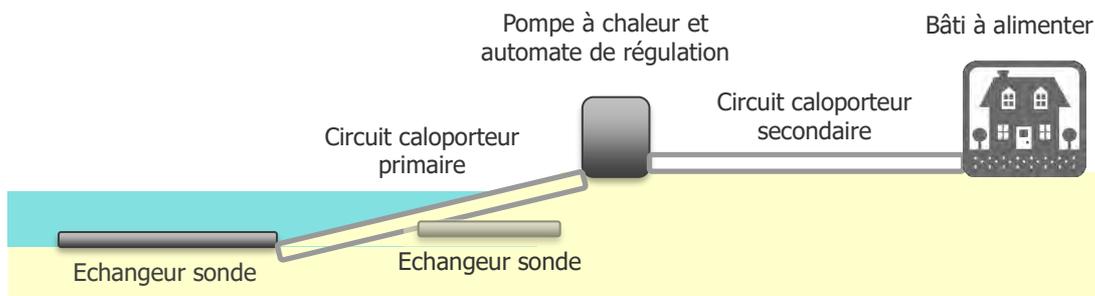


Figure 48 : schéma de principe du système d'hydromaréthermie

#### Intérêt

Ce système répond à des **besoins simultanés en chaleur** (réseau de chaleur à 50°C max et eau chaude sanitaire à 63°C max) **et en froid** (température minimale du réseau froid : 6°C). Très performant, d'amortissement rapide (7 ans), il permet la production et l'utilisation simultanée de chaleur, de froid et d'eau chaude sanitaire sans alternance, ni interruption de production. Il nécessite moins de volume de stockage pour l'eau chaude sanitaire que les systèmes classiques, car la plage de production est large. En corollaire, ses **applications en contexte tropical sont plus limitées qu'en régions tempérées**.

L'absence de pompage d'eau de mer rend sa mise en œuvre plus simple. Les sondes immergées offrent une grande diversité d'implantation (sous une plage, sur un fond marin sableux ou rocheux, sur des ouvrages maritimes).

#### Quelques réalisations

Le système est implanté en Corse, pour le village vacances « U Livanti » à Propiano. Une première tranche de 111 kW a été installée en 2013, complétée par une seconde de 321 kW en 2017. La première tranche a coûté 216 025 € HT.

Il alimente en chauffage, climatisation et eau chaude sanitaire des villas BBC, des chalets (peu isolés), un hôtel, des laveries automatiques et la laverie principale de l'hôtel, la réception, les bureaux et la salle d'animation du village vacances.



Figure 49 : Echangeur sonde immergé du système Nérée.

**d) La valorisation commerciale de l'eau froide profonde, un moyen de rentabiliser des équipements à visée énergétique**

Outre les usages énergétiques permis par sa température glaciale, l'eau de mer profonde peut être valorisée pour d'autres usages. C'est l'eau en elle-même qui est exploitée commercialement grâce à sa composition. Parce qu'ils sont très rentables, ces usages commerciaux de l'eau de mer profonde pourraient faciliter la réalisation d'applications énergétiques. Il s'agit alors de cogénération : la production de plusieurs coproduits par un même procédé. Avec l'eau de mer profonde et, selon les cas, en combinaison avec l'eau de mer de surface, de nombreux produits peuvent être obtenus.

- Produits **agro-alimentaires** issus de l'eau de mer profonde :
  - L'**eau minérale en bouteille** issue d'eau profonde désalinisée. Les eaux en bouteille jouent sur deux axes marketing. Le premier est la pureté, la rareté, l'immortalité (masse d'eau au renouvellement millénaire) et l'exotisme de la source. Le second est la santé, avec les bénéfices de la richesse en minéraux de l'eau. C'est le secteur des eaux isotoniques ou hypertoniques à destination des sportifs.
  - Le **sel de table** haut de gamme ;
  - Les **concentrés minéraux** sous forme liquide ou solide, pour l'agro-alimentaire, l'industrie pharmaceutique, les cosmétiques, l'aquariophilie. L'origine naturelle des composés est un argument de vente majeur ;
  - Le chlorure de magnésium naturel (nigari) : ce coagulant traditionnel du tofu est aussi utilisé comme complément alimentaire et en auto médication ;
  - Les formulations liquides ou solides à destination de l'industrie de la nutrition santé et de l'industrie pharmaceutique.
- Les produits **cosmétiques** et la **thalasso thérapie** ;
- Le **tourisme** à travers les équipements culturels et de loisirs (aquariums, musées spécialisés) ;
- **Aquaculture** : l'eau de mer profonde est riche en nutriments, présente une physico-chimie très stable et elle est généralement dénuée d'agents pathogènes. C'est donc une eau particulièrement adaptée à l'aquaculture ;
- **Pêche** : eau utilisée pour le lavage, la conservation et le transport des produits de la pêche ;
- **Agriculture** : eau d'irrigation, maintien au frais des racines pour les cultures tempérées, apports en minéraux pour l'optimisation nutritionnelle des productions ;
- **Extraction de métaux rares** (encore en R&D).

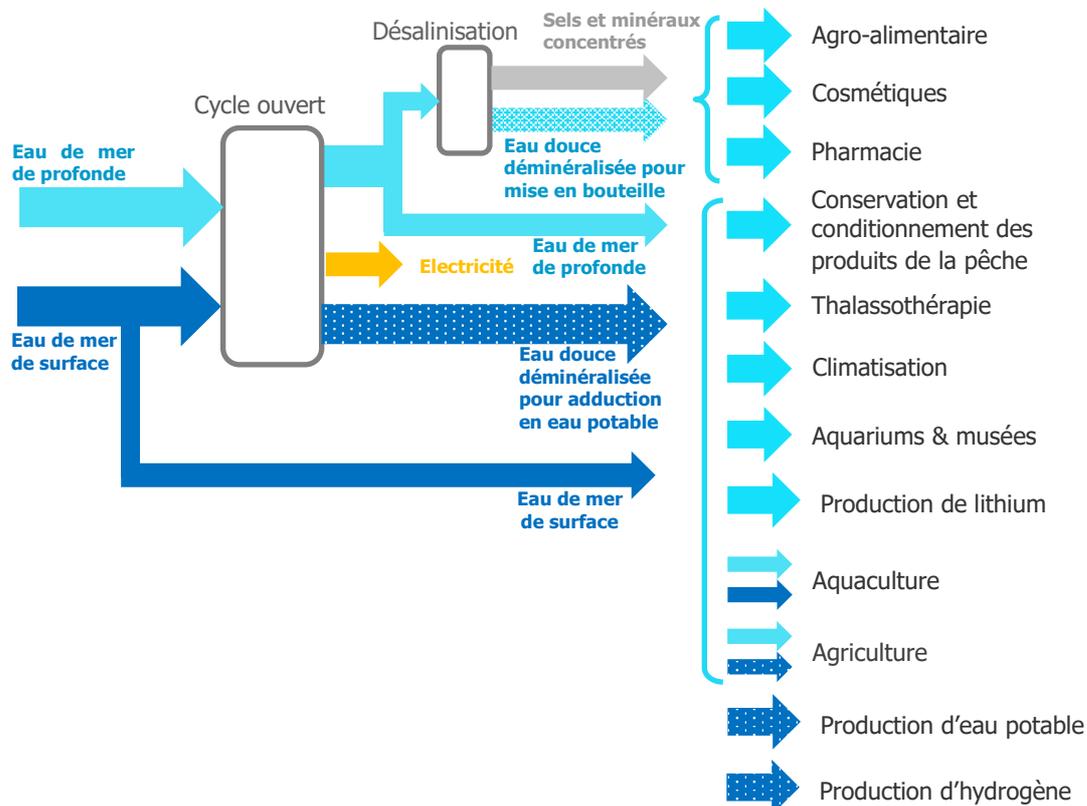


Figure 50 : possibilité de cogénération avec l'eau de mer profonde et l'énergie thermique des mers.

### *Etat des lieux de la valorisation de l'eau profonde dans le monde*

L'eau profonde est exploitée en Asie et à Hawaii depuis plus de 20 ans.

*Au Japon, une exploitation très diversifiée de la part du pays le plus consommateur d'eau profonde*

**Au Japon, il existe 15 sites de pompages** répartis sur tout l'archipel, au sein de climats variant du nordique au tropical. Selon l'utilisation et le climat de la zone, la profondeur de pompage varie entre 300 et 612 m, la majorité se situant dans la fourchette 300-400 m. La plupart sont des infrastructures publiques qui fournissent l'eau à des parcs d'entreprises, des ports, des centres de recherches ou à des structures de tourisme (centres de thalassothérapie, spa, piscines d'eau de mer au sein d'hôtels ou de bains traditionnels (onsen), musées, aquarium). Trois de ces infrastructures de pompage sont détenues par des sociétés privées : deux sont des sociétés d'eau en bouteille, et la troisième est un centre de thalassothérapie.

La pêche, l'aquaculture et l'industrie agro-alimentaire ont été des moteurs importants dans le développement de l'exploitation de l'eau de mer profonde au Japon.

Dans le Nord (Hokkaido), les conduites ont été à l'origine mises en place par des coopératives de pêcheurs. Dans cette région, 90 à 95% de l'eau froide profonde pompée est utilisée pour le secteur de la pêche. L'eau glacée est utilisée pour la **conservation des prises durant le stockage et le transport** (certains produits de la pêche comme les pétoncles par exemple sont transportés vivants). Elle permet notamment de diminuer la quantité de glace utilisée.

Elle est aussi utilisée pour **laver les produits de la mer ou les purifier**. En effet, sa composition (absence de contamination) permet de garantir les normes d'hygiène. Ainsi, une société japonaise (General Oyster Inc) a développé et breveté une technique de **purification des huîtres**. Dernière étape de la production d'huîtres, la purification permet d'éliminer les micro-organismes pathogènes, les bios toxines et les bactéries des mollusques bivalves. Dans le procédé classique, les huîtres sont plongées dans une eau traitée durant au moins 48h. L'eau utilisée est stérilisée par rayonnement UV. Au lieu d'eau stérilisée par UV, la société japonaise GO Inc. utilise de l'eau profonde. D'après eux, la qualité sanitaire de la purification des huîtres égale voire dépasse le procédé classique, tout en permettant une meilleure conservation des qualités gustatives et nutritionnelles. Ce procédé est utilisé par la société sur le site d'eau profonde de Nyuzen.

Enfin, l'eau profonde est largement utilisée pour la production de diverses gammes **d'eaux en bouteille**, ainsi que de **produits alimentaires** : boissons alcoolisées et non alcoolisées, vinaigre, sel de table, nigari, pâtes, biscuits apéritifs, etc. En particulier, la composition de l'eau profonde permettrait d'accélérer la fermentation des levures lors de la production de bière ou encore d'en améliorer les propriétés gustatives (Ryuji et al. 2013, Lin et al. 2013).

Le Japon a également su valoriser l'eau froide profonde à travers le **tourisme et la culture**. La plupart des centres de pompage se visitent et comportent un **espace pédagogique**. Ces centres servent également de vitrines pour les productions agro-alimentaires issues de l'eau profonde, qui sont mises en avant en tant que **produits régionaux** (réel ou marketing) ou spécialités culinaires locales. Il existe 5 centres de **thalassothérapie** à base d'eau profonde, qui vont de l'établissement grand public (Thalassopia) à l'hôtel de luxe (Utoco Hotel & Spa). Plus original, deux sites disposent d'un **musée-aquarium** autour des grandes profondeurs.

Enfin, **l'agriculture** à base d'eau profonde est expérimentée et mise en œuvre même si cette utilisation reste minoritaire au regard des autres.

*Hawaii, centré sur l'aquaculture*

**A Hawaii, le seul site est celui du NELHA**, qui à travers de son parc d'entreprise de 352 ha (HOST Park), met à disposition de l'eau froide profonde et de l'eau de surface. La location des parcelles aux entreprises et les redevances de fourniture d'eau de mer représentent 85% du chiffre d'affaire du NELHA. Créé en 1974, le parc d'entreprises est financièrement autosuffisant depuis 2010.

A noter que le parc n'est pas exclusivement tourné vers l'eau froide profonde. La principale activité exploitant l'eau profonde est l'aquaculture, avec 15 sociétés de production sur les 33 du parc. 73% de l'aquaculture de production est dédié aux espèces alimentaires : poissons de table (la sériole, le tarpon, et la morue noire), crustacés (crevettes reproductrices certifiées indemnes de pathogènes, homards), mollusques (ormeaux, palourdes, huîtres, moules) et une algue japonaise comestible, l'ogo. 60% de ces productions animales n'effectuent qu'une partie du cycle de vie sur le site : il s'agit d'écloserie d'œufs, d'élevage de larves, d'alevins, ou d'individus reproducteurs destinés à l'export vers d'autres sites, ou de phases de grossissage ou d'acclimatation avant l'export ou la commercialisation en local. Le reste de l'aquaculture est composé à 13% de production de micro-algues pour l'extraction de spiruline et d'astaxanthine (un anti-oxydant), et à 20% de production pour l'aquariophilie (poissons tropicaux, hippocampes, algues, invertébrés et produits vivants, poulpes). La seconde part la plus importante des sociétés du parc (33%)

est celle des sociétés d'ingénierie qui développent des solutions techniques pour l'aquaculture (4 sociétés) l'agriculture sous serre ou exploitant l'eau froide profonde (2 sociétés), le stockage d'énergie et les micro réseaux, les télécoms et la robotique.

*La Corée du Sud, un développement limité par la législation*

**En Corée du Sud, au moins six sites** ont été recensés, 4 sur le continent, dans la province de Gangwon, et 2 sur l'île d'Ulleung, en mer du Japon.

A noter qu'à l'inverse du Japon, la législation coréenne n'autorise pas l'utilisation de l'eau profonde dans les produits alimentaires, excepté pour l'eau minérale depuis 2012 suite au recours d'une société. Ceci limite donc considérablement les utilisations par l'industrie agro-alimentaire comme le fait le Japon. Par conséquent, les seuls produits agro-alimentaires fabriqués sont l'eau minérale en bouteille et les sels de table.

- Le Goseong Deep Seawater Industrial Complex est implanté sur le continent à Goseong, dans la province de Gangwon, où se situent les installations du KRISO<sup>12</sup>. Il est issu d'un partenariat public-privé. Il comprend deux prises d'eau l'une à 300 m et l'autre à 500 m. Depuis 2009, il fournit de l'eau :
  - à l'institut de recherche sur la pêche de Gangwon (40% de l'eau). L'Institut assure la production de larves de poissons (Colin d'Alaska et saumon) pour l'aquaculture et la restauration des stocks halieutiques.
  - au KRISO (20% de l'eau),
  - à un parc d'entreprises (17% de l'eau) de 100 km<sup>2</sup> qui comptait 25 sociétés en 2017;
  - à la société mixte propriétaire (Gangwon Deep Sea Water Co., Ltd) pour la production d'eau en bouteille (23% de l'eau pompée). 6,4 millions de bouteilles de 350 ml sont produits par jour.
- Le site de la société Global Deep Sea Water Co., Ltd, dans la ville de Sokcho, province de Gangwon. C'est celui qui dispose du plus grand débit de pompage autorisé en Corée du Sud (20 000 t/j). Ses activités couvrent la production d'eau minérale (marque Deeps), de sels, de froid et d'eau pour l'aquaculture (alevins). Son pompage se situe à 510 m.
- Le site de la société Watervis, société créée par le Korea Ocean Research and Development Institute, est situé à Yang Yang, province de Gangwon. Il dispose d'un pompage à 1032 m de profondeur, c'est l'un des plus profonds qui existe.
- Un site à Donghae, province de Gangwon, pour lequel aucune information détaillée n'a été trouvée.
- Le site de la marque « Cheongara » à Taeha-ri, sur l'île d'Ulleung, appartenant à la société Ulleung Deep sea water Co Ltd. L'eau est pompée à 418 m de profondeur à 1700 m de la côte depuis 2007.
- Le site de la société Panablu Co., Ltd, à Hyeonpo sur l'île d'Ulleung. Elle possède depuis 2005 une prise d'eau à 650 m de fond, à partir de laquelle est produite une eau (« Ulleung mine-water ») commercialisée par le major coréen de l'agro-alimentaire, CJ (Cheil Jedang Group). Une seconde prise d'eau à 1500 m (record mondial).

*Taiwan, une volonté gouvernementale mise à mal par 3 catastrophes naturelles*

A Taiwan, l'exploitation de l'eau profonde s'est développée vers 2005. Il existe aujourd'hui au moins 4 infrastructures de pompage. **Trois appartiennent à des sociétés privées** : Taiwan Yes (filiale de Taiwan Fertilizer Co. Ltd), Eastlife Biotech Co. Ltd. et Kung-Long Biotech Co. Ltd. Ces 3 sociétés fournissent de l'eau à une soixantaine d'entreprises qui commercialisent environ 200 produits dérivés, à 80% d'eau en bouteille et de produits cosmétiques.

Le Ministère des affaires économiques et de l'agriculture a initié dès 2005 un ambitieux plan de développement économique basé sur le modèle des centres associant R&D et parc d'entreprises. Lancé vers 2010 dans le comté de Taitung, l'ouverture de l'« **Eastern Taiwan Deep Sea Water Innovation & Research Center** » a été retardée par de mauvais choix techniques, deux typhons et un tremblement de terre. Finalement ouvert en 2012, les difficultés rencontrées n'ont pas permis au centre d'atteindre les objectifs initiaux escomptés. Le Gouvernement a néanmoins lancé un nouveau plan de développement autour de ce site pour la période 2017-2021.

Un second centre de recherche situé dans le comté de Hualien travaille également depuis 2012 sur l'eau profonde, mais il semble que celui-ci achète l'eau auprès d'une société privée (Taiwan Yes).

<sup>12</sup> Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, qui possède un prototype de centrale électrique ETM.

*Polynésie Française : Thalasso & Spa*

En Polynésie Française, le groupe Pacific Beachcomber SC possède deux hôtels 5 étoiles équipés d'un SWAC : l'hôtel « InterContinental Bora Bora Resort & Thalasso Spa » à Bora Bora et l'hôtel « The Brando » sur l'île privée de Tetiaroa. Tous deux réutilisent l'eau profonde pompée pour le SWAC pour leur centre de thalassothérapie et spa.

*La Réunion : des projets dans les cartons*

La période 2017-2018 a vu émerger deux projets de valorisation de l'eau profonde à la Réunion : celui de Bois-Rouge à Saint-André (voir page 111), et celui de l'Ecocité, avec un centre de recherche, formation et innovation (voir pages 15 et 176).

*Secteurs non matures ou peu développés*

Parmi les utilisations de l'eau profondes qui sont encore peu développées ou pas encore assez matures, on compte :

- La production de biomasse marine pour la production d'énergie ;
- L'agriculture ;
- La production d'hydrogène ;
- L'extraction de métaux rares.

*Agriculture*

Les intérêts de l'utilisation d'eau froide profonde en agriculture sont les suivants :

- Accélération de la pousse par le froid ;
- Culture d'espèces tempérées en climat tropical ;
- Culture en hors saison ;
- Augmentation de la teneur en minéraux des fruits et légumes, et donc de leur qualité nutritionnelle.

Dans la pousse accélérée, l'irrigation s'effectue par un réseau enterré d'eau froide profonde. Le refroidissement du sol par des canalisations d'eau froide condense l'humidité atmosphérique ambiante au pied des racines des plantes. Le maintien d'un écart de température entre les racines et les feuilles des plantes simule des conditions printanières et provoque ainsi une stimulation continue de la pousse.

La culture d'espèces tempérées en milieu tropical ou la culture en hors saison est appliquée à petite échelle au Japon et fait l'objet de recherches à Hawaii. Au Japon, dans le climat tropical d'Okinawa, des espèces de saison fraîche (épinards, fleurs) sont cultivés commercialement toute l'année. Dans le Nord, à Hokkaido, la culture d'oignons a été testée, ainsi que celle des tomates et melons. A Hawaii, les activités de recherche ont testé la culture de papaye, d'ananas (floraison en 6-8 mois au lieu de 14), de raisin Isabelle (3 récoltes par an), de gazon, et de bien d'autres cultures maraichères.

Par ailleurs, la recherche japonaise et taiwanaise se penche sur les vertus médicinales et nutritionnelles des fruits et légumes cultivés à l'aide d'eau profonde désalinisée. La société Espec Corp. (Japon) possède depuis novembre 2016 une infrastructure de 300 m<sup>2</sup> de culture hydroponique de laitues enrichies en minéraux grâce à l'eau profonde d'une capacité de 1000 plants par jour. Elle est basée sur les technologies développées par DHC Corp. (Japon), société qui possède son propre site de pompage d'eau profonde, et en partenariat avec l'Université de Kyoto. Située près de l'aéroport de Tokyo à Haneda, elle approvisionne la zone aéroportuaire. L'export est fortement visé, des opérations commerciales ont été menées à Los Angeles et Hawaii.



Figure 51 : culture de raisin Isabelle au NELHA, Hawaii (© DewPoint), culture d'épinards à Kume, Okinawa, Japon et culture hydroponique de laitues à Haneda, Tokyo (© Espec Corp.)

### Extraction de métaux rares

Une autre application possible serait la récupération de minéraux comme le lithium ou l'uranium présents dans l'eau de mer profonde en quantité un peu plus grandes qu'en surface. La technique consiste à faire passer l'eau de mer dans des colonnes à absorption. Cependant, cette application est encore au stade de la recherche et développement.



Figure 52 : Equipements d'extraction du lithium de l'eau de mer profonde à l'Université de Saga au Japon, solution de chlorure de lithium et précipité sec obtenus au bout de 150 jours d'opération. Source : Y. Ikegami - IOES, 2015.

### Upwelling artificiel

L'upwelling est un phénomène observé à proximité de certaines côtes lorsque, sous l'effet de vents forts et réguliers, la couche d'eau de mer de surface est poussée vers le large, laissant ainsi la place aux eaux océaniques profondes, qui remontent alors. Ces eaux profondes étant plus riches en nutriments, les poissons y sont plus abondants. Ce sont donc des zones prisées pour la pêche.

Le principe d'upwelling artificiel a été étudié en Asie et notamment au Japon où le principe a même été testé. De 2003 à 2009, un prototype nommé Takumi a été exploité en baie de Sagami. Fonctionnant au moteur diesel, le système remontait 100 000 m<sup>3</sup>/j d'eau pompée à 200 m de profondeur. D'autres expériences avec des prototypes, dont certains fonctionnant à l'énergie houlomotrice, ont été menées en Norvège, à Taiwan, en Chine et à Hawaii. Outre les potentielles valorisations halieutiques visées, ces travaux présentent un intérêt pour la compréhension des impacts des rejets d'eau profonde d'un SWAC ou d'une centrale électrique ETM.

Ce principe pourrait être exploité avec l'énergie thermique des mers, et permettrait de **valoriser le rejet d'eau profonde**.

Aujourd'hui toutefois, ce rejet d'eau plus riche en surface est plutôt vu comme un **effet potentiellement négatif** sur la faune et la flore marine, avec un risque de déstabilisation des structures des communautés. La tendance est donc plutôt de rejeter l'eau profonde **au-dessous de la couche euphotique**<sup>13</sup> afin d'éviter l'effet d'enrichissement lié à l'apport de nutriment.

A Hawaii, sur la zone d'activité économique du NELHA, développée autour du pompage d'eau de mer profonde, les rejets d'eau de mer sont infiltrés dans la nappe phréatique littorale. Néanmoins, ici, l'apport en nutriment est probablement davantage issu des activités aquacoles que de l'eau profonde.

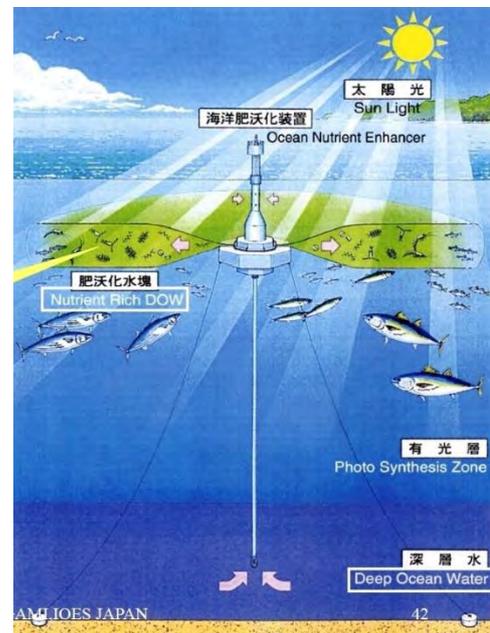


Figure 53 : principe du prototype d'upwelling artificiel japonais « Takumi ». Source : Professeur Ouchi, Université de Tokyo.

<sup>13</sup> Couche euphotique : couche supérieure d'une étendue d'eau traversée par les rayons du soleil. Au-delà d'une profondeur limite, il n'y a plus de lumière, elle est totalement absorbée par la masse d'eau.

## e) Conclusion et perspectives

L'énergie thermique des mers est une ressource dont les **applications sont nombreuses et variées**. Si le principe régissant la **production d'électricité** est connu depuis 100 ans et étudié depuis près de 50 ans, très peu d'installations existent aujourd'hui et elles restent **limitées à des prototypes de R&D** de petite puissance (100 kW max).

En revanche, toutes les autres applications sont relativement matures du point de vue de la technologie mise en œuvre ; elles sont **déjà exploitées et relativement répandues en Asie et à Hawaii**, en Inde pour la désalinisation, ainsi qu'en Europe et dans les pays tempérés pour les réseaux de refroidissement ou de chauffage urbain.

Le coût des conduites d'eau profonde nécessite d'être compensé soit par des impératifs technico-économiques liés aux spécificités du site (production d'eau douce en sites isolés en Inde ou consommations élevées sur une zone ou un site), soit par des marchés spécifiques à haute valeur ajoutée. Néanmoins, la palette d'activités possibles et les retombées économiques qu'elles génèrent font de l'eau profonde un **levier de développement pour les territoires**.

### 1.1.6. Energie osmotique

#### a) Qu'est-ce que l'énergie osmotique ?

L'exploitation de l'énergie osmotique utilise la différence de salinité entre l'eau douce et l'eau salée au niveau des embouchures des fleuves et des rivières. Elle repose sur l'osmose : phénomène caractérisé par le passage de la solution la moins concentrée vers la solution la plus concentrée, lorsque deux liquides de concentration différente sont séparés par une membrane semi-perméable, c'est-à-dire laissant passer le solvant (l'eau), mais non la substance dissoute (les sels dissous).

Il s'agit du principe inverse à celui utilisé pour produire de l'eau potable à partir d'eau de mer : dans la désalinisation, on dépense de l'énergie pour forcer le passage de l'eau de mer à travers une membrane semi-perméable qui sépare le sel de l'eau douce.

Deux techniques existent :

- **l'électrodialyse inverse** (ou RED pour Reverse ElectroDialysis) :
  - basée sur le principe de la cellule électrochimique et sur la technologie des membranes échangeuses d'ions, elle génère un **courant ionique**.
- **l'osmose à pression retardée** (ou PRO pour Pressure Retarded Osmose) :
  - basée sur le principe de l'osmose et la technologie des membranes semi-perméables, elle génère une **pression hydraulique dite pression osmotique**.

### Electrodialyse inverse

Cette technique est basée sur le principe de la **cellule électrochimique** : deux électrodes plongées dans une solution électrolyte et reliées par un pont salin. Le transfert d'ions d'une solution électrolyte à l'autre crée un courant électrique.

L'électrodialyse inverse consiste à placer des membranes échangeuses d'ions entre l'eau douce et l'eau salée. **Deux types** de membranes sont utilisés : les **membranes échangeuses de cations** (CM sur la figure ci-dessous), qui ne laissent passer que les ions positifs, et les **membranes échangeuses d'anions** (AM sur la figure ci-dessous), qui ne laissent passer que les ions négatifs. Les deux types de membranes sont disposés en alternance afin de provoquer un mouvement de cations dans une seule et même direction, tandis que les anions se déplacent en sens opposé : il y a alors création d'un **courant électrique**.

Les ions utilisés sont ceux du composant principal de l'eau de mer, le sel (NaCl sous forme solide), qui se dissout dans l'eau en ions sodium positifs  $\text{Na}^+$  (cation) et en ions négatifs  $\text{Cl}^-$  (anion).

La quantité d'énergie disponible est fonction de la différence de concentration des deux solutions, de la composition des sels dissous et de la température de l'eau. La quantité d'électricité générée dépend des caractéristiques techniques de la membrane : sélectivité ionique, résistance interne de la cellule.

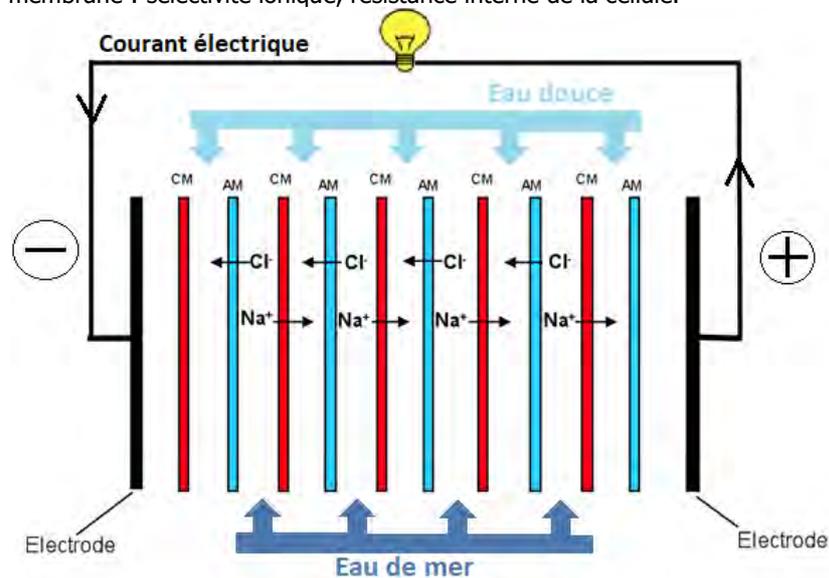


Figure 54 : principe de l'électrodialyse inverse. Source : d'après ReaPower.

*Osmose à pression retardée*

Cette technique est basée sur l'**équilibre osmotique** : le passage de l'eau douce vers l'eau salée à travers la membrane semi-perméable va augmenter la pression du compartiment d'eau salée tant que la différence de pression n'excède pas une valeur limite (limite théorique avec l'eau de mer : 27 bars). Cette pression, appelée **pression osmotique**, peut ainsi être utilisée pour faire tourner une **turbine hydraulique** et produire de l'électricité.

L'exploitation de l'énergie osmotique se fait sous une pression de 10 bars. Les membranes actuelles ont une efficacité de 1 W/m<sup>2</sup> en conditions réelles, 3 W/m<sup>2</sup> en laboratoire, et il est estimé qu'il faudrait atteindre les 5 W/m<sup>2</sup> pour être compétitif (source : Statkraft 2010).

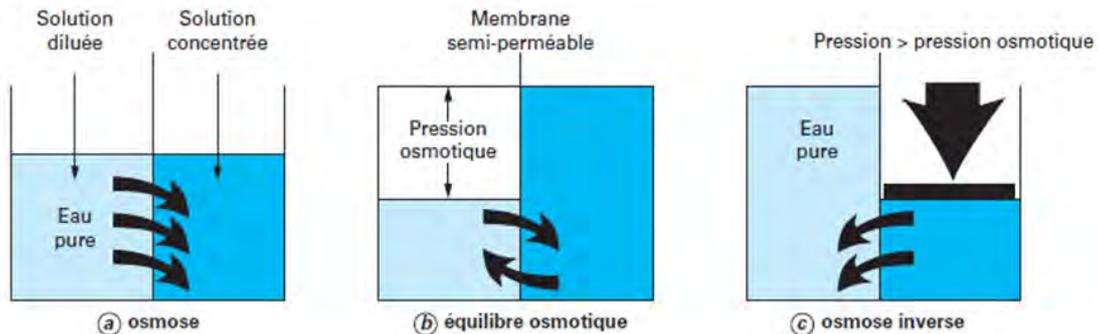


Figure 55 : Schéma de la pression osmotique (d'après Aimar P. et al., 2010)

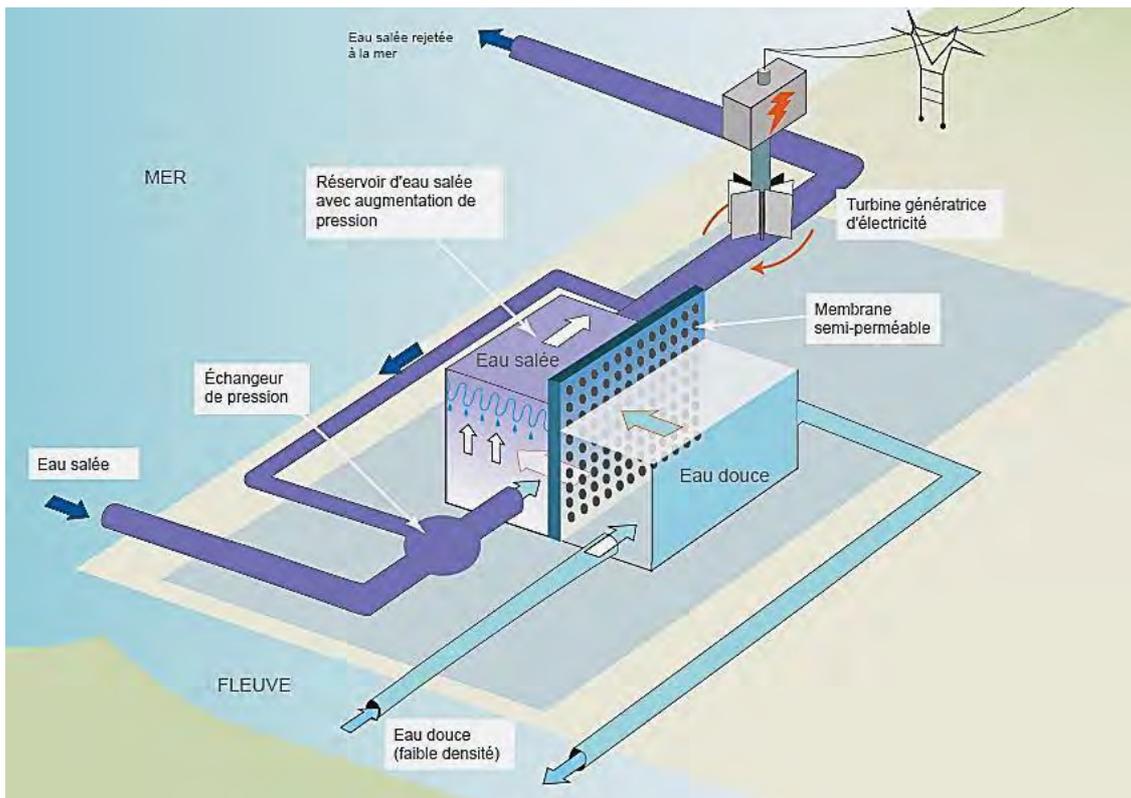


Figure 56 : Principe de l'osmose à pression retardée. Source : d'après Statkraft et AFP.

**b) Etat de l'art**

Globalement, l'exploitation de l'énergie osmotique demeure au stade de la recherche et développement. Les points critiques à améliorer sont l'encrassement des membranes, l'efficacité de la conversion d'énergie, la taille des éléments et le coût des membranes.

*Electrodialyse inverse : la centrale pilote d' Afsluitdijk aux Pays-Bas*

Une centrale pilote de capacité nominale 50 kW a été inaugurée aux Pays-Bas en mai 2014. La centrale est installée sur la **digue d'Afsluitdijk**, avec d'un côté, la mer, et de l'autre, de l'eau douce. L'usine utilise 220 m<sup>3</sup>/h d'eau douce et autant d'eau de mer.

Le projet est mené par :

- La société néerlandaise REDStack, qui développe le concept et était responsable de la conception, la réalisation et l'exploitation de la centrale ;
- La société Fujifilm qui développe les membranes échangeuses d'ions utilisées ;
- Wetsus, un centre de recherche et développement autour des technologies de l'eau financé par le Danemark, les Pays-Bas et l'Union Européenne. Le centre est responsable des programmes de recherche menés autour du projet ;

Le coût total du projet s'élève à 7,33 millions d'euros, dont 3,35 millions financés par 3 organismes publics : la province danoise du Friesland, l'Alliance des provinces du Nord des Pays-Bas, et le Ministère danois de l'Environnement, des Infrastructures et des affaires économiques.



Figure 57 : Centrale pilote (50 kW) d'énergie osmotique par électrodialyse inverse aux Pays-Bas. Source : REDStack

Un **autre prototype de R&D** plus petit existe depuis 2014 en Sicile, à Marsala, sur les salins d'Ettore e Infersa. Dans cette variante, ce sont les **eaux de saumure du salin** qui sont utilisées comme solution concentrée, et l'eau saumâtre d'un puit côtier comme solution douce.

Le prototype est constitué de membranes de 44x44 cm<sup>2</sup> et de 125 cellules. Il a été testé pendant 5 mois en 2014 sur des solutions naturelles et artificielles. Les tests avec les eaux de saumure et l'eau saumâtre du puit ont permis de produire une puissance moyenne de 40 W, soit 1,6 W/m<sup>2</sup>. Ces valeurs sont les plus élevées atteintes recensées dans la littérature (Tedesco et al. 2016).

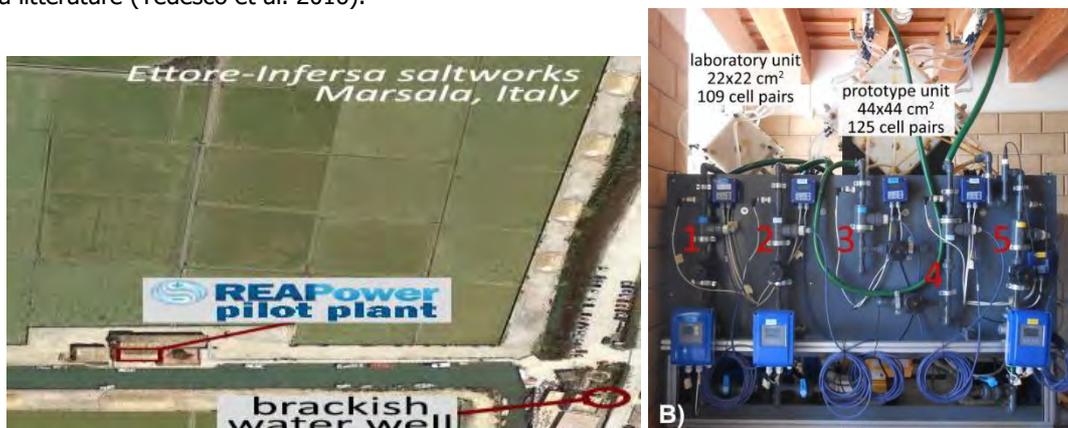


Figure 58 : centrale pilote d'énergie osmotique du salin d'Ettore-Infersa, Marsala, Italie. Source : Tedesco et al. 2016

Outre les **gradients naturels de salinité aux embouchures** et les **salins**, les sites industriels sont également envisagés. L'idée est d'utiliser des **eaux de procédés industriels** comme source d'entrée : saumures issues d'usine de désalinisation, effluents d'industrie chimique (production de chlore, de soude, d'épichlorhydrine).

*Osmose à pression retardée : la centrale pilote de Tofte en Norvège*

Une centrale pilote de capacité nominale 10 kW a été inaugurée à Tofte en Norvège en novembre 2009. Modulaire, elle est composée d'une unité de pré-traitement des eaux, de 66 tuyaux pressurisés contenant les membranes disposées en spirales enroulées, d'échangeurs de pression et d'une turbine. Les tuyaux représentent une surface d'environ 2000 m<sup>2</sup> de membrane.

Elle n'a semble-t-il pas atteint sa capacité nominale et la production était plutôt de l'ordre de 2 à 4 kW. L'infrastructure était dédiée au test et à l'amélioration des membranes, des procédés et des équipements.

Le projet a été mené par la société norvégienne Statkraft, issue de l'hydro électricité et l'un des principaux producteur européen d'énergie renouvelables. Statkraft a investi environ 18 millions d'euros dans cette centrale pilote. Le Ministère du Pétrole et de l'Énergie a apporté une aide financière via son organisme de promotion des Energies Renouvelables Enova, et le programme de recherche a été appuyé par le Conseil de la Recherche norvégien.



Figure 59 : centrale pilote d'énergie osmotique par pression retardée en Norvège. Source : Statkraft

Malheureusement, **Statkraft a abandonné la filière osmotique en décembre 2013**, peu après avoir annoncé le projet d'une centrale pilote de 1 à 2 MW (Power Magazine, 03/01/2014). La société a fini par abandonner l'osmose, préférant focaliser ses investissements sur d'autres sources d'énergies renouvelables plus compétitives et ayant connu un développement plus rapide ces dernières années.

### c) Conclusion et perspectives

L'osmose inverse est une technologie encore **trop peu mature** pour envisager son exploitation pour la production électrique. Elle met en œuvre des matériaux d'une technicité élevée dont les coûts sont encore trop élevés.

### 1.1.7. Stations de pompage-turbinage marines

#### a) Principe

Une STEP est une station de transfert d'énergie par **pompage-turbinage**. Elle permet de **stocker de l'énergie** électrique sous forme d'énergie potentielle grâce à deux bassins de stockage situés à des altitudes différentes, reliés par une ou plusieurs conduites hydrauliques et une centrale de pompage-turbinage. Quand la demande électrique est faible, l'électricité produite sur le réseau (de préférence renouvelable) est utilisée pour pomper l'eau jusqu'au bassin amont. Quand la demande électrique est élevée, l'eau est basculée vers le bassin aval et turbinée.

Il s'agit généralement d'infrastructures terrestres, réalisées avec des bassins de retenues, des lacs artificiels ou à proximité de rivières.

A la place d'eau douce, on peut utiliser de l'eau de mer. Le terme « STEP marine » est alors utilisé pour trois variantes distinctes :

- La variante terrestre littorale : le bassin amont est situé à proximité de la mer, et la mer joue le rôle de bassin aval. L'eau circule donc en circuit ouvert.
- L'île artificielle : le bassin de stockage est constitué d'un atoll artificiel. L'eau transite entre le lagon et la mer.
- La variante en mer : la STEP est constituée d'une infrastructure de stockage partiellement ou complètement submergée. Le remplissage s'effectue naturellement sous la pression de la colonne d'eau (cas submersion totale) ou sous le poids de la structure (cas semi-submergé), ce qui actionne la turbine. La phase de pompage permet de vider le volume de stockage.



Figure 60 : STEP littorale à terre (© EDF SEI), atoll artificiel (© Ecorem), STEP en mer (© buoyant-energy.com)

## b) Etat de l'art

Une **STEP littorale sur eau de mer** existe au Japon, sur l'île d'Okinawa à Kunigami. Construite en 1999, elle dispose d'une hauteur de chute de 136 m, d'un réservoir de stockage de 564 000 m<sup>3</sup>, d'un débit de 26 m<sup>3</sup>/s pour une capacité de 30 MW.

Malheureusement, les prévisions de consommation électrique de l'île sur lesquelles était basé le projet se sont avérées supérieures à la réalité et l'installation pilote a été fermée en 2016 pour manque de rentabilité.



Figure 61 : STEP marine d'Okinawa

Les **STEP sous forme d'îles artificielles ou d'exondements en mer** (dans le prolongement de ports ou de digues existantes notamment) sont encore au stade conceptuel. Elles sont adaptées aux faibles profondeurs puisque les digues qui forment l'île sont posées sur le fond marin. Leur attrait réside dans l'usage multiple de l'île : outre le stockage d'énergie potentielle, les surfaces terrestres et aquatiques de l'île (plan d'eau du bassin) peuvent servir à accueillir diverses activités : centrales photovoltaïques, aquaculture, parcs éoliens, zones urbaines, ports et zones industrielles, etc. Les principaux acteurs de ces technologies sont les pays pionniers dans l'aménagement littoral, les travaux maritimes et les îles artificielles comme le Danemark, les Pays-Bas, la Allemagne et le Moyen-Orient.

Pour les **STEP en mer**, sans mener de recherche approfondie, un projet a été identifié. Il s'agit d'un projet de R&D du Fraunhofer Institute (Allemagne), le projet Stensea (Stored Energy in the Sea). Il repose sur une **citerne immergée** posée sur le fond marin. Le pompage sert à vider les citernes, tandis que la production d'énergie s'effectue lors du remplissage des citernes sous la pression de la colonne d'eau.

Le projet prévoit un parc de citernes sphériques de 30 m de diamètres placées à 700 m de fond et équipées de turbines de 5 MW. En novembre 2017, un prototype de 3 m de diamètre a été testé 4 mois par 100 m de fond et à 200 m des côtes dans le lac Constance.

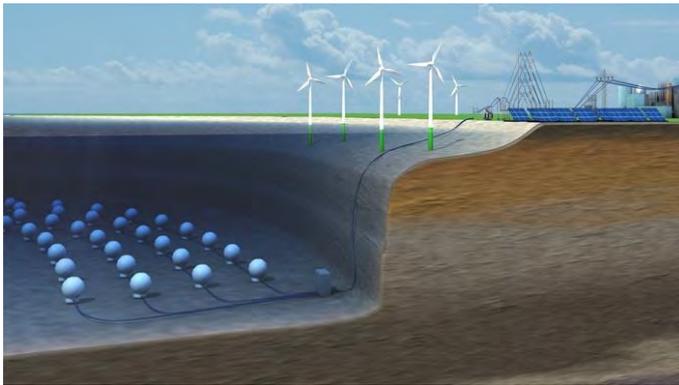


Figure 62 : projet de STEP marine Stensea, concept et prototype échelle 1/10<sup>e</sup>. Source : Fraunhofer IWES

### c) Autres techniques de stockage d'énergie en mer

D'autres techniques de stockage d'énergie en mer que le pompage-turbinage sont en réflexion. Citons par exemple :

- Le stockage par masse gravitaire. Ce concept repose sur une plateforme flottante offshore équipée de **pooids suspendus** qui translatent entre la plateforme et le fonds marin. La production d'énergie a lieu lors du lâcher des poids, qui tombent par gravité vers le fond marin.
- Les systèmes de **stockage à air comprimé**. Un projet pilote de 660 kW a été mis en service en novembre 2015 au Canada à Toronto, dans le lac Ontario. Le système est composé de 6 ballons posés sur le fond marin par 55 m de fonds à et 1 km de l'île de Toronto. L'énergie est stockée sous forme d'air comprimé dans des ballons, que la pression de la colonne d'eau équilibre. La production d'électricité s'effectue lorsque les ballons sont dégonflés.

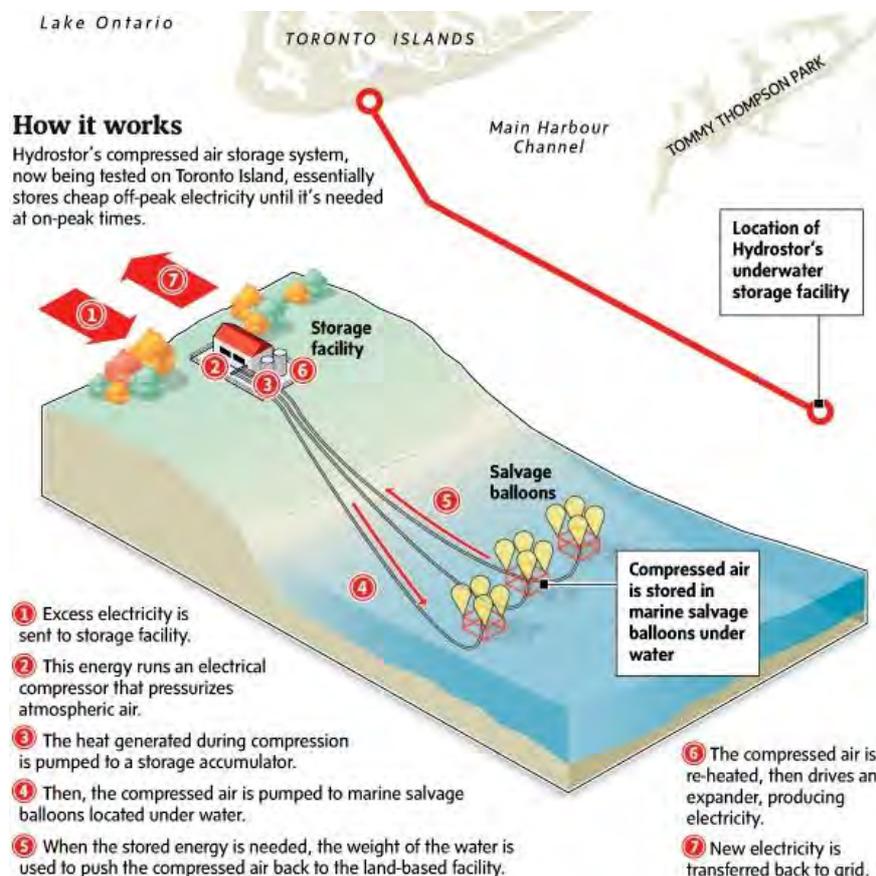


Figure 63 : stockage d'énergie sous forme d'air comprimé à Toronto.

#### d) Conclusion et perspectives

Le stockage d'énergie par **pompage-turbinage d'eau de mer** est un principe qui se décline en plusieurs concepts mais dont les réalisations restent **rare et encore expérimentales**. D'autres modes de stockage de l'énergie en mer ont été inventés, dont un système par air comprimé de 660 kW en démonstration au Canada.

Ces systèmes doivent encore faire leur preuve, mais il s'agit d'une **filière dont La Réunion doit suivre les évolutions pour envisager un développement à long terme**. En effet, le stockage de l'énergie est une condition nécessaire au développement du renouvelable.

#### 1.1.8. Eléments de coûts

S'agissant pour la plupart de technologies en développement, les constructeurs sont **réticents à dévoiler leurs coûts**. Les réalisations les plus avancées sont des installations pilotes de petite envergure, dont les coûts sont impactés par les tâtonnements des premières mises en œuvre. Les courbes d'évolution des prix dans l'industrie photovoltaïque, éolienne ou encore celle des turbines à gaz montrent que la marge de progression du coût est de l'ordre de 20% entre les débuts de la technologie et son avènement industriel (Project Finance, 2008).

Le programme collaboratif international « Ocean Energy System » a évalué en 2015 les coûts l'énergie de la houle, du courant et de l'énergie thermique des mers, sur la base d'un questionnaire international envoyé à une sélection de développeurs.

Tableau 10 : estimations des coûts de l'énergie de la houle, du courant et de l'énergie thermique des mers. Source : Ocean Energy System 2015

Deployment Stage	Variable	Wave		Tidal		OTEC	
		Min	Max <sup>1</sup>	Min	Max	Min	Max
First array / First Project <sup>2</sup>	Project Capacity (MW)	1	3 <sup>3</sup>	0.3	10	0.1	5
	CAPEX (\$/kW)	4000	18100	5100	14600	25000	45000
	OPEX (\$/kW per year)	140	1500	160	1160	800	1440
Second array/ Second Project	Project Capacity (MW)	1	10	0.5	28	10	20
	CAPEX (\$/kW)	3600	15300	4300	8700	15000	30000
	OPEX (\$/kW per year)	100	500	150	530	480	950
	Availability (%)	85%	98%	85%	98%	95%	95%
	Capacity Factor (%)	30%	35%	35%	42%	97%	97%
	LCOE (\$/MWh)	210	670	210	470	350	650
First Commercial-scale Project	Project Capacity (MW)	2	75	3	90	100	100
	CAPEX (\$/kW)	2700	9100	3300	5600	7000	13000
	OPEX (\$/kW per year)	70	380	90	400	340	620
	Availability (%)	95%	98%	92%	98%	95%	95%
	Capacity Factor (%)	35%	40%	35%	40%	97%	97%
	LCOE (\$/MWh)	120	470	130	280	150	280

CAPEX : Capital Expenditures = coûts d'investissement initiaux pour construire l'installation.

OPEX : Operational Expenditures = coûts d'exploitation, d'entretien et de maintenance de l'installation.

LCOE : Levelized Cost of Energy = coût de production de l'énergie.

### a) Coût du houlomoteur

Les rares données trouvées pour les sites pilotes **houlomoteurs** opérationnels se situent dans la fourchette basse des CAPEX donnés par l'OES pour les premiers projets d'échelle commerciale :

- Centrale de Mutriku, mise en service en 2011 : sur ce système à colonne d'eau oscillante intégré à un projet d'aménagement portuaire, le système houlomoteur a coûté 2,3 millions d'euros pour une puissance nominale d'environ 300 kW, tandis que les ouvrages portuaires ont coûtés 4,4 millions d'euros (El Pais, 2012). Soit un coût d'investissement de l'ordre de **2600 €/kW** (système houlomoteur seul) ou de 22 300 €/kW (système + digues portuaires).
- Parcs offshore de technologie SeaBased : pour le parc de Sotenas en Suède (1 MW mis en service en 2016), l'investissement annoncé était de 28 millions d'euros pour 10 MW initialement (Source : Renewables Now, 2016), soit un coût de **2800 €/kW**. Pour le parc de 180 kW installé en 2015 au Ghana, le coût n'est pas connu mais un contrat de 200 millions de dollars US a été signé en 2018 pour une extension de 100 MW (Source : Renewables Now, 2018), soit **1700 €/kW**.

Le projet PELAMIS porté à la Réunion par SEAWATT en 2009 tablait sur un coût de 25 millions d'euros pour 5 machines PELAMIS de 1 MW, soit un CAPEX de l'ordre de **5000 €/kW**.

### b) Coût de l'éolien en mer flottant

Pour l'éolien en mer flottant, le premier parc pilote Hywind II de 5 éoliennes de 6 MW mis en service en 2017 en Ecosse a coûté 214 millions d'euros, soit un ratio de **7100 €/kW**. En comparaison, les parcs éoliens offshore sur fondations posées réalisés en Grande Bretagne ont des coûts presque deux fois moindre<sup>14</sup>.

En France, les projets d'éolien flottant prévus bénéficient d'un prix d'achat garanti de l'électricité de **240 €/MWh**. Avec la mise en œuvre des innovations et des premiers parcs commerciaux, les coûts complets de production (LCoE) en 2030 pourraient atteindre entre **62 à 102 €/MWh** (France Energie Eolienne).

En éolien posé, les tarifs de rachats de l'électricité garantis sur 20 ans ont été renégociés entre 150 et 200 €/MWh pour les parcs issus des 1ers et 2<sup>e</sup> appels d'offres. Le dernier appel d'offres éolien en mer posé de 2017 prévoit un tarif de rachat sans subvention, au prix du marché. Il a été adjugé à **50 €/MWh** (garanti sur 20 ans).

### c) Coût de l'énergie thermique des mers pour la production électrique

Les éléments de coût pour la production d'électricité à partir d'énergie thermique des mers, présentés ci-dessous, sont tirés du rapport ADEME de 2018 sur l'autonomie énergétique à l'horizon 2030 à la Réunion. Ils correspondent aux estimations de l'OES figurant au Tableau 10.

- Le Pacific International Center for High Technology Research estime, dans une étude de 2015, que les coûts d'une centrale de production d'électricité ETM de 5 MWe à 2020 seront compris entre 13 et 17 €/W.
- Ce coût d'investissement correspond au budget estimé en 2012 par la société Energy Island Bell Pirie Ltd. pour une centrale de production d'électricité ETM de 10 MWe à cycle fermé à Cabangan dans les Philippines, associé à un coût de l'électricité produite en 2020 de 140 €/MWh.
- L'investissement de la récente centrale terrestre à Hawaï, construite en 2015 pour une puissance de 100 kWe, a été de 45 €/W. Selon les développeurs, le coût excluant le volet R&D aurait été de 27 €/W.
- France Energie Marine estime, dans une étude conduite par Indicta, un coût d'investissement de 10 €/W en 2020 contre 20 €/W en 2015, pour des charges d'exploitation de 250 €/MWh.
- Avec les hypothèses d'un coût d'investissement de 17 €/W et de coûts d'exploitation de 250 €/MWh, l'étude ADEME estime le LCOE à 412 €/MWh en 2025.

<sup>14</sup> Par exemple le parc de Teeside (62 MW, 27 éoliennes, mis en service en 2013) : 228 millions d'euros, soit 3600 €/kW. Ou celui de taille plus modérée d'Aberdeen (93,2 MW, 11 éoliennes, en construction en 2018), voisin de celui d'Hywind II : 382 millions d'euros soit 4000 €/kW.

#### d) Coût de l'énergie thermique des mers pour la production de froid

Voici ci-dessous recensés les coûts d'investissement communiqués de SWAC situés en Outre-Mer:

- SWAC de l'hôtel Intercontinental à Bora Bora, Polynésie Française, mis en service en 2006 : investissement de 6,6 millions d'euros pour 1,5 MW<sub>froid</sub>, soit **4,4 €/W<sub>froid</sub>**. L'installation permet d'économiser 1 millions d'euros par an comparé à une climatisation classique (source : Pacific Beachcomber SC, 2008).
- SWAC Nord du SIDEO à la Réunion, projet de 40 MW<sub>froid</sub> abandonné en 2016 : investissement de 140 millions d'euros (dont 48 600 000 € pour les conduites en mer et 21 300 000 € pour la station de pompage), soit **3,5 €/W<sub>froid</sub>**.
- SWAC du Centre Hospitalier de Polynésie Française, projet de 6 MW<sub>froid</sub> pour un coût estimé à 23 millions d'euros (appels d'offres des marchés de travaux lancés en 2018), soit **3,8 €/W<sub>froid</sub>**.

A ces coûts d'investissement, il convient de rappeler que la climatisation à partir d'eau de mer profonde (SWAC) permet d'économiser jusqu'à 90% de la consommation électrique par rapport à un système classique.

## f) Conclusion et perspectives

Bien que le retour d'expérience sur les coûts soit incomplet, les éléments disponibles permettent toutefois de donner quelques **tendances** par filières.

Avec une filière balbutiante, pas encore industrialisée et des puissances électriques relativement faibles, le **houlomoteur** ne peut **pas encore** être **compétitif**, sauf cas spécifiques (sites isolés, pompage, désalinisation, etc.) ou mutualisations avec des ouvrages portuaires.

**L'hydrolien** peine lui aussi à s'industrialiser, et là encore, ne devient **compétitif qu'en faveur de caractéristiques de site bien précises**.

**L'éolien en mer**, filière récente en France, parvient depuis peu à égaler les prix du marché de l'électricité pour les technologies classiques fondées au sol. **En flottant, le surcoût sur le tarif d'achat de l'électricité est de l'ordre de 5%** par rapport aux fondations classiques, et ce, pour les premiers parcs démonstrateurs. L'écart devrait vraisemblablement s'atténuer avec l'augmentation du parc.

**L'énergie thermique des mers** pour la production d'électricité est encore au stade de R&D. En revanche, pour la production de froid, les coûts d'investissements plus élevés que les systèmes classiques se compensent par les économies d'électricité réalisées au cours de la durée de vie du système.

A une échelle plus large, outre ces éléments, l'analyse économique doit également prendre en compte l'impact de tels projets sur les émissions carbone, la contribution à l'indépendance énergétique, l'industrialisation, l'économie bleue, l'emploi, le rayonnement international de l'île, le dépôt de brevets, etc.

Tableau 11 : ordres de grandeur des coûts des différents types d'énergies marines

Energie marine	Coût d'investissement	Coûts d'exploitation	Coût de l'énergie
<b>Energie de la houle</b>	<b>2,5 à 15 €/W</b> selon les technologies et le degré d'industrialisation	<b>3 à 8%</b> des coûts d'investissement selon la technologie	<b>150 à 650 €/MWh</b> selon les technologies et le degré d'industrialisation
<b>Energie des courants marins</b>	<b>3 à 15 €/W</b> selon les technologies et le degré d'industrialisation	<b>3 à 8%</b> des coûts d'investissement selon la technologie	<b>130 à 500 €/MWh</b> selon les technologies et le degré d'industrialisation
<b>Eolien en mer flottant</b>	<b>3,5 à 4 €/W</b>	≈ <b>4%</b> des coûts d'investissement	Actuellement <b>240 €/MWh</b> (prix d'achat de l'électricité des projets démonstrateurs en métropole)
<b>Energie thermique des mers : électricité</b>	<b>200 à 450 €/W</b> (projets actuels Réunion) 10 à 30 €/W (estimations à longue échéance)	<b>1%</b> des coûts d'investissement	Modèle économique non consolidé car encore au <b>stade prototype</b>
<b>Energie thermique des mers : climatisation</b>	≈ 50% + cher qu'un système classique <b>3,5 à 4,5 €/W<sub>froid</sub></b>	maintenance ≈ 50% - chère - 80 à 90% de consommation électrique	≈ <b>30-45 €/MWh<sub>froid</sub></b>
<b>Osmose</b>	Modèle économique non consolidé car encore au <b>stade recherche</b>		
<b>Stockage d'énergie en mer</b>	Modèle économique non consolidé car encore au <b>stade recherche / prototype</b>		

### 1.1.9. Aspects environnementaux

#### a) Principaux effets potentiels des énergies marines sur l'environnement

Par leur nature et par leur caractère nouveau, les installations d'énergie marine renouvelables ont un devoir d'exemplarité vis-à-vis de l'environnement. Les projets d'énergies marines font donc l'objet de programmes de suivi et d'étude scientifiques. Parmi les thématiques les plus étudiées, on peut citer :

- L'impact des **bruits sous-marins** des machines sur les **cétacés** (dauphins et baleines principalement).
- L'impact des **champs électromagnétiques** générés par les **câbles électriques** sous-marins sur les espèces marines les plus sensibles : cétacés, tortues marines, élaémobranches, certaines espèces de poissons, crustacés et mollusques.
- Les **risques de collision** avec la structure ou les éléments mobiles / **coupures** par les pâles de turbine / **enchevêtrement** dans les câbles d'atterrage.
- Les **modifications d'usage des habitats** et/ou de comportements **de déplacement** des espèces animales (surtout dans le cas de projets de grande emprise).
- Les changements dans la **structure des habitats, notamment benthiques**.
- L'effet attractif des structures sur les poissons (**effet DCP** ou récif artificiel).

La Figure 64 page 70 présente une synthèse des principaux effets potentiels des énergies marines sur l'environnement marin en fonction de l'étape du cycle de vie et des éléments constitutif de la machine.

#### b) Limites de la démarche d'évaluation des impacts

L'évaluation des impacts consiste à **croiser la sensibilité du milieu** avec les **effets produits par l'installation**. La difficulté de cette démarche réside souvent dans les points suivants :

- Il faut arriver à **caractériser la variabilité naturelle du milieu**. Si l'on sait généralement évaluer la variabilité naturelle du milieu physique (température ou composition physico-chimique de l'eau de mer par exemple), la variabilité dans le milieu vivant est souvent moins facile à évaluer : par exemple variation naturelle d'une population animale (en nombre d'individus) ou d'un écosystème (en richesse ou en diversité d'espèces), variations comportementales d'une espèce dans ses trajectoires de déplacements, dans son régime alimentaire, etc.

Selon le sujet d'étude, plusieurs années de suivi peuvent être nécessaires pour caractériser la variabilité.

Cette variabilité naturelle sera ensuite à comparer à la variation produite par l'installation. Là encore, le distinguo peut être difficile à établir et devenir sujet à débat.

- Il faut essayer de **quantifier le phénomène produit par le projet d'énergie marine**. Les paramètres importants à considérer pour cela sont :
  - Intensité du phénomène (intensité des bruits émis par le système, fréquence de rotation ou d'oscillation, concentration d'un polluant, vitesse du flux etc.), et sa variabilité (plage de variation et périodicité) ;
  - Durée du phénomène (ponctuel ou permanent), à quelle fréquence, durant quelle période de l'année ou de la journée ;
  - Volumes, surfaces ou distances impactées (débits d'eau, surface du parc, distance de visibilité).

Ces éléments doivent parfois être estimés, ou extrapolés à partir de réalisations de moindre ampleur (prototypes et essais préalables). Des suivis sont donc prévus pour vérifier que la réalité correspond bien aux estimations.

L'évaluation des impacts est donc **spécifique à chaque projet** ; elle dépend à la fois des caractéristiques du site d'implantation et de la technologie d'énergie marine choisie. Pour cette raison, dans la suite du rapport, nous nous contenterons de parler d'effets potentiels et non d'impacts, et nous nous limiterons aux effets les plus significatifs.

Enfin, de façon générale, une démarche d'évaluation des impacts doit également prendre en compte les effets directs, mais aussi les effets indirects et les effets cumulés. Ces analyses ne relèvent pas du présent document, aussi, nous ne rentrerons pas dans ces considérations sauf si elles sont évidentes.

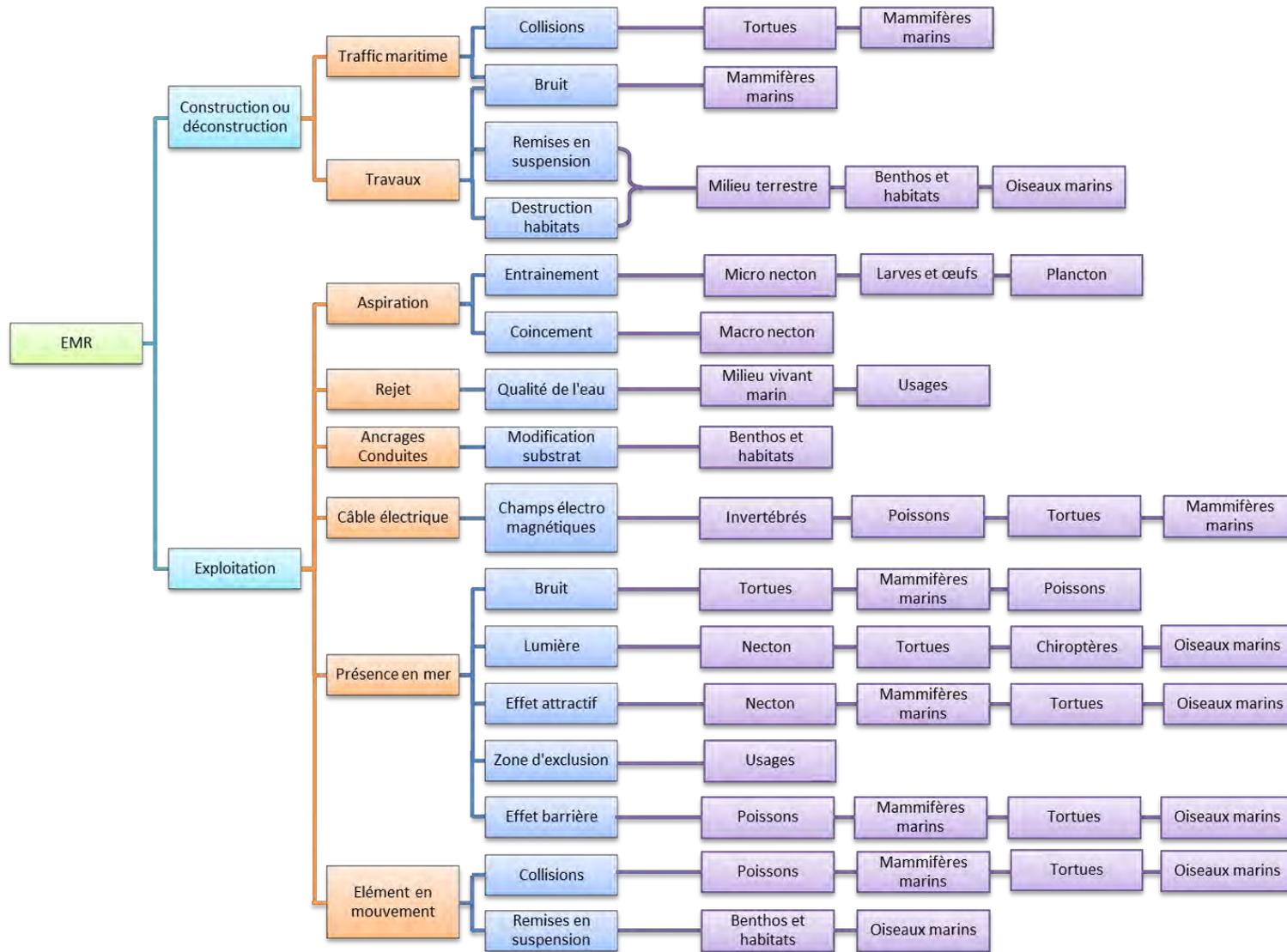


Figure 64 : synthèse des effets potentiels des énergies marines sur l'environnement(B. DIAZ 2012)

## 1.2. Etat des lieux à la Réunion

L'objectif de cet état des lieux est :

- D'identifier les données disponibles nécessaires aux projets d'énergies marines,
- De résumer les caractéristiques du territoire réunionnais au regard des énergies marines,
- De faire le retour d'expérience des projets passés,
- D'effectuer un bilan de la connaissance du potentiel énergétique de l'île.

Ces éléments sont présentés ci-après.

### 1.2.1. Données d'entrée disponibles et organismes de référence

Les principales données de référence pouvant servir à caractériser un site dans le cadre d'un projet d'énergie marine renouvelable sont présentées ci-après.

#### a) Données météo-océaniques

S'agissant des **données de suivi in-situ** disponibles, il est difficile d'être exhaustif. Sur la base des informations recueillies auprès des phares et balises de la DMSOI et auprès des maîtres d'ouvrages, le tableau ci-dessous résume les suivis menés sur du moyen ou long terme par des organismes publics. Les suivis réalisés pour des maîtres d'ouvrage privés ou dans le cadre d'autres projets que la NRL ne figurent pas au tableau.

Tableau 12 : liste des données locales in situ

Maître d'Ouvrage	Paramètres	Localisation	Profondeur (m)	Durée ou période	Commentaire
<b>CEREMA</b> (réseau CANDHIS)	Houle	Pointe du Gouffre	31	15/05/2000-03/01/2013	Plus en service
		Pointe du Phare (Le Port)	20	07/02/1997-20/11/1997	Plus en service
		Saint-Pierre	27	26/09/2000-16/11/2010	Plus en service
		Vincendo	30	03/09/2004-20/03/2009	Plus en service
		Sainte-Rose	35	22/11/2000-05/02/2002	Plus en service
<b>Grand Port Maritime de la Réunion</b>	Houle	Baie de la Possession (Port-Est)	25	19/11/1996-12/04/2015	En arrêt mais doit être remis en service fin 2018.
		Rivière des Galets (Port-Ouest)	33	25/02/1997-actuell.	Opérationnel, données intégrées au réseau CANDHIS mais pas mises en ligne en temps réel.
<b>SHOM</b>	Marée	Port-Ouest	/	27/02/1967-actuell.	Partenariat SHOM/DEAL/Météo France.
		Port de Sainte-Marie	/	22/05/2013-actuell.	Partenariat SHOM/CCIR/CINOR.
<b>Mairie de Saint-Paul</b>	Houle	Pointe des Aigrettes	40 m	12-2015 09-2017	Plus en service. Déployé dans le cadre des filets anti-requins.
<b>Observatoire de l'Univers de la Réunion</b>	Houle Courant T°C	Hermitage, Trou d'eau (radiales côte/large)	< 15 m à 100 m	Quelques mois	Campagnes régulières dans le cadre de travaux de recherche.
<b>Région Réunion</b> (chantier NRL)	Pluie, vent Houle Courant	La Possession et Saint-Denis	< 50 m	2014-en cours	Bouées iXSurvey du contrôle extérieur physico-chimie eau & sédiments
	Météo	Plusieurs sites à préciser	< 50 m	A préciser	Bouées Nortekmed pour le contrôle

Maître d'Ouvrage	Paramètres	Localisation	Profondeur (m)	Durée ou période	Commentaire
					extérieur du bruit sous-marin
<b>GTOI</b>	Météo	La Possession	< 50 m	A préciser	Suivi interne de la société de travaux sur les marchés de travaux digue (MT5.1) et échangeur de la Possession (MT2).
<b>SDI</b>	Houle	Plusieurs sites à préciser	< 50 m	A préciser	Suivi interne de la société de dragage

S'agissant des **études**, on peut citer les suivantes :

Le **projet HOULREU** mené par le BRGM en 2009 a permis de quantifier la houle centennale de référence sur les façades littorales de la Réunion.

Le **projet HYDRORUN** mené par l'IFREMER en 2012 a permis de développer une plateforme de modélisation hydrodynamique couvrant l'ensemble du littoral Réunionnais. Ce projet a permis de constituer un référentiel bathymétrique des fonds côtiers de l'île de La Réunion à une résolution de 100 m. Des synthèses annuelles et saisonnières de houles, de courants et de températures des masses d'eau ont également été générées.

Le **projet CALHYCO** (Caractérisation de l'ALéa Hydrodynamique Côtier à La Réunion) mené par l'Observatoire des Sciences de l'Univers de la Réunion de 2016 à 2018 a pour objectif de développer un modèle numérique des couplages océan-atmosphère afin d'améliorer les prévisions des trajectoires de cyclones.

De même, le programme ReNovRisk (Recherche innovante sur les risques naturels) s'intéresse à l'impact du changement climatique sur les risques naturels. Dans ce cadre, le **projet Renovrisk-C3** (Cyclones & Changement Climatique) mené par le LACY (Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones) de l'Université de la Réunion travaille également sur les interactions océan-atmosphère.

Ces deux projets (CALHYCO et Renovrisk-C3) menés par l'Université de la Réunion ont permis d'effectuer, entre autres :

- Une ré-analyse de modèle de vagues (modèle Wave Watch 3) sur l'ensemble du Sud-Ouest de l'Océan Indien, à 0.5° de résolution, sur la période 2013-2017<sup>15</sup>. Elle a pour objectif d'être alimentée et améliorée au fil de l'eau.
- Une analyse sur le climat des houles autour de La Réunion, sa variabilité intra et inter-saisonnière.
- Des campagnes d'acquisition de données météo-océaniques côtières.

Le **chantier de la Nouvelle Route du Littoral** lancé par la Région Réunion en 2014 a permis de réaliser un suivi continu des conditions météo-océaniques en 2 stations de mesures (Possession et Saint-Denis).

## b) Données qualité de l'eau

Les principales données de qualité des eaux marines à la Réunion sont issues des suivis réglementaires imposés par la Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE du 23 octobre 2000 (« DCE »). L'IFREMER est chargé de la mise en œuvre de ces suivis à la Réunion. Le Réseau de Contrôle et de Surveillance (RCS) de la DCE intègre :

- **12 masses d'eaux côtières** dont la limite s'étend jusqu'à 1 mile nautique des côtes (voir Figure 66 page 74). Ces 12 masses d'eau se classent en 5 types, selon l'exposition aux facteurs météorologiques, la bathymétrie et la nature du substrat ;
- Des paramètres de suivis qualitatifs et quantitatifs sur **l'écologie** et la **chimie des masses d'eau** (voir Tableau 13 page 73).

<sup>15</sup> Disponible sur : <https://geosur.univ-reunion.fr/web/inventaire/>

Tableau 13 : Fréquence et périodicité minimum du contrôle de surveillance DCE (en italique : fréquence et périodicité adaptées). Source : Ropert et. al. 2012

Réseaux	Fréquence des suivis par année	Nombre d'années de suivi par plan de gestion
Physico-chimie	6 / an	6 / 6 ans
Phytoplancton (biomasse)	6 / an	6 / 6 ans
Phytoplancton (abondance, composition)	3 / an	6 / 6 ans
Contaminants chimiques (eau)	3 ou 6 / an <i>au lieu de 12 / 1 an</i>	2 / 6 ans <i>au lieu de 1 / 6 ans</i>
Contaminants chimiques (biote)	1 / an	2 / 6 ans
Benthos de substrats meubles	1 / an	2 / 6 ans
Benthos de substrats durs	1 / an	2 / 6 ans

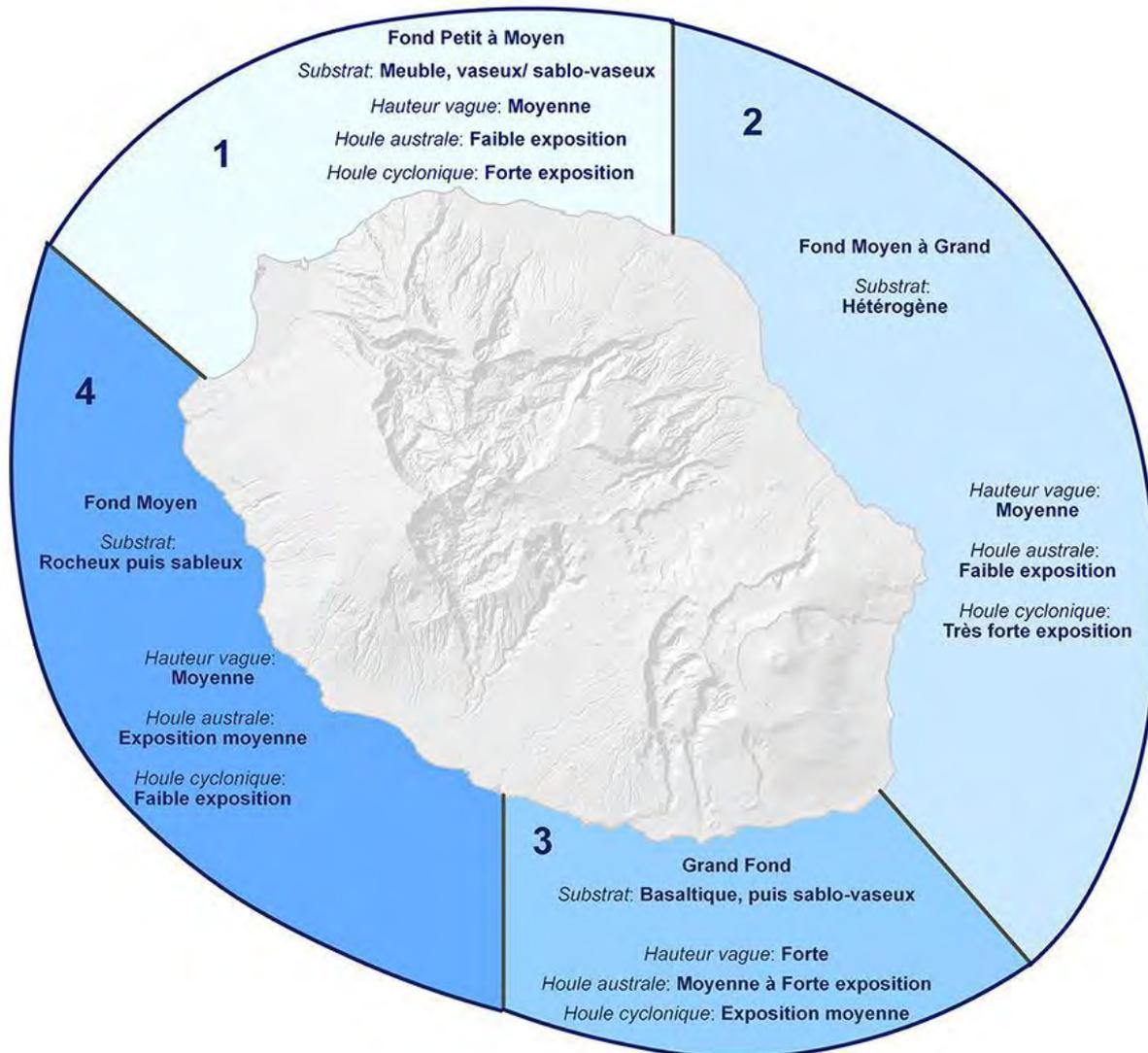


Figure 65 : typologie des masses d'eau côtières DCE. Le 5<sup>e</sup> type n'est pas représenté à cette échelle, il s'agit des masses d'eau récifales.

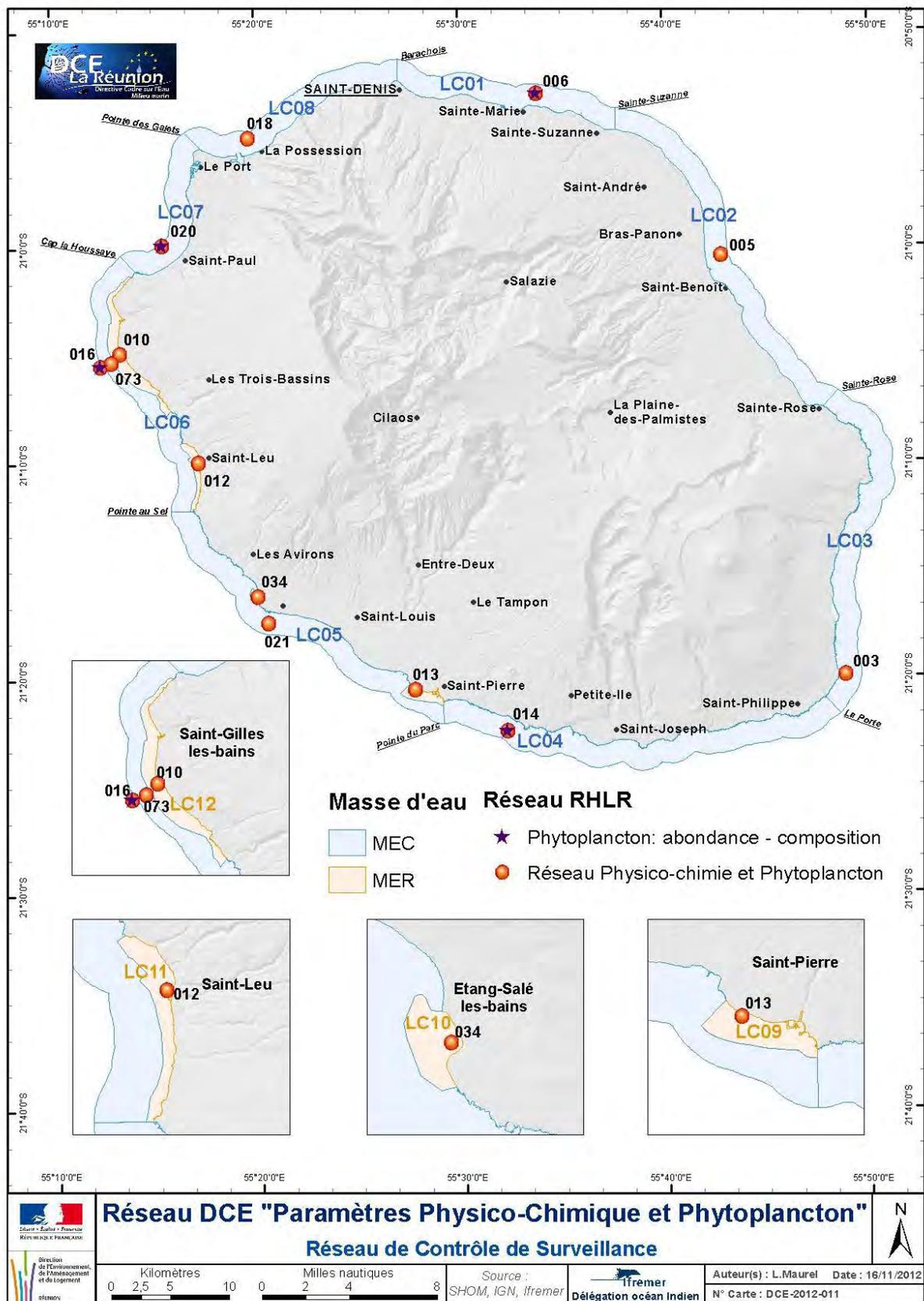


Figure 66 : Masses d'eaux côtières et réseau de suivi physico-chimie DCE.

Par ailleurs, dans le cadre des actions de surveillance du milieu récifal soutenues par l'Observatoire des Sciences de l'Univers de la Réunion et inscrite au Plan de Gestion de la Réserve Naturelle Marine de la Réunion (programme OT-RUN), une **station d'observation** de différents paramètres physico-chimiques de l'eau de mer (pH, CO<sub>2</sub>, température, Salinité) a été mise en place sur le **récif de La Saline, à Trou d'eau**. L'objectif est d'enregistrer sur le long terme l'évolution de ces paramètres, affectés par le changement global, et d'observer la réponse de l'écosystème à leurs variations temporelles.

On peut également citer les suivis de la qualité de l'eau menés dans le cadre du chantier de la NRL.

### c) Données de bathymétrie et géomorphologie

Le BRGM réalise depuis 2004 un **suivi de la morphodynamique des littoraux** en partenariat avec la Région et l'Etat. Les profils de plage sont suivis sur 12 sites sensibles autour de l'île à une fréquence annuelle et événementielle. Dans le cadre des projets CALHYCO et RenovRisk, le BRGM et l'Université de la Réunion effectuent le **suivi de 22 profils de plage sur le littoral récifal**, à une fréquence de 2 profils par an encadrant les saisons de houle de l'été et de l'hiver austral. L'impact des événements de fortes houles (cyclones, houles australes) est mesuré systématiquement sur les sites de l'Hermitage, qui font partie du réseau du Service National d'Observation, et plus sporadiquement sur les autres.

Le programme national **Litto3D®** a permis de produire un modèle numérique altimétrique de référence sur la frange littorale avec une continuité terre-mer précise. Réalisé à la Réunion par le SHOM et l'IGN en partenariat avec la Préfecture de la Réunion, il décrit la bande littorale :

- en mer, jusqu'à l'isobathe 10 m et au plus jusqu'à 6 miles marins des côtes;
- sur terre, jusqu'à l'altitude +10 m et à au moins 2 km à l'intérieur des terres.

La dernière version date de 2012.

Le projet **HYDRORUN** mené par l'IFREMER en 2012 a permis, à travers la compilation des modèles existants, de constituer le premier référentiel bathymétrique homogène pour l'île de la Réunion. D'une maille de 100 m, il couvre les fonds compris entre 0 et près de 3 000 m.

Dans le cadre du projet **SPECTRHABENT-OI**, l'IFREMER a réalisé 2014 une bathymétrie plus fine des zones récifales des communes de Saint-Paul et Saint-Leu. Cette bathymétrie est issue d'une fusion entre le MNT Litto3D Lidar de résolution 1 m et les images hyperspectrales de résolution spatiale 40 centimètres, après traitement de la colonne d'eau.

Le projet **CARTOMAR** (Guenoc et al., 2008) a permis de produire une cartographie du substrat des zones comprises entre des profondeurs de 20 m et 100 m autour de La Réunion. La nature des fonds (meubles/durs) et les grands types sédimentaires (depuis les sables grossiers jusqu'aux sédiments vaseux) ont pu être identifiés sur une bonne partie des zones côtières de l'île.

Sur la zone Ouest, d'autres données issues du projet SPECTRHABENT-OI viennent préciser la nature des fonds : images du fond marin corrigées des effets de la colonne d'eau, cartographie et taux de recouvrement de sable, d'algues et d'herbiers sur les plateformes récifales, classification des types de fonds, etc.

### d) Données écologiques

Les principaux acteurs et producteurs de données écologiques pour l'île de la Réunion sont les suivants :

- La DEAL, qui pilote, finance ou coordonne de nombreux projets ;
- Les propriétaires et gestionnaires d'espaces naturels tels que :
  - Réserve Naturelle Marine de la Réunion ;
  - Conservatoire du Littoral ;
  - ONF ;
- Les associations naturalistes :
  - Globice pour les mammifères marins ;
  - Kelonia pour les tortues marines ;
  - La SEOR (Société d'Etudes Ornithologiques de la Réunion) pour les oiseaux ;
  - Nature Océan Indien pour les reptiles ;
  - Le Conservatoire Botanique National de Mascarin pour la flore ;
- Les organismes de recherche :
  - L'Unité Mixte de Recherche ENTROPIE (Ecologie Marine Tropicale des Océans Pacifique et Indien) ;
- A une échelle plus locale, les bureaux d'études réalisant les inventaires pour les projets d'aménagement.

En termes d'état de la connaissance, on peut citer de façon non exhaustive :

- La cartographie des **habitats littoraux** à l'échelle 1/25000<sup>e</sup>, initié en 2011 par la DEAL selon une méthodologie homogène.
- La cartographie des **habitats récifaux** de 2015 (NICET JB., MOUQUET P., TOLLIS S., BIGOT L. 2016) ;
- La cartographie des sites de ponte de **tortues marines** à la Réunion entre 1980 et 2011 et des zones de nidification potentielles (Atlas POLMAR – Kelonia DOI 2012) ;
- La cartographie des fréquences d'observations annuelles, abondances relatives et position des observations de **cétacés** à la Réunion réalisées par Globice ;
- La cartographie des zones principales de passage, de nidification et de rassemblement des différentes espèces **d'oiseaux marins** à la Réunion, compilation de données effectuée par la DEAL, révisée en 2016. Les comptages radars réalisés à la côte dans le cadre de la thèse de Benoit Gineste permettent de quantifier très finement les couloirs de vol. Ces cartes ne prennent pas en compte l'activité en mer des oiseaux. Ces données terrestres sont donc à compléter par les suivis géolocalisés d'oiseaux effectués par l'UMR Entropie, qui permettent de connaître les trajets en mer des oiseaux.

#### e) Synthèse – données disponibles

Les travaux scientifiques de ces dernières années ont permis de bien caractériser le contexte océanographique, en particulier s'agissant des fonds marins et de la frange côtière (typologie, bathymétrie/topographie littorale, habitats, etc.). La houle et la marée disposent de suivis continus, les autres paramètres hydrodynamiques n'ont fait l'objet que de mesures ponctuelles. Les données météorologiques ne concernent que la zone terrestre, ou les espaces marins adjacents au niveau de la NRL.

## 1.2.2. Principales caractéristiques du territoire réunionnais au regard des énergies marines renouvelables

### a) Un environnement contraint

#### *Des fonds très pentus*

Le relief sous-marin de la Réunion se caractérise par une pente importante. La **bande côtière de 0 à 50 m très étroite** (entre 200 m et 2 km de large, voir Figure 29 page 35) est favorable à l'énergie thermique des mers. En revanche, cela restreint les sites potentiels pour de l'hydrolien ou du houlomoteur, dont les technologies ne sont aujourd'hui pas implantées dans plus d'une cinquantaine de mètres de fonds. Hormis pour les systèmes posés au fonds, on peut imaginer que les techniques de l'offshore permettront de dépasser ces profondeurs à très long terme. Pour l'éolien, la filière industrielle déjà existante (en mer comme à terre) permet d'envisager des projets qui s'affranchissent de la profondeur (éolien flottant) à des échéances de temps plus courtes (dizaine d'année).

Enfin, il faut garder à l'esprit que la Réunion est un édifice volcanique qui évolue au grès des activités éruptives (apports de matériaux) et de phénomènes érosifs intenses (perte de matériaux). Ces phénomènes se prolongent également en mer. L'**instabilité des pentes sous-marines**, les risques d'éboulement ou encore les transferts de sédiments le long des chenaux d'érosion sont donc à considérer.

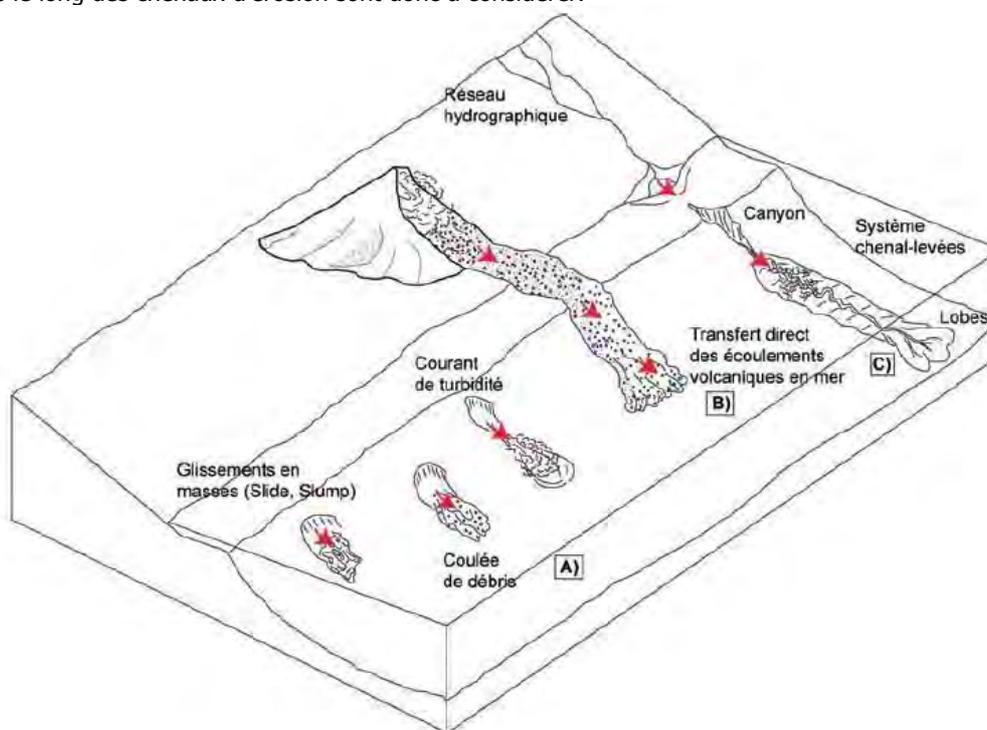


Figure 67 : principaux processus de transfert des sédiments volcanoclastiques dans le domaine profond : A) écoulement en domaine sous-marin B) continuité directe en mer des écoulements volcaniques formés à terre C) transfert en mer des sédiments par le réseau hydrographique terrestre. Sisavath 2011, modifié d'après Babonneau 2002.

#### *Une grande variété de côtes et de fonds marins*

Le littoral réunionnais se caractérise par une grande variété de côtes : **cordons de galets** au Nord et à l'Est, **falaises volcaniques et côtes rocheuses basses** dans le Sud, **côtes sableuses et cordons dunaires** d'origine corallienne ou volcanique à l'Ouest, plus quelques **plaines alluviales** et baies de comblement (Rivière du Mât, plaine du Gol, baie de Saint-Paul). Les côtes rocheuses basses, les plus favorables à l'implantation d'énergies marines à terre, ne représentent que 23 km du linéaire total.

Les plages de galets se prolongent en mer en des **fonds sablo-vaseux** de faible sensibilité écologique. Les falaises littorales et côtes rocheuses sont associées à des **fonds basaltiques** souvent colonisés par le corail avec des sensibilités moyennes à fortes. Enfin, à l'Ouest et au Sud, les fonds marins se composent de **récif coralliens** discontinus sur une surface de l'ordre de 12 km<sup>2</sup>, formant dans certains cas des lagons : Saint-Gilles, Saint-Leu, Étang-Salé et Saint-Pierre.

Les grands enjeux liés à la nature des côtes et fonds sous-marins pour l'implantation d'énergies marines renouvelables sont les suivants :

- Dans l'Ouest, le littoral sableux est meuble donc mobile. Ces zones peuvent être soumises à des variations importantes du profil de plage (hauteur de sable) ou du trait de côte (recul ou avancée du littoral). Dans les zones urbanisées, les constructions en bord de mer posent problème en raison des risques de submersion et à cause de la déstabilisation des fondations provoquée par l'érosion, érosion que l'urbanisation accentue considérablement. Par conséquent, l'implantation d'ouvrages ou le passage de câbles ou de canalisations doit **prendre en compte cette mobilité et veiller à ne pas fixer le trait de côte**.
- Dans le Nord et l'Est, les cordons de galets rendent difficile l'implantation d'ouvrages côtiers. Comme les plages de sable, ils forment un ensemble mobile qui évolue au grès de la houle et des crues. **L'impact des galets sur les ouvrages doit être pris en compte**. A Bois-Rouge par exemple, la canalisation de rejet des effluents de la distillerie Savannah est enterrée sur sa partie terrestre pour la protéger.
- Dans le Sud, **la hauteur des côtes rocheuses** nécessite de faire passer les câbles et conduites par des forages dirigés (solution proposée pour le SWAC de l'hôpital de Saint-Pierre). **L'instabilité des falaises et le risque d'éboulement en contre-bas** est également à considérer.

#### *Un linéaire de côtes soit urbanisé, soit protégé*

Dans le Sud de l'île où se situe le potentiel le plus intéressant pour l'énergie de la houle, quasiment l'intégralité du linéaire est classé Espace Naturel Remarquable du Littoral par le SAR/SMVM<sup>16</sup> 2011.

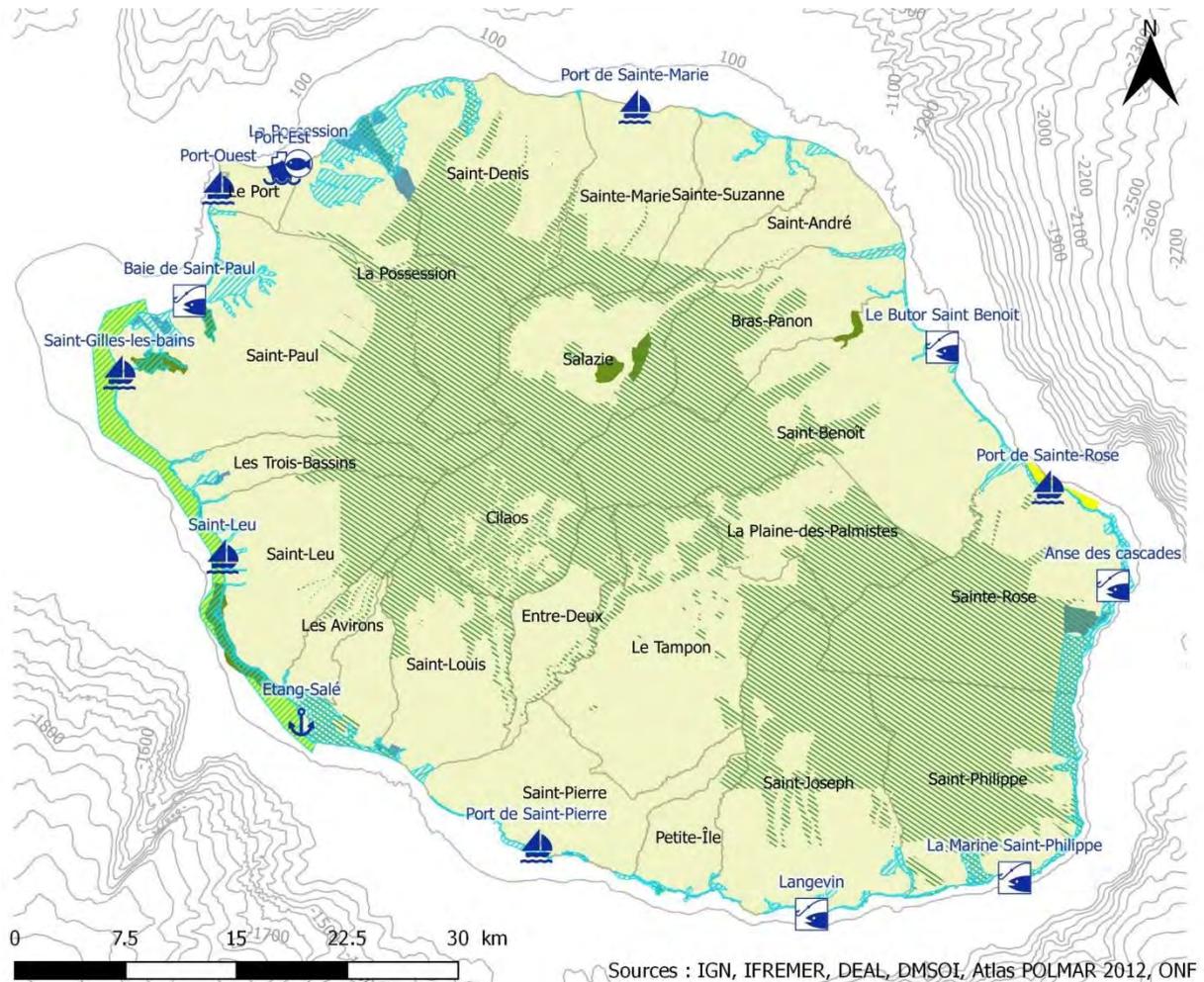
- Dans les **Espaces Naturels Remarquables terrestres du Littoral**, seuls les aménagements liés à la conservation et à la protection des milieux naturels et du bâti historique, à leur gestion, à leur mise en valeur et à l'accueil du public sont autorisés sous conditions, ainsi que les aménagements liés aux activités agricoles, pastorales, forestières, piscicoles, aquacoles et salicoles traditionnellement implantées. Ces équipements sont autorisés à condition notamment de permettre un retour à l'état initial du site, et pour certains, à condition d'être légers et démontables. **Par conséquent, dans ces espaces, les ouvrages de production électrique ne sont pas autorisés**.
- Dans les **Espaces Naturels Remarquables marins du Littoral**, qui s'étendent jusqu'à la limite des eaux côtières (1 mille marin : 1852 m), la même réglementation que pour les espaces remarquables terrestres s'applique. Tout aménagement ou construction légère doit, selon les cas, être nécessaire à la gestion du site ou à son ouverture au public, à l'exercice d'activités économiques, notamment celles traditionnellement implantées. Les aménagements doivent être conçus et localisés de manière à ne pas dénaturer la qualité paysagère des espaces remarquables, ni porter atteinte à la préservation des milieux, et permettre un retour du site à l'état naturel. Bien que le SMVM indique : « **ce qui exclut notamment la construction d'aménagements tels des ports nouveaux, bassins de baignades ou installations pour l'exploitation des énergies renouvelables dans ces espaces marins** », il nous semble que certains systèmes, notamment houlomoteurs, peuvent s'implanter sans dénaturer la qualité paysagère ni porter atteinte aux milieux tout en permettant un retour du site à l'état naturel.
- Dans les **zones marines protégées** identifiées au SMVM (baie de la Possession, baie de Sainte-Rose), peuvent être autorisés les projets liés **au transport de personnes et de biens ou d'énergie**, sous réserve de démontrer qu'aucun autre emplacement ou aucune autre solution technique n'est envisageable à un coût supportable pour la collectivité.

Le SMVM de 2011 avait bien identifié les énergies marines. Il intégrait ainsi 12 zones d'exploitation des énergies de la mer, sur les communes de Saint-Denis, Sainte-Marie, Saint-André, Saint-Benoît, Sainte-Rose, Saint-Philippe, Saint-Joseph, Petite-Ile, Saint-Pierre, Saint-Paul, Le Port et La Possession. Le SAR 2010 est entré en révision en 2018. Le nouveau SMVM sera donc à actualiser au regard des éléments nouveaux apportés par ce SREMER.

Au sein des espaces terrestres littoraux classés en Espaces Naturels Remarquables du Littoral se trouvent des espaces naturels protégés par différents outils (cf figure page suivante) :

- Protection foncière pour les terrains acquis par le **Conservatoire du Littoral** ;
- Protection foncière pour les **forêts domaniales** ou départemento-domaniales ;
- Protection législative avec le classement ou l'inscription de **sites d'intérêt général** du point de vue artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque, au titre de l'article L341-1 du Code de l'Environnement.

<sup>16</sup> SAR : Schéma d'Aménagement Régional, document réglementaire de planification de l'urbanisation à l'échelle de l'île.  
SMVM : Schéma de Mise en Valeur de la Mer, document associé spécifique au milieu littoral et côtier.



### Légende

<b>Infrastructures portuaires :</b>	Espaces Naturels Remarquables du Littoral (SAR 2010)
Cale de pêche	Sites du Conservatoire du Littoral
Port de commerce	Sites classés ou inscrits
Mouillages organisés	Périmètre forestier 2016
Port de pêche	Réserve Naturelle Marine de la Réunion
Port pêche & plaisance	Réserve de pêche de Sainte-Rose
	Isobathes HYDRORUN épuré
	Communes

Figure 68 : Zonages réglementaires environnementaux le long du littoral réunionnais

Enfin, au sein de la **Réserve Naturelle Marine**, l'article 17 du Décret n° 2007-236 du 21 février 2007 portant création de la réserve naturelle nationale marine de la Réunion indique que :

« I. - Les travaux publics ou privés modifiant l'état ou l'aspect de la réserve sont interdits.

II. - Toutefois, peuvent être autorisés dans les conditions définies aux articles L. 332-9 et R. 332-23 à R. 332-27 du code de l'environnement :

- 1° Les travaux nécessaires à l'entretien de la réserve, des chenaux d'accès aux ports et des ouvrages préexistants à la réserve ;
- 2° Les travaux visant à assurer la sécurité de la navigation, ou liés à des opérations de défense et de sécurité ;
- 3° Les opérations d'élimination des rejets artificiels mentionnés à l'article 6 ;
- 4° Les travaux liés au balisage de la réserve, à l'activité de baignade ou à sa sécurisation ;
- 5° Les travaux et aménagements liés à la recherche scientifique ;
- 6° Les travaux permettant une extension du port de Saint-Leu compatible avec les objectifs de la réserve. »

Les énergies marines y sont donc **interdites**.

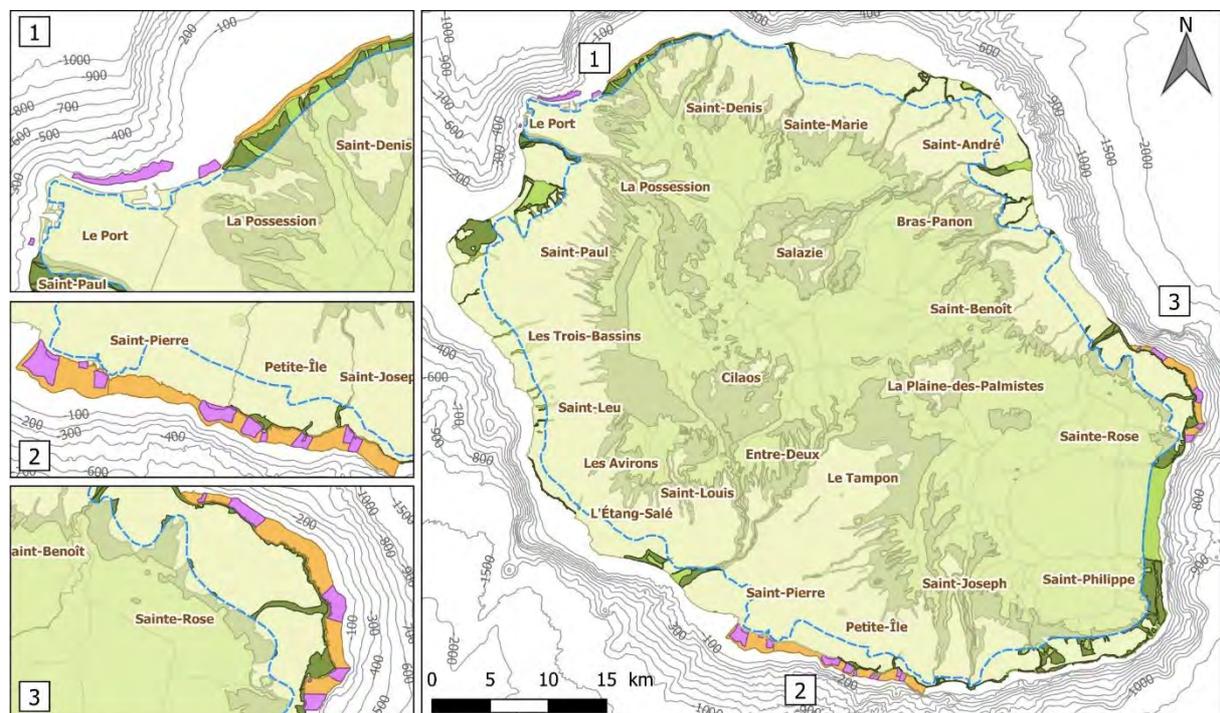
*De forts enjeux écologiques*

Outre ces protections réglementaires des espaces terrestres et marins, les **ZNIEFF terrestres et marines** sont également à considérer.

Elles n'ont **pas de valeur réglementaire** : elles remplissent un rôle de porté à connaissance. Les ZNIEFF (zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique) délimitent des zones d'intérêt écologique dans l'objectif de les identifier auprès des aménageurs et d'éclairer leurs décisions.

Deux types de ZNIEFF viennent distinguer le niveau d'enjeu : type I (zone remarquable homogène) et type II (ensemble plus large). Elles ne constituent pas une protection réglementaire, mais simplement un porter à connaissance. Chaque ZNIEFF fait l'objet d'un inventaire scientifique et d'une fiche descriptive.

Le milieu marin et littoral de la Réunion comprend de nombreuses ZNIEFF (zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique). La grande majorité des ZNIEFF terrestres sur le littoral se situent dans l'emprise du zonage réglementaire ENRL. Quant aux ZNIEFF marines, elles se situent sur 3 zones : le long de la route du littoral jusqu'à la pointe des Galets au Nord, le long de la Pointe des Cascades à l'Est et de Saint-Pierre à Saint-Joseph au Sud-Ouest.



Légende :

ZNIEFF marines : ZNIEFF terrestres :    Limites des Espaces Proches du Rivages selon le SMVM 2011  
 Type 1     Type 1  
 Type 2     Type 2

Sources : DEAL, IFREMER, SMVM, IGN

Figure 69 : emprise des ZNIEFF marines et littorales

Les espèces et habitats à enjeux à prendre en compte pour les projets d'énergies marines sont les suivants :

- La Réunion abrite plusieurs espèces **d'oiseaux marins** indigènes ou endémiques, et protégés (Pétrel de Barau, Pétrel Noir, Puffin du Pacifique, Puffin tropical, Noddi, Paille-en-queue). Ceux-ci sont sensibles à la pollution lumineuse (pétrels et puffins notamment) et aux obstacles sur leurs corridors de vols. Ils représentent un enjeu écologique élevé dont il faudra tenir compte pour **l'éolien en mer**, en particulier sur le balisage lumineux et l'implantation par rapport aux zones de fréquentation.
- Les **tortues marines** (Tortue verte, Tortue imbriquée) forment une population elle aussi en danger et protégée. L'Ouest constitue un site de ponte préférentiel mais celles-ci sont devenues très rares en raison de la pression humaine sur le littoral. L'emprise sur les habitats (zones de nourrissage en mer et sites de ponte) ou leur dégradation sont les principaux éléments à considérer sur un projet.
- Les **mammifères marins** sont nombreux à fréquenter la Réunion. Citons notamment les dauphins (Grand dauphin, Dauphin Long bec, Dauphin tacheté pantropical), ainsi que la Baleine à bosse qui vient mettre bas et s'accoupler près des côtes de mai à octobre. Ce sont aussi des espèces protégées. Les emprises sur les habitats, l'incidence sur la ressource alimentaire, le dérangement des animaux, l'impact du bruit sous-marin en phase travaux et en phase exploitation sont des thèmes à étudier attentivement pour ces espèces. En particulier, attention aux emprises sur le domaine maritime côtier, habitat du Grand dauphin de l'Indo-Pacifique. C'est une espèce côtière, à l'habitat restreint, donc vulnérable. De plus, il s'agit d'une petite population, isolée génétiquement des autres îles de l'Océan Indien.
- La **sensibilité des fonds marins** et des espèces associées à ces habitats. En particulier les **coraux** sur les substrats durs et les peuplements de poissons d'importance commerciale.

Ces espèces et habitats sont différemment exposés selon le type d'énergie marine, mais aussi selon le type d'implantation (système à la côte, côtier, au large, flottant ou posé ou fond). Le tableau ci-après résume ces différences au regard du contexte environnemental réunionnais. Il ne vise pas l'exhaustivité mais cherche plutôt à souligner les différences entre les familles d'énergies marines. Il ne prend en compte que la phase d'exploitation, et pas les phases de chantier d'installation et de démantèlement. En effet, les incidences des travaux dépendront plus de la caractéristique des sites d'implantation, et de leur sensibilité, que du type d'énergie marine installé.

Tableau 14 : principaux effets potentiels par type d'énergie marine.

Effets potentiels	Houle	Courants	Eolien flottant	ETM à la côte (tous usages)	Osmose inverse
Des ancrages et de l'atterrissage des câbles ou des conduites sur les <b>fonds marins</b> (qui constituent des habitats)	X	X	XXX	XXX	X
De la structure sur l' <b>hydrodynamisme</b> local (modification des courants, des états de mer, de la morphologie des fonds ou de la côte)	X	X	X		
Du <b>pompage d'eau</b> sur la faune marine (aspiration)				XX	X
Des rejets sur la <b>qualité de l'eau</b> et donc l'habitat des espèces marines.				XXX	XX
Du <b>bruit et des vibrations</b> sur la faune marine, notamment les cétacés.	X	X	X		
Des <b>champs électromagnétiques</b> sur la faune marine, notamment les requins, les raies, les tortues, et les cétacés.	X	X	XXX		
De l' <b>emprise du système dans la colonne d'eau</b> : effet barrière (répulsif), risque de collision, effet récif (attractif). Effets directs ou indirects sur les poissons, les tortues, les cétacés.	X	X	XX		
De l' <b>emprise du système dans les airs (éoliennes)</b> : effet barrière (répulsif), risque de collision, effet attractif du balisage lumineux.			XXX		
<b>Zone d'exclusion</b> à la navigation : effet positif (effet réserve) ou négatif (perte de zone de <b>pêche</b> , de <b>navigation</b> , de <b>loisirs</b> )	X	X	X		

Les conditions de mer : un défi à relever

La Réunion est exposée à 3 types de houle :

- **Les houles d'alizés** : elles sont générées par les alizés, vents caractéristiques de la zone intertropicale en provenance de Sud Sud-Est. Ces vents réguliers se renforcent en hiver austral. Ces houles sont de faible période et de taille petite à modérée, mais peuvent atteindre 3,5 m sur la côte Est lorsque le vent se renforce ;
- **Les houles australes** : elles sont générées par les tempêtes formées au large de l'Antarctique. De courte durée (quelques jours), elles se manifestent majoritairement en hiver austral. De provenance Sud Sud-Ouest, elles sont caractérisées par de très longues périodes et des hauteurs importantes, qui peuvent exceptionnellement atteindre 8 m ;

Tableau 15 : Hauteur moyenne de la houle australe pour différentes périodes de retour. Source : BCEOM 2007.

Période de retour (an)	1	2	5	10
Hauteur moyenne (m)	4,5	5,5	6,5	8

- **Les houles cycloniques** : rares (quelques jours par an) mais puissantes, les houles cycloniques sont celles qui modifient le plus durablement la morphologie littorale. Leur direction dépend de la trajectoire des cyclones, qui arrivent plus fréquemment par le Nord Nord-Ouest de l'île.

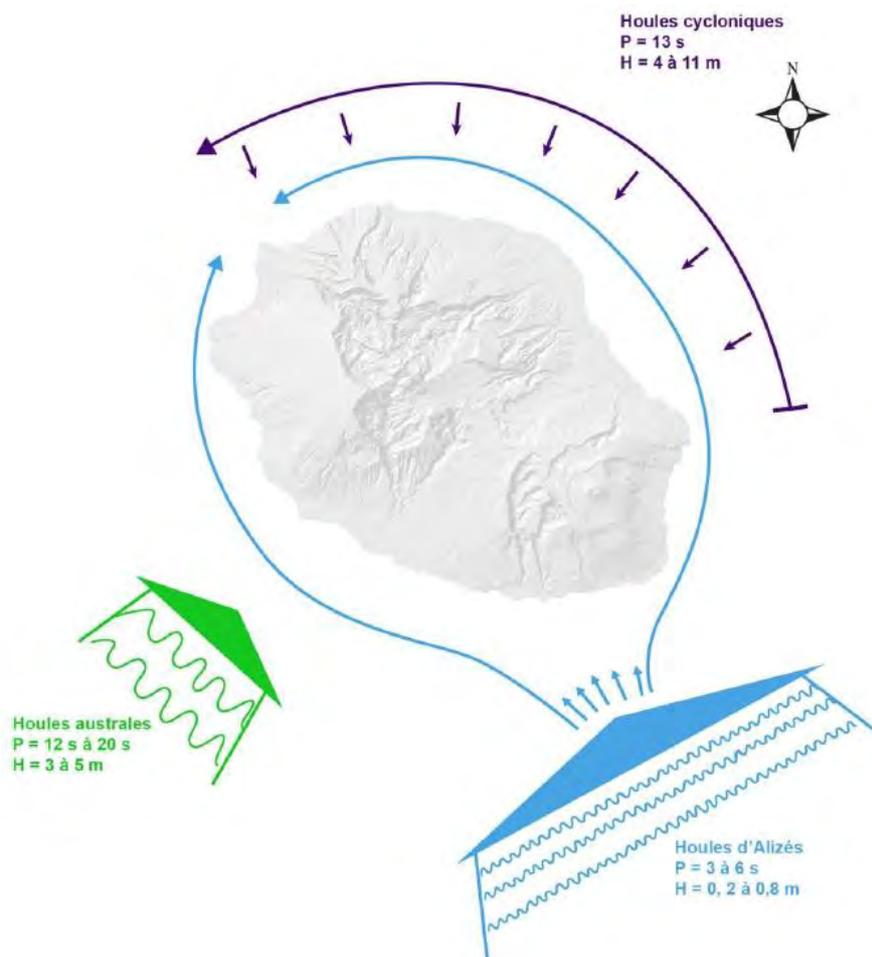


Figure 70 : Synthèse du régime des houles à La Réunion (d'après Gabrié, 1984, précisé par les résultats d'HYDRORUN) (P = période ; H = hauteur)

Tableau 16 : Statistiques de houle cyclonique pour différentes périodes de retour. Source : BCEOM 2007.

PROBABILITE DE RETOUR	HAUTEUR MOYENNE AU LARGE	PÉRIODE PIC
1 an	4,0 m	8 –14 s
10 ans	7,7 m	9-14 s
30 ans	9,0 m	10-14 s
100 ans	10,7 m	11-15 s

Cette exposition aux cyclones et aux fortes houles australes nécessite un **dimensionnement spécifique des installations**, et éventuellement **l'élaboration d'une procédure de repli / mise à l'abri** des installations.

Par ailleurs, la saisonnalité de ces évènements limite le nombre de fenêtres météorologiques propices aux travaux en mer. L'hiver austral est associé à une probabilité plus forte de houle australe et de vents d'alizés, tandis qu'en été austral, c'est le risque cyclonique qu'il faut prendre en compte. La période la plus calme se situe en été austral, de novembre à janvier. **Ce calendrier doit être bien intégré en amont**, que ce soit pour les travaux de déploiement en mer ou pour la maintenance des systèmes en exploitation.

Enfin, il faut également garder à l'esprit qu'en cas de casse de matériel, l'insularité et l'éloignement avec l'Europe impliquent de longs délais d'approvisionnement. La gestion des stocks de pièces de rechange et le choix des filières de fourniture en matériel **devront s'y adapter**.

#### **b) Une île dont les activités économiques liées à la mer sont minoritaires**

L'économie bleue emploie 7 500 personnes à La Réunion, dans sa définition la plus large. Les principales activités sont celles liées aux produits de la mer (la pêche, l'aquaculture, le commerce et la transformation de leurs produits), la réparation de navires, les activités portuaires et de travaux publics en mer, et le transport maritime. Ces activités principales regroupent 1 900 emplois en 2015 soit 1,1 % de l'emploi marchand.

#### *Les infrastructures portuaires, inadaptées aux EMR*

L'île dispose des infrastructures portuaires suivantes :

- Le **Grand Port Maritime de la Réunion**, au Port : port de commerce, de pêche, de plaisance et de réparation navale, mais aussi 3ème port militaire de France, le port de la Réunion est aujourd'hui le 1er port de l'outre-mer en tonnage global, avec plus de 4 millions de tonnes de marchandises traitées annuellement, mais aussi le 2ème port des Régions Ultra Périphériques de l'Europe après les Canaries, et le. Les infrastructures sont localisées en 2 sites :
  - **Port-Est, port de commerce** qui regroupe les activités suivantes :
    - Conteneurs (quais 10-11) : 4ème port de France sur le conteneur après le Havre, Marseille et Dunkerque, le Port-Est a vu transiter 331 361 EVP<sup>17</sup> en 2017. 77% de l'activité est constitué de transbordement depuis les grands ports du Moyen-Orient et de Singapour ;
    - Vrac solide (quais 20-21) : terminal céréalier et terminal charbon pour la Centrale Thermique adjacente (située dans l'enceinte du port) ;
    - Navires rouliers pour le transport de véhicules (ro-ro ; quais 14-15) : 35 330 véhicules traités en 2017 ;
    - Break bulk cargo : cargaisons de marchandises diverses fractionnées (ni conteneurisées, ni en vrac).
  - **Port-Ouest, port multi-activités** qui regroupe :
    - Marine Nationale ;
    - Pêche professionnelle hauturière et entrepôts frigorifiques associés ;
    - Terminal sucrier (vrac) ;
    - Terminal vraquier Ciment-Gaz-Bitume ;
    - Stockage de produits pétroliers de la SRPP ;
    - Plaisance et pêche artisanale ;
    - Réparation navale.

<sup>17</sup> EVP : Equivalent Vingt Pieds (taille standard d'un conteneur).

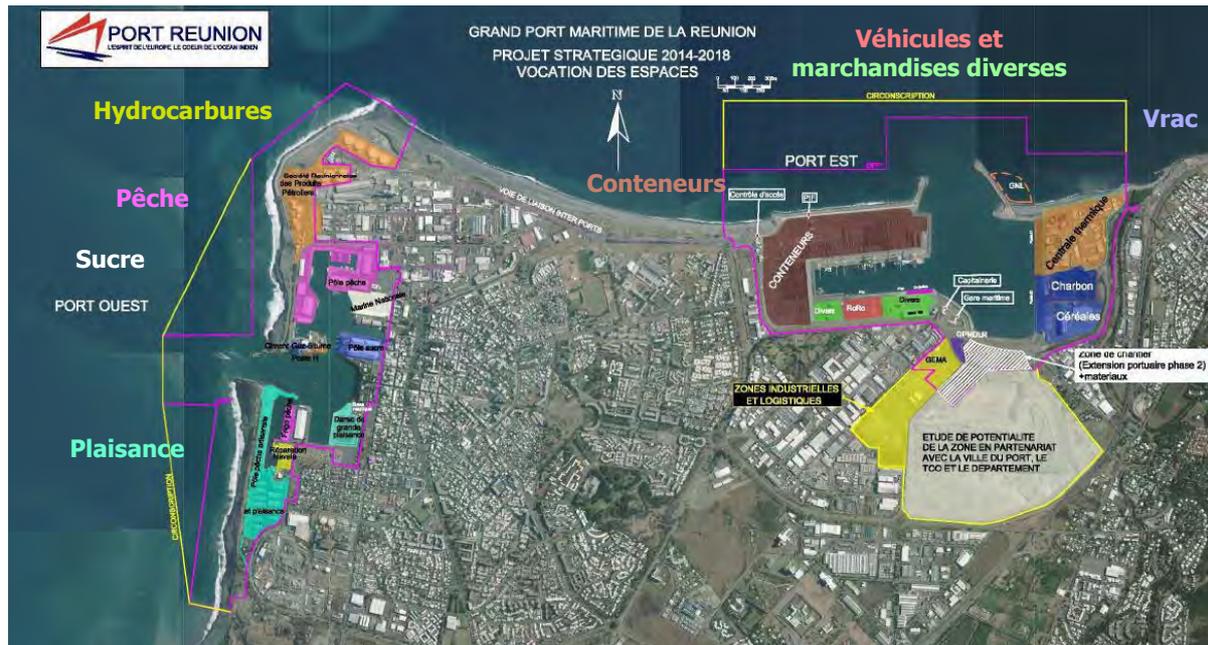


Figure 71 : Vocation des espaces du Grand Port Maritime de la Réunion d'après le projet stratégique 2014-2028.

- **4 ports de plaisance et de petite pêche :**
  - Le port de Saint-Gilles-les-bains ;
  - Le port de Saint-Leu ;
  - Le port de Saint-Pierre ;
  - Le port de Sainte-Rose.
- **Un abri côtier** à la Possession ;
- **Un site de mouillage et de mise à l'eau** dans le lagon d'Etang-Salé ;
- **Des cales de mises à l'eau** dans le Sud et l'Est.

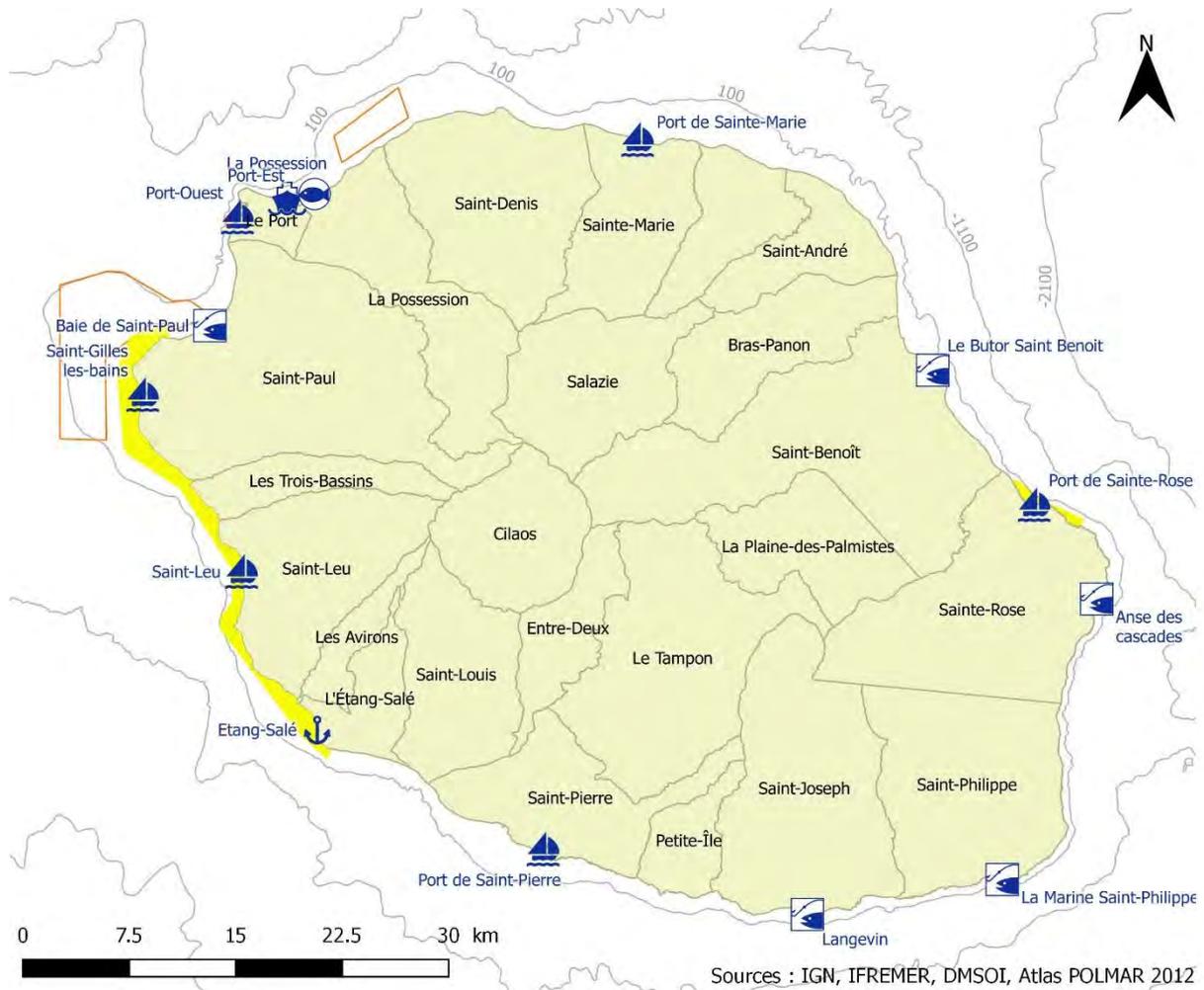
Ces infrastructures sont représentées sur la figure page suivante.

Les infrastructures de réparation navale situées au Port-Ouest reposent sur :

- l'élévateur à sangles « **Roulev** » : il assure la manutention des navires de plaisance et de petite pêche de **moins de 45 tonnes, et jusqu'à 16 m de long**. La gestion des aires de carénage associées a été confiée à la communauté d'agglomération du Territoire de la Côte Ouest (TCO) en 2016.
- le **slipway** transversal du port opéré par le Grand Port Maritime. Cette installation, unique sur l'île, permet la mise à sec de **navires jusqu'à 800 tonnes**, et d'une **longueur maximale de 63 mètres**, en vue de leur entretien et réparation.

Hormis les grandes sociétés spécialisées déployées à la Réunion pour les besoins du chantier de la Nouvelle Route du Littoral (groupement SDI – Sodranord), on recense à la Réunion **une dizaine de sociétés spécialisées en travaux maritimes et subaquatiques**.

Néanmoins leurs moyens nautiques et de levage sont limités aux petites opérations ; ces sociétés réalisent principalement des prestations de travaux subaquatiques (scaphandriers). Certaines de ces « petites » sociétés ont toutefois acquis des moyens nautiques supplémentaires pour la NRL. Ils seront peut-être conservés à l'issue du chantier, renforçant ainsi les moyens locaux.



**Légende**

- Infrastructures portuaires :**
- Réserve Naturelle Marine de la Réunion
  - Réserve de pêche de Sainte-Rose
  - Zones de mouillage des navires
  - Cale de pêche
  - Port de commerce
  - Mouillages organisés
  - Port de pêche
  - Port pêche & plaisance
  - Isobathes HYDRORUN épuré
  - Communes

Figure 72 : infrastructures portuaires de l'île. Source : d'après l'Atlas POLMAR 2012 modifié.

*La pêche, l'une des principales sources d'exportation de l'île*

Bien qu'ayant un poids économique modéré, la pêche réunionnaise bénéficie d'un espace de pêche très vaste, grâce aux différentes zones économiques exclusives françaises dans la zone Océan Indien et dans les Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF).

La pêche réunionnaise se répartit en trois catégories.

Tout d'abord, la **pêche artisanale** (proche des côtes) regroupe 194 navires de tailles diverses et environ 300 marins inscrits au rôle, pour 945 tonnes de captures en 2015.

Ensuite, la **pêche palangrière au large** mobilise un peu plus de 160 marins et cible les grands pélagiques (thons, espadons, etc.), pour une production estimée à 1 812 tonnes de captures en 2015.

Enfin, la **grande pêche industrielle dans les TAAF** se concentre principalement sur la légine et la langouste, qui sont soumises à des quotas. En 2016, 6300 tonnes de légine et 330 t de langoustes ont été capturées.

Au total, la pêche réunionnaise capture près de 11 000 tonnes de poissons par an, dont plus de la moitié est exportée, principalement vers le Viêt Nam, Hong Kong et le Japon. Parallèlement, La Réunion importe également des produits de la pêche (crevettes et autres poissons tropicaux) venant d'Inde et du Viêt Nam.

En 2016, le GPMDLR a délivré 2 933 tonnes de glace aux professionnels du secteur pour la conservation des captures.

La pêche côtière est plus active dans la zone Ouest de l'île, qui concentre la majorité des ports et des navires.

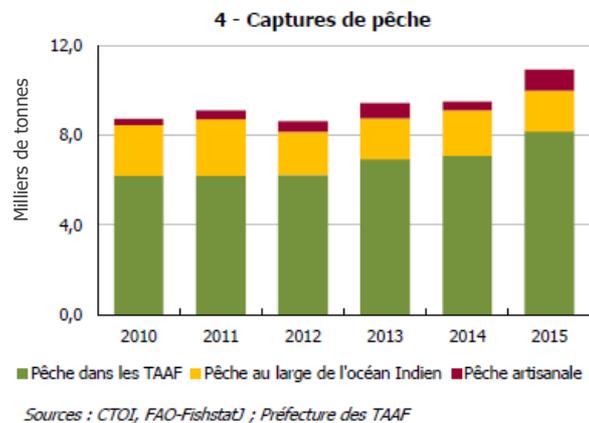


Figure 73 : Répartition et évolution de la pêche réunionnaise suivant la zone de capture et le tonnage capturé. Source : IEDOM 2017

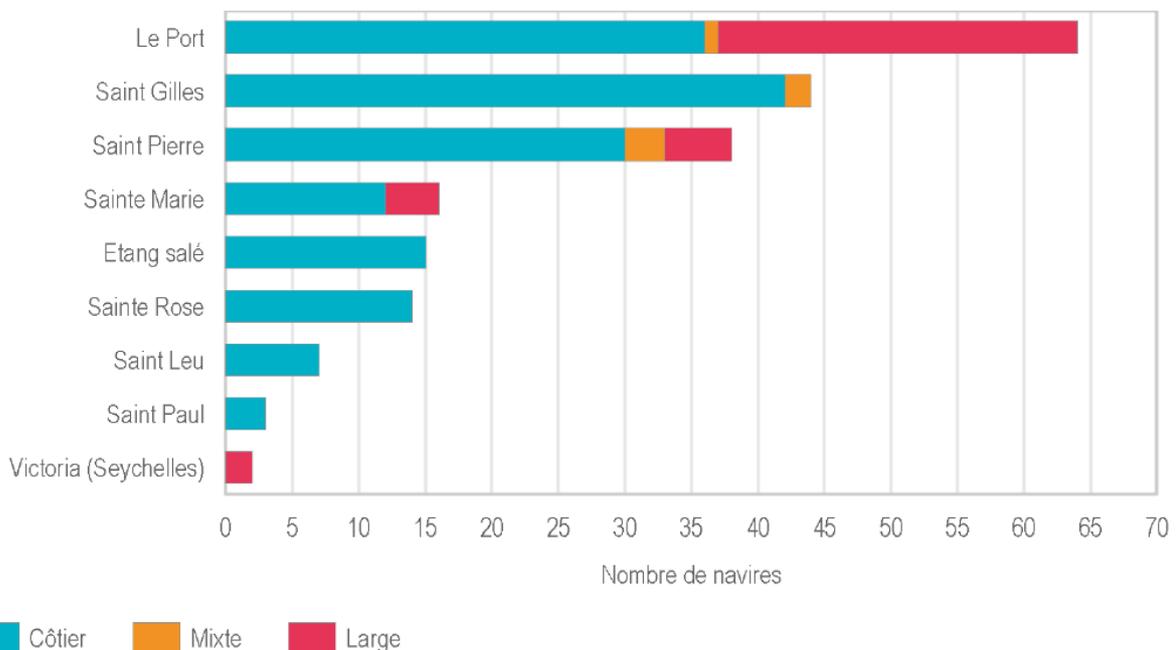
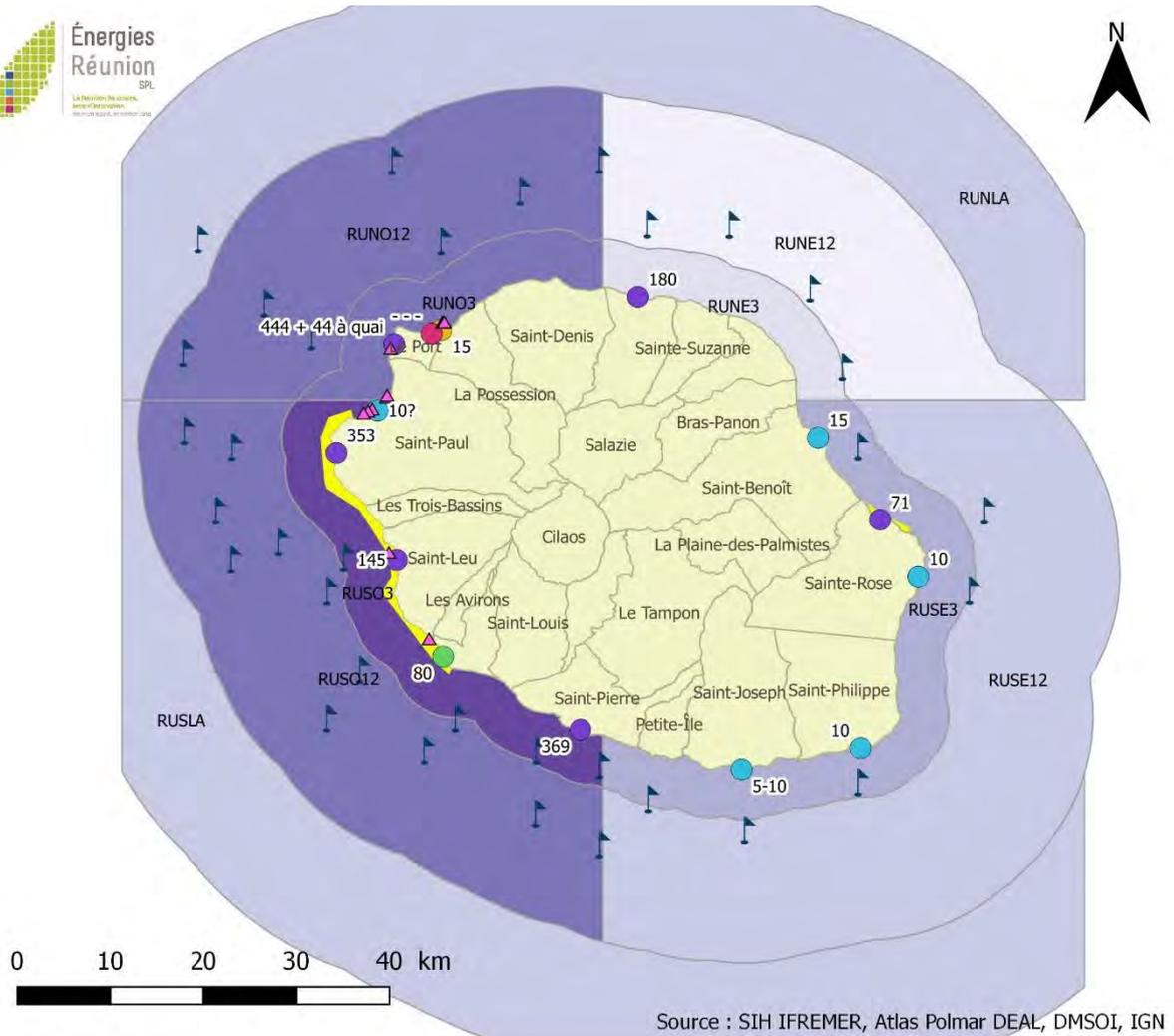


Figure 74 : répartition des navires de pêche professionnels par port de pêche principal et par rayon d'action en 2017. Source : Système d'Information Halieutique de l'IFREMER, 2018.



### Légende

Infrastructures portuaires et capacité 2012 :	▲ DCP	Nombre de mois d'activité des navires de pêche en 2017 par zone de pêche :	320 - 480
● Cale de pêche	▲ Récifs artificiels	0 - 40	480 - 640
● Port de commerce	■ Réserve Naturelle Marine	40 - 80	640 - 800
● Mouillages organisés	■ Réserve de pêche de Sainte-Rose	80 - 160	800 - 1000
● Port de pêche	■ Communes	160 - 320	1000 - 1200
● Port Pêche Plaisance			1200 - 2000

Figure 75 : activité dans les zones de pêche côtière en mois.navires par zone de pêche (secteurs représentés : 0-3 milles, 3-12 milles et 12-20 milles). Seules les deux principales zones de pêche par métier et par mois du navire sont prises en compte pour le calcul. Source : Source : Système d'Information Halieutique de l'IFREMER, 2018.

Une trentaine de **Dispositifs Concentrateurs de Poissons (DCP)** sont implantés autour de l'île, jusqu'à des profondeurs de 2000 m de fond environ, et jusqu'à 23 km des côtes pour les plus éloignés. Ils sont réservés à la pêche professionnelle et utilisés par la pêche artisanale (à la ligne) et par la pêche palangrière pour la capture des poissons pélagiques comme le thon notamment.

Plus près de côtes, sur la côte Ouest, une douzaine de **récif artificiels** sont également immergés. La pêche y est interdite dans un rayon de 50 m autour du récif artificiel (arrêté préfectoral du 30 décembre 2010).

Enfin, il existe une **réserve de pêche** devant la commune de Sainte-Rose, entre l'embouchure de la Rivière de l'Est et la Pointe Corail. A l'intérieur de ce périmètre, l'exercice de toute pêche maritime est interdit à l'exception de la pêche à la ligne à partir du rivage (pêche à la gaulette). La pêche y est réglementée par les arrêtés préfectoraux n° 3122 et n°3123 du 30 décembre 2010, modifiant l'arrêté n° 1743 du 15 juillet 2008, réglementant respectivement la pêche maritime de loisir et la pêche maritime professionnelle dans les eaux du département de La Réunion.

*La production de micro-algues, un secteur naissant*

La production de spiruline, micro-algue alimentaire, se développe dans l'île depuis 2009, avec une production de 2000 tonnes en 2016 et un objectif de 10 000 tonnes en 2020, selon l'association Spiruline Péi qui regroupe plusieurs producteurs. Parallèlement, le projet de production industrielle de micro-algues porté par la société Bioalgostral prend de l'ampleur. Les marchés de travaux pour la construction à la Technopole (Saint-Denis) de 2000 m<sup>2</sup> de surface de production devaient être lancés en 2018. Plusieurs marchés sont visés : les biocarburants (partenariat avec ALBIOMA), les molécules antifouling (partenariat avec l'ARVAM), l'industrie pharmaceutique et cosmétique.

**c) Une production électrique à 34% de renouvelable**

*Des moyens inégalement répartis*

Le parc de production électrique est constitué de moyens de base et semi-base, les centrales à charbon et bagasse d'ALBIOMA au Gol et à Bois-Rouge et la centrale Diesel d'EDF PEI du Port-Est, de moyens de pointe, les turbines à combustion d'EDF au Port (La Baie) et d'ALBIOMA à Saint-Pierre (non représentée sur la carte, mise en service prévue en 2018), et d'énergies renouvelables.

L'hydraulique assure une production de base voire de pointe. La production de biogaz s'effectue au niveau des deux centres de stockage des déchets non dangereux de l'île et d'une station d'épuration. L'éolien reste minoritaire, il est limité par le relief (turbulences) et les conditions cycloniques. Enfin, le photovoltaïque représente 8,8 % de la production de l'île.

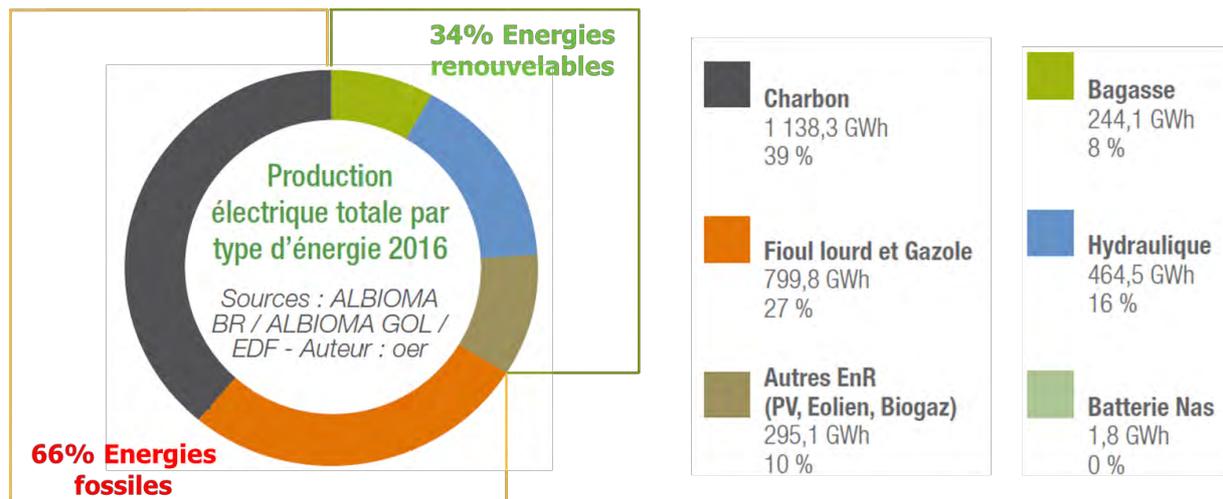


Figure 76 : Production électrique totale par type d'énergie en 2016. Source : OER 2017

Le parc de production est suffisant pour satisfaire l'équilibre offre/demande mais il est mal réparti (cf Figure 77). La concentration des principaux moyens de production au Nord de l'île a pour conséquence une fragilité de l'alimentation du Sud et de l'Ouest de l'île lors des pointes de consommation du soir. Or, les régions du Sud sont celles où l'on constate une croissance plus forte de la consommation. A l'inverse, dans le Nord, la surcapacité de la centrale Diesel d'EDF PEI au Port se traduit par une utilisation dégradée de ce moyen de base. Conçue en 2006

dans un contexte de croissance forte de la consommation et d'amorce du développement du photovoltaïque, sa capacité apparaît aujourd'hui surdimensionnée. Les moteurs fonctionnent dans un mode dégradé (sous leur puissance optimale) pendant près de 85% de leur durée d'utilisation. Le nombre élevé de démarrages (environ 200 par mois) et les plages d'utilisation accélèrent l'usure des moteurs.

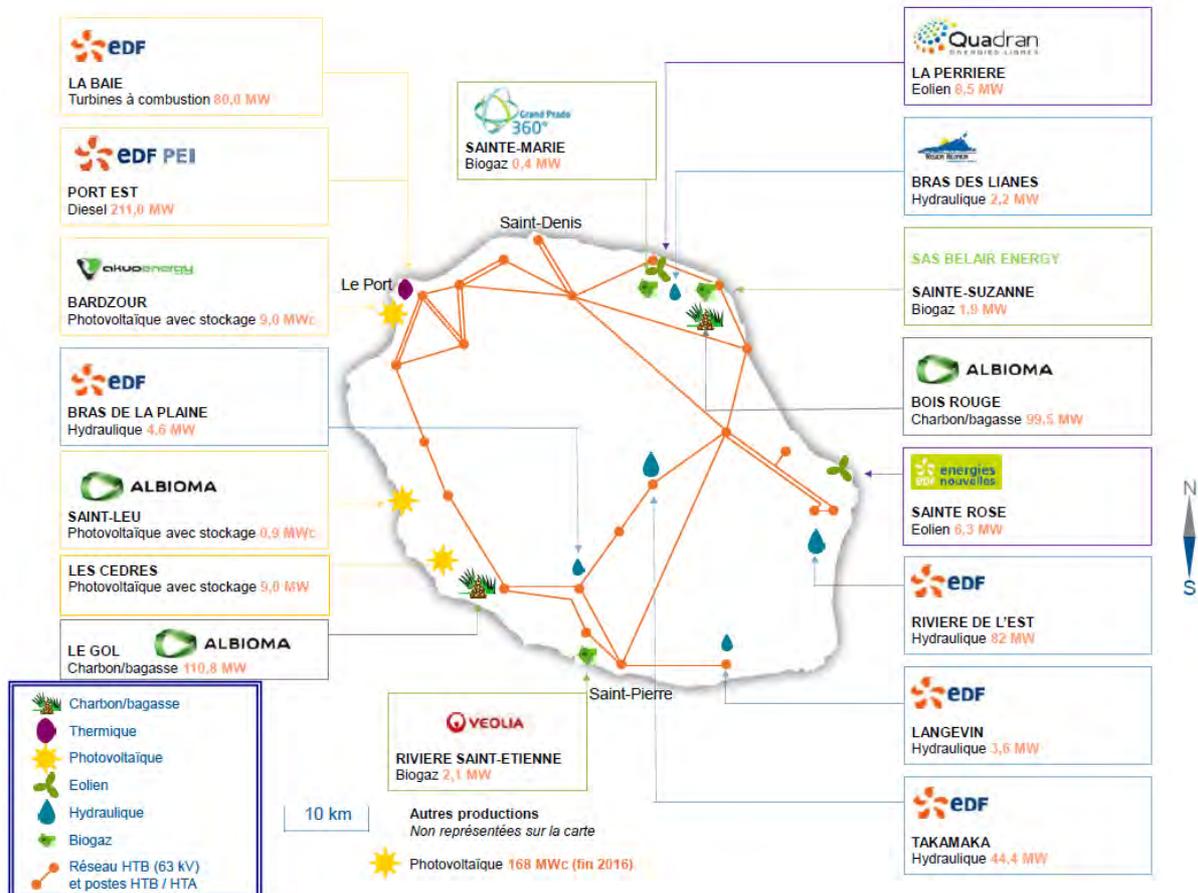


Figure 77 : Parc de production électrique et réseau de distribution HTB. Source : EDF SEI 2017

Le réseau de transport d'électricité réunionnais est constitué de trois zones électriques différenciées séparées par les barrières naturelles du relief de l'île. Cette structuration tend à fragiliser le système électrique avec les évolutions différentes de la consommation et de la production. Il comprend quelques lignes anciennes, de plus de 30 voire 40 ans, notamment celles qui relient le réseau du Sud et Ouest au réseau Nord et Est.

Pour pallier à ces déséquilibres, il est prévu la mise en service d'une turbine à combustion de 40 MW à Saint Pierre et le remplacement de la ligne existante entre le Nord et le Sud de l'île par une ligne de forte capacité. En complément, EDF recommande de consolider les moyens de production dans le Sud, notamment les moyens de pointe afin de prévenir les contraintes pouvant porter sur les ouvrages reliant cette zone au Nord de l'île.

*Une électricité presque quatre fois plus chère qu'en métropole*

Le coût moyen annuel de l'électricité produite à la Réunion se situe entre 200 et 230 €/MWh, contre environ 55 €/MWh en métropole. Le tableau ci-après détaille les coûts de production par filière.

Tableau 17 : Coûts de l'électricité à la Réunion par filière en 2013. Source : PPE 2016-2023

Type d'énergie	GWh	M€	€/MWh
Bagasse – charbon	1519,1	203,3	133,8
Thermique – EDF PEI	396,2	153,7	387,9 (*)
Éolien	15,1	1,8	119,2
Biogaz	14,2	1,4	98,6
Petite hydraulique	nd	nd	nd
Photovoltaïque	215,6	102,2	474
Production EDF SEI :			
• Centrale fioul	643,7	120	186,4
• TAC			
• grande hydroélectricité			
Total	2804,1	582,4	207,7

Source : CRE

(\*) L'année 2013 n'est pas représentative pour la centrale EDF PEI : il s'agit d'une année de test et de mise en service. La centrale PEI assurant la gestion à la pointe, les coûts marginaux resteront assez élevés.

#### Une gestion de l'équilibre offre/demande qui limite la part d'EnR intermittentes

Bénéficiant d'une priorité d'injection, la production renouvelable est la première appelée. Les groupes thermiques sont ensuite mobilisés en fonction de leur coût marginal de production. Les centrales hydrauliques équipées d'un réservoir sont gérées en « éclusées journalières », c'est-à-dire que la capacité de stockage (environ de 2 heures de fonctionnement à pleine puissance) est utilisée pour minimiser les coûts de production à la pointe (minimiser les démarrages de groupes diesels ou de turbines à combustion). En revanche, l'hydraulique ne permet pas de compenser complètement les variations de la fréquence du réseau électrique que peuvent entraîner les baisses de production photovoltaïque soudaines induites par la météo. C'est pourquoi les centrales thermiques ont l'obligation de disposer d'une réserve de puissance mobilisable à cet effet.

C'est pour minimiser ces coûts de production de pointe qu'un **seuil de 30, 32 puis 35% de puissance de la production EnR intermittente** par rapport à la puissance totale injectée a été imposé. Le seuil de 32% a été atteint à 43 reprises en 2016, entraînant des déconnexions de plusieurs producteurs photovoltaïques. La perte de production est de 508 MWh soit 0,2 % de la production annuelle du PV pour une durée de 111 heures.

Face à ces limites, les énergies marines renouvelables présentent certains atouts en termes de gestion de l'équilibre offre/demande en électricité :

- la **houle** est une énergie intermittente, mais c'est un phénomène beaucoup **mieux prévisible et moins variable sur le court terme** que l'ensoleillement,
- le **vent en mer est plus régulier et plus puissant qu'à terre**, où il subit les effets du relief et de la rugosité,
- l'**énergie thermique** quant à elle constitue une **énergie de base, continue et stable**. Utilisée pour la production électrique, elle permettrait en outre une modulation de la puissance simple et rapide, via la modulation du débit d'eau.

#### Des objectifs de développement des EnR qui intègrent les énergies marines

Si dans les années 80, la Réunion était quasiment autosuffisante grâce sa production hydroélectrique, aujourd'hui, le développement des énergies renouvelables est fortement contraint. La pression foncière, la culture de la canne à sucre, le relief, la réglementation environnementale (Parc National, loi Littoral, loi sur l'Eau, etc.) limitent de fait le développement de l'éolien, de la biomasse, de la géothermie, ou encore de l'hydro-électricité. Le développement du photovoltaïque quant à lui nécessite une réserve primaire de puissance importante, sous peine de devoir augmenter le délestage fréquentométrique pour compenser la puissance PV installée.

Néanmoins, la loi n°2015-992 du 17 août 2015 modifiée relative à la transition énergétique pour la croissance verte prévoit, pour les ZNI, de **parvenir à l'autonomie énergétique en 2030 avec, comme objectif intermédiaire, 50 % d'énergie renouvelable en 2020**. Les modalités d'atteinte de cet objectif et ses conséquences à la Réunion sont décrites dans trois documents dont certaines conclusions sont rapportées ci-après.

### La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie

La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie est le document de planification en matière d'énergie. Il précise les objectifs de politique énergétique, identifie les enjeux et les risques, et oriente les travaux des acteurs publics. Le document en vigueur est la PPE validée par le Décret n° 2017-530 du 12 avril 2017, qui couvre une période de 8 ans en deux tranches : 2016-2018 puis 2019-2023.

La PPE s'inscrit dans le cadre de la loi relative à la transition énergétique, qui prévoit, pour les ZNI, de parvenir à l'autonomie énergétique en 2030 avec, comme objectif intermédiaire, 50 % d'énergie renouvelable en 2020.

Les grandes lignes de la PPE en vigueur en lien avec les énergies marines renouvelables sont les suivantes :

- le **seuil de déconnexion** des installations de production mettant en œuvre de l'énergie fatale à caractère aléatoire (type photovoltaïque) est fixé à **35 % en 2018** et doit être porté à 45 % en 2023.
- **+ 5 MW** de puissance installée **d'énergies marines** d'ici 2023.
- **+32 GWh électriques évités grâce au SWAC d'ici 2023**, dont 14 GWh d'ici 2018 (objectif non réalisé car aucun SWAC n'a encore vu le jour en 2018). A titre de comparaison la consultation lancée en 2017 pour le SWAC

En 2018, les objectifs pour 2023 sont en train d'être révisés en fonction du bilan de la première période 2016-2018. Les objectifs révisés (encore non validés) intègrent pour la période 2023-2028 : 0 à 40 MW d'éolien en mer, 2 à 5 MW d'énergie thermique des mers en production électrique, et 0 à 5 MW d'énergie de la houle. A plus court-terme sur la période 2018-2023, le seul objectif affiché est de 0 à 2 MW d'énergie thermique des mers en production électrique, pour intégrer le projet à Bois-Rouge. Quant au SWAC, la PPE révisée l'intègre dans les actions de maîtrise de la demande en énergie avec 7 GWh/an de production électrique évitée grâce au SWAC du CHU de Saint-Pierre dès 2021, et 7 GWh/an supplémentaire d'ici 2023 avec la possibilité d'un second ouvrage au Nord de l'île.

### Le schéma de raccordement des énergies renouvelables

Les schémas de raccordement des énergies renouvelables planifient l'évolution du réseau électrique nécessaire à la réalisation des ambitions régionales de la PPE. Il garantit une capacité réservée pour les installations<sup>18</sup> de production supérieures à 100 kVA pour une durée de 10 ans sur les postes électriques proches des gisements identifiés, dès lors que le réseau le permet.

Le document pour la Réunion a été validé le 20/03/2019. **Le document prévoit 5 MW d'énergie marine / géothermie à Saint-André, et 5 MW à Saint-Pierre.** Le projet d'énergie thermique des mers & chaleur industrielle du GIP Pôle Portuaire Industriel et Énergétique de Bois-Rouge à Saint-André est donc bien intégré.

Les investissements totaux nécessaires sont estimés à 3,4 millions d'euros soit 20,9 k€/MW.

A noter que ce document sera révisé après la révision de la PPE, ces éléments risquent donc d'évoluer.

### Étude prospective ADEME : « Vers l'autonomie énergétique en zone non interconnectée à l'horizon 2030 »

Cette étude a permis d'évaluer les implications techniques, organisationnelles et économiques qu'aurait un mix électrique très fortement renouvelable à la Réunion à l'horizon 2030. Cinq scénarios ont été modélisés et simulés :

- Le scénario dit « Tendanciel », est considéré comme le scénario de référence, dont l'objectif est d'identifier le mix énergétique optimum – sur les critères technico-économiques – à 2030, dans un contexte découlant des choix et contraintes actuels.
- Ce scénario est complété par un scénario dit « Avantage thermique » pour lequel le contexte économique est favorable aux énergies conventionnelles et où peu d'efforts sont réalisés sur la maîtrise de la demande énergétique.
- Le troisième scénario, dit « Avantage technologique », se place dans un contexte technique optimiste, permettant notamment un accès à de nouvelles technologies de production d'énergie renouvelable et une meilleure diffusion des technologies de maîtrise de la consommation d'énergie.
- Le quatrième scénario, dit « Tous feux verts », libère en outre les contraintes réglementaires et sociales non réductibles et force l'atteinte d'un mix électrique 100% ENR local à l'horizon 2030.
- Enfin, le dernier scénario vise un objectif plus fort d'autonomie énergétique, dit « Vers l'autonomie énergétique », intégrant le basculement des véhicules particuliers et utilitaires légers vers des solutions alternatives aux énergies fossiles.

<sup>18</sup> Les raccordements d'installations dont les conditions sont fixées dans le cadre d'un appel d'offres en application de l'article L 311-10 du Code de l'Énergie ne s'inscrivent pas dans le schéma de raccordement des énergies renouvelables.

Les simulations de fonctionnement de chaque scénario permettent de dégager, par scénario, les répartitions de mix énergétiques optimales au regard des coûts d'appel de chaque type d'énergie au cours de la journée.

Seules deux énergies marines ont été intégrées à l'étude :

- **L'éolien en mer** est intégré dans les 3 derniers scénarios les plus optimistes. Cette énergie est considérée disponible à partir de 2030 seulement car il est estimé que le développement de tels projets nécessiterait de nombreuses années d'études préalables.
  - Les 3 scénarios modélisés intègrent en paramètre d'entrée un potentiel de 50 MW d'éolien en mer au large de Saint-Denis, raccordé au poste source « Digue ».
  - En raison de son coût, l'optimisation des mix énergétiques ne retient l'éolien en mer que dans le scénario le plus ambitieux, « Vers l'autonomie énergétique ». Le résultat de la simulation de ce scénario indique que la capacité optimale à installer au regard du mix énergétique choisi serait de 14 MW (pour un potentiel disponible paramétré à 50 MW).
- **L'énergie thermique des mers** a été intégrée elle aussi dans les 3 derniers scénarios les plus optimistes. Cette énergie est considérée disponible à partir de 2025.
  - Les 3 scénarios modélisés intègrent en paramètre d'entrée un potentiel de 6,7 MW à Saint-Denis, raccordé au poste source « Digue ».
  - En raison de son coût, l'optimisation du mix énergétique conduit à écarter l'électricité ETM de chacun des 3 scénarios simulés.
- **Le houlomoteur** n'est pas jugé assez mature en conditions cycloniques pour considérer cette énergie disponible avant 2030 sur l'île.

#### *Des conditions économiques peu propices aux énergies marines en France et Outre-Mer*

##### *Houlomoteur, marémoteur et hydrolien : un tarif de rachat unique trop faible et inadapté*

Un seul texte encadre les tarifs de rachats des énergies marines et il ne s'applique qu'aux installations utilisant l'énergie houlomotrice, marémotrice ou hydrocinétique.

Il s'agit de l'arrêté ministériel du 1er mars 2007 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie hydraulique des lacs, cours d'eau et mers. Il prévoit pour l'énergie de la houle, de la marée ou du courant un tarif d'achat de **15 c€/kWh** pendant 20 ans.

A titre de comparaison, les tarifs de rachats pour l'énergie photovoltaïque varient à la Réunion entre 15,48 et 20,90 c€/kWh (selon la puissance), pour les installations dont la demande complète de raccordement a été effectuée entre le 1<sup>er</sup> janvier et le 31 mars 2018<sup>19</sup>.

Le projet de parc de 7 éoliennes OpenHydro au Raz-Blanchard porté par EDF Energies Nouvelles bénéficiera de ce tarif de rachat. Le projet, lauréat en 2014 de l'Appel à Manifestation d'intérêt de l'ADEME, bénéficiera donc d'environ 50 % d'aides (52 M€ au titre du Programme des Investissements d'Avenir, pour un coût total d'investissement de 112 M€) en compensation de ce faible tarif de rachat.

##### *Energie thermique des mers : le vide juridique*

Pour l'énergie thermique des mers, aucun texte ne prévoit de tarif de rachat. Le projet NEMO en Martinique, centrale pilote de production électrique flottante d'une puissance de 16 MW, devait bénéficier d'un tarif de rachat de **45 c€/kWh** fixé spécifiquement pour ce projet. Le projet a été lauréat en 2014 de l'appel à projets lancé par l'Union Européenne dans le cadre de son programme « NER 300 » de soutien aux projets de démonstration dans le domaine des technologies propres.

##### *Eolien offshore posé : une position tarifaire et des mécanismes de soutien changeants*

Pour l'éolien, **l'éolien terrestre** est passé en 2016 du dispositif d'obligation d'achat à guichet ouvert (sans mise en concurrence) à celui de complément de rémunération (voir glossaire). Celui-ci s'effectue à guichet ouvert pour les parcs de moins de 6 éoliennes et de puissance unitaire maximale de 3 MW. Le tarif est fixé par l'arrêté du 6 mai 2017 fixant les conditions du complément de rémunération de l'électricité produite par les installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent, de 6 aérogénérateurs au maximum. Au-delà de 6 éoliennes, la procédure de mise en concurrence s'applique (appel d'offres).

A la Réunion néanmoins, ces arrêtés ne s'appliquent pas. Les conditions tarifaires sont spécifiées dans l'arrêté du 8 mars 2013 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie mécanique du vent situées dans des zones particulièrement exposées au risque cyclonique et disposant d'un dispositif de

<sup>19</sup> Arrêté tarifaire du 4 mai 2017 visant les installations photovoltaïque implantées sur bâtiment et situées en Corse, en Guadeloupe, en Guyane, en Martinique, à Mayotte et à La Réunion.

prévision et de lissage de la production. Le tarif est de **23 c€/kWh les 10 premières années** puis diminue, pour une demande de raccordement effectuée en 2013. Le tarif diminue les années suivantes. Ce texte ne s'applique lui aussi qu'aux installations à terre.

Les installations **en mer** font l'objet d'appels d'offres nationaux. En juillet 2011, un premier appel d'offres avait été lancé pour de l'éolien posé sur 5 zones :

- Fécamp (Seine-Maritime, puissance 498 MW), lauréat : Eolien Maritime France ;
- Courseulles-sur-Mer (Calvados, puissance 450 MW), lauréat : Eolien Maritime France ;
- Saint-Nazaire (Loire-Atlantique, puissance 480 MW), lauréat : Eolien Maritime France ;
- Saint-Brieuc (Côtes d'Armor, puissance 500 MW), lauréat : Ailes Marines SAS ;
- Le Tréport (Seine-Maritime – Somme), déclaré sans suite car seule une offre avait été déposée avec un prix trop élevé.

Un second appel d'offres a été lancé en mars 2013 pour de l'éolien posé sur 2 zones :

- Le Tréport (Haute-Normandie)
- Entre les îles d'Yeu et de Noirmoutier (Pays de la Loire).

L'expérience du 1<sup>er</sup> appel d'offres a conduit à définir des critères de notations plus discriminants pour cette seconde consultation. Un prix plafond éliminatoire a été fixé, et l'offre la plus élevée est notée zéro.

Les projets des 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> appels d'offre sont en pause principalement à cause de recours juridiques. Aucun contrat d'achat n'a été signé et aucun projet n'a commencé de phase travaux.

Une troisième procédure d'appel d'offres a été initiée en avril 2017 pour de l'éolien posé sur une zone au large de Dunkerque. Un quatrième appel d'offres est en préparation (autorisations réglementaires) pour de l'éolien posé au large de l'île d'Oléron.

La procédure de ces 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> appels d'offre est cette fois différente, avec le lancement d'un « permis enveloppe ». Calqué sur le modèle juridique prévalant en Allemagne et aux Pays-Bas, celui-ci prévoit que ce sera désormais l'Etat qui sélectionnera le lieu d'implantation des futurs champs et obtiendra l'autorisation environnementale en amont de la procédure d'appel d'offres. La procédure de mise en concurrence diffère aussi puisqu'il est prévu une procédure de dialogue concurrentiel.

Au premier trimestre 2018, l'Etat a cherché à revenir sur les tarifs d'achat des 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> appels d'offre en profitant de la mise en place de ce permis-enveloppe, prévu à l'article 34 du projet de « loi pour un Etat au service de la confiance ». L'Etat estime que les tarifs de rachat attribués en 2011 et en 2013 ne sont plus représentatifs des coûts réels actuels du secteur, ces coûts ayant baissé avec le développement du secteur. Après de difficiles négociations et la crainte pour les acteurs du secteur de voir annuler les projets, un accord a finalement été trouvé fin juin 2018. Les tarifs de rachats garantis sur 20 ans ont été renégociés **entre 150 et 200 €/MWh selon le parc**, contre 180 à 230 €/MWh initialement.

#### *Eolien offshore flottant : l'appel à projets*

Enfin, s'agissant de l'éolien flottant, les mécanismes de soutien existants sont ceux de l'appel à projets pour le déploiement de fermes pilotes, avec subvention et tarif de rachat préférentiel. En août 2015, un tel appel à projets de l'ADEME a été lancé pour 4 zones :

- Faraman en Méditerranée ;
- Leucate en Méditerranée ;
- Groix en Bretagne ;
- Gruissan en Méditerranée.

L'arrêté fixant les conditions du tarif d'achat de l'électricité produite par ces 4 parcs est en cours d'élaboration. Le projet d'arrêté envoyé pour avis à la CRE en 2017 fixait un tarif d'achat de **240 €/MWh** pendant 20 ans. Ces 4 projets de démonstration de fermes pilotes d'une puissance totale de 24 MW chacun sont soutenus à hauteur d'environ 330 millions d'euros d'aide par le Programme des Investissements d'Avenir.

#### d) Le contexte réglementaire applicable aux projets énergies marines

Les procédures qui peuvent s'appliquer à un projet d'énergie marine sont listées ci-après avec leurs références réglementaires :

- **Code de l'environnement** : plusieurs procédures peuvent concerner les projets d'énergies marines, il s'agit principalement :
  - De l'évaluation environnementale (articles L121 et R121-1 et suivants), qui peut être obligatoire ou soumise à l'appréciation de la DEAL (examen au cas par cas), suivant la rubrique<sup>20</sup>.
  - De la procédure loi sur l'eau<sup>21</sup> (articles L214 et R214-1 et suivants).
  - Des procédures de participation du public associées aux procédures précédentes : concertation préalable, enquête publique notamment.
  - Des dérogations liées aux espèces protégées éventuellement présentes (articles L214-1 et R214-1 et suivants).
- **Code Général de la Propriété des Personnes Publiques** : demande de concession d'utilisation du Domaine Public Maritime (articles R 2124-1 et suivants). Le DPM à la Réunion s'étend de la zone des 50 pas géométriques jusqu'à 12 miles nautiques au large soit environ 22 km. C'est le préfet de la Réunion qui a autorité en matière d'usage des espaces maritimes dans la zone du DPM mais aussi au-delà<sup>22</sup>.
- **Code de l'Urbanisme** :
  - Procédures liées aux constructions nouvelles, aux travaux, installations et aménagements affectant l'utilisation du sol (articles L420 et R420-1 et suivants), notamment pour les locaux techniques implantés à terre.
  - Pour les ouvrages situés en mer, l'article R421-8-1 précise que sont dispensées de toute formalité au titre du Code de l'urbanisme, en raison de leur nature et de leur implantation sur le domaine public maritime immergé au-delà de la laisse de la basse mer, les installations de production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable, y compris leurs ouvrages de raccordement aux réseaux publics d'électricité, notamment les éoliennes, les hydroliennes, les installations houlomotrices et marémotrices ainsi que celles utilisant l'énergie thermique des mers.
  - L'extension de l'urbanisation sur le littoral est encadrée par les articles L121 et R121-1 et suivants.
- **Code de l'énergie** :
  - Demande de raccordement au réseau électrique (articles D342-4-9 à D342-4-11),
  - Autorisation d'exploiter (article R311-10).

Les différentes rubriques encadrant les procédures d'évaluation environnementale et loi sur l'eau sont présentées dans les tableaux page suivante.

---

<sup>20</sup> Voir tableau page suivante.

<sup>21</sup> Voir tableaux pages suivantes.

<sup>22</sup> Le préfet est le gestionnaire du DPM. Au-delà de 12 miles nautiques et jusqu'à la limite de la Zone Economique Exclusive (200 miles nautiques), c'est normalement le Préfet maritime qui a autorité en matière d'usage de ces espaces. Dans les DOM toutefois, il n'y a pas de préfet maritime : la fonction de « délégué du gouvernement pour l'action de l'État en mer » (DDG AEM) est dévolue au préfet.

Tableau 18 : rubriques de la nomenclature pour l'évaluation environnementale potentiellement visées pour les projets d'énergie marine (Annexe à l'article R122-2 du Code de l'environnement, Modifié par Décret n°2018-435 du 4 juin 2018 - art. 1)

Rubrique	Types d'énergies marines concernées	Ouvrages soumis à évaluation environnementale systématique	Ouvrages soumis à examen au cas par cas
<b>11. Travaux, ouvrages et aménagements en zone côtière.</b>	Systèmes houlomoteurs intégrés dans des aménagements côtiers	/	a) Ouvrages et aménagements côtiers destinés à combattre l'érosion et travaux maritimes susceptibles de modifier la côte par la construction notamment de digues, de môles, de jetées, d'enrochements, d'ouvrages de défense contre la mer et d'aménagements côtiers constituant un système d'endigement.  b) Reconstruction d'ouvrages ou aménagements côtiers existants.
<b>18. Dispositifs de prélèvement des eaux de mer.</b>	Energie thermique des mers	/	Tous dispositifs dont le prélèvement est supérieur ou égal à 30 m <sup>3</sup> /h d'eau de mer.
<b>19. Rejet en mer.</b>	Energie thermique des mers	/	Rejet en mer dont le débit est supérieur ou égal à 30 m <sup>3</sup> /h.
<b>22. Installation d'aqueducs sur de longues distances.</b>	Energie thermique des mers	/	Canalisation d'eau dont le produit du diamètre extérieur avant revêtement par la longueur est $\geq 2\ 000\ \text{m}^2$ .
<b>31. Installation en mer de production d'énergie.</b>	Toutes	Eolienne en mer.	Toute autre installation.
<b>33. Lignes électriques sous-marines en haute et très haute tension.</b>	Toutes	Construction de lignes électriques en haute et très haute tension (HTB) en milieu marin.	/
<b>34. Autres câbles en milieu marin.</b>	Toutes	/	Autres câbles en milieu marin installés sur le domaine public maritime, la zone économique exclusive ou sur le plateau continental.
<b>35. Canalisations de transport d'eau chaude de température inférieure à 120° C ou d'eau de refroidissement.</b>	Energie thermique des mers	Canalisations dont le produit du diamètre extérieur avant revêtement par la longueur du réseau de transport aller et retour est $\geq 10\ 000\ \text{m}^2$ .	/

Tableau 19 : rubriques de la nomenclature loi sur l'eau (Article R214-1 du Code de l'environnement, Modifié par Décret n°2017-81 du 26 janvier 2017 - art. 3)

Rubrique	Types d'énergies marines concernées	Déclaration	Autorisation
<b>2.2.2.0. Rejets en mer</b>	Energie thermique des mers	La capacité totale de rejet étant supérieure à 100 000 m3/ j	/
<b>4.1.2.0. Travaux d'aménagement portuaires et autres ouvrages réalisés en contact avec le milieu marin et ayant une incidence directe sur ce milieu</b>	Toutes	2° D'un montant supérieur ou égal à 160 000 euros mais inférieur à 1 900 000 euros	1° D'un montant supérieur ou égal à 1 900 000 euros

#### e) Synthèse – le contexte réunionnais

La Réunion présente un environnement relativement contraint, avec des fonds très pentus, un littoral varié et des côtes soit urbanisées, soit protégées. Les zones littorales et marines de l'île comprennent des habitats et des espèces fragiles, protégés par divers outils réglementaires ou fonciers. L'île est sous l'influence des vents d'alizés, des houles australes et des cyclones.

Les activités économiques liées à la mer sont minoritaires, bien que la pêche reste l'une des principales sources d'exportation. Les infrastructures portuaires qui égrainent la côte adaptées à la plaisance ou à la petite pêche traditionnelle. Seul port industriel et commercial de l'île, le Grand Port Maritime de la Réunion n'est pas encore adapté à la filière des énergies marines, mais prévoit de l'être dans les années à venir.

La production électrique de l'île dépend principalement des ressources fossiles importées (charbon pour la base, pétrole en appoint), bien que 34% provienne de ressources renouvelables (photovoltaïque, hydraulique, bagasse de canne à sucre). L'électricité coûte presque 4 fois plus à produire qu'en métropole.

Les objectifs révisés (encore non validés) intègrent pour la période 2023-2028 : 0 à 40 MW d'éolien en mer, 0 à 5 MW d'énergie de la houle, 2 à 5 MW d'énergie thermique des mers en production électrique, et 14 GWh/an de production électrique évitée grâce à la production de froid par énergie thermique des mers.

En France toutefois, les conditions économiques sont peu propices au développement des énergies marines. L'absence de tarifs d'achats réglementés ou leur caractère obsolète n'offrent aucune visibilité aux investisseurs, les projets devant être négociés au cas par cas auprès de la CRE et des pourvoyeurs de subventions. La filière reste alors tributaire des appels d'offres nationaux, lancés par exemple pour l'éolien en mer.

Outre le challenge technique et économique, les projets d'énergie marine sont soumis à une série de procédures réglementaires liées à l'environnement, à l'énergie, à la sécurité en mer et à l'utilisation d'espaces publics qui doit être anticipée plus d'un an à l'avance et discuté avec les services de l'état.

### 1.2.3. Historique des projets menés à la Réunion

Dans ce chapitre sont présentés :

- la liste des projets étudiés pour la Réunion ces 20 dernières années,
- le contenu des études réalisées et les principaux résultats à retenir,
- un retour d'expérience des faits marquants et des barrières rencontrées.

#### a) Aperçu des projets

Les projets d'énergie marine renouvelable qui ont été étudiés à la Réunion sont synthétisés dans le Tableau 20 ci-après. Pour plus de détail, des fiches projets sont disponibles en annexe.

Tableau 20 : liste des projets EMR menés à la Réunion

Date	Type	Projet	Descriptif
2003	Houle	Etude de potentiel	Etude de l'ARER de caractérisation du gisement potentiel.
2007	Houle	Etude de potentiel	Etude du BCEOM pour la Région Réunion.
2009-2014	Houle	Projet « SEAWATT »	Projet de parc houlomoteur de technologie PELAMIS à Saint-Pierre.
2009-2014	Houle	Projet « Houle Australe »	Projet de parc houlomoteur de technologie CETO à Saint-Pierre.
2010	Houle	Note d'opportunité sur la houle onshore	Etude de pré-faisabilité de la SPL ER pour la Région Réunion pour implantation d'un système LIMPET sur 3 sites potentiels (Saint-Philippe, NRL, port de Sainte-Marie).
2009	Courant	Note d'opportunité sur l'exploitation des courants marins à Saint-Paul	Campagne de mesures PARETO/ARVAM sur 3 sites à Saint-Paul et état de l'art de la SPL ER.
2015	Vent	Opportunités de l'éolien en mer à la Réunion	Etude de la SPL ER pour la Région Réunion.
2008	ETM	Valorisation d'eau froide profonde au Port	Campagne de mesures PARETO/ARVAM et note d'opportunités de l'ARER pour la Ville du Port.
2008	ETM	Valorisation d'eau froide profonde à Sainte-Rose	Campagne de mesures PARETO/ARVAM et note d'opportunités de l'ARER pour la Ville de Sainte-Rose.
2012	ETM	Prototype à Terre	Livraison à l'ITUT de Saint-Pierre d'un banc d'essai du système énergie pour une centrale de production d'électricité ETM.
2012	ETM	Refroidissement industriel de la centrale thermique de Bois Rouge	Etude de pré-faisabilité de CREOCEAN pour ALBIOMA.
2015-2016	ETM	Refroidissement industriel de la centrale électrique de Port-Est	Etude de faisabilité pour EDF.
2012-2016	ETM	SWAC du SIDEO	Projet de réseau de froid urbain sur les communes de Saint-Denis et Sainte-Marie.
2012-en cours	ETM	SWAC de l'Hôpital de Saint-Pierre	Consultation restreinte en cours.
2018-en cours	ETM	SWAC de l'Aéroport Roland Garros	Etude de solutions de production de froid pour l'aéroport incluant un scénario de SWAC.
2017-en cours	ETM	Projet énergétique de Bois-Rouge	Valorisation de chaleur industrielle et d'ETM sur la zone industrielle de Bois-Rouge en lien avec le projet de développement portuaire du site.
2009	Osmose	Valorisation du rejet d'eau douce de la centrale hydro-électrique de Sainte-Rose	Etude de pré-faisabilité de l'ARER pour la Ville de Sainte-Rose sur l'opportunité d'une centrale à énergie osmotique dans le port basée sur la technologie Statkraft.
2009	Toutes	Schéma Régional des Energies de la Mer de la Réunion	Document rédigé par l'ARER pour la Région Réunion.

Le contenu de ces études et leurs principaux résultats sont synthétisés ci-après.

## b) Synthèse du précédent SREMER 2009

Ce document comportait trois parties :

- Une présentation générale des différents types d'EMR et un état de l'art des technologies ;
- Un recueil des données locales ;
- Une analyse pour la Réunion incluant une localisation de sites potentiels terrestres, côtiers, et au large, l'estimation de leur potentiel et des contraintes afférentes (érosion littorale, morphologie de côte, longueur du câble, profondeurs, contraintes réglementaires).

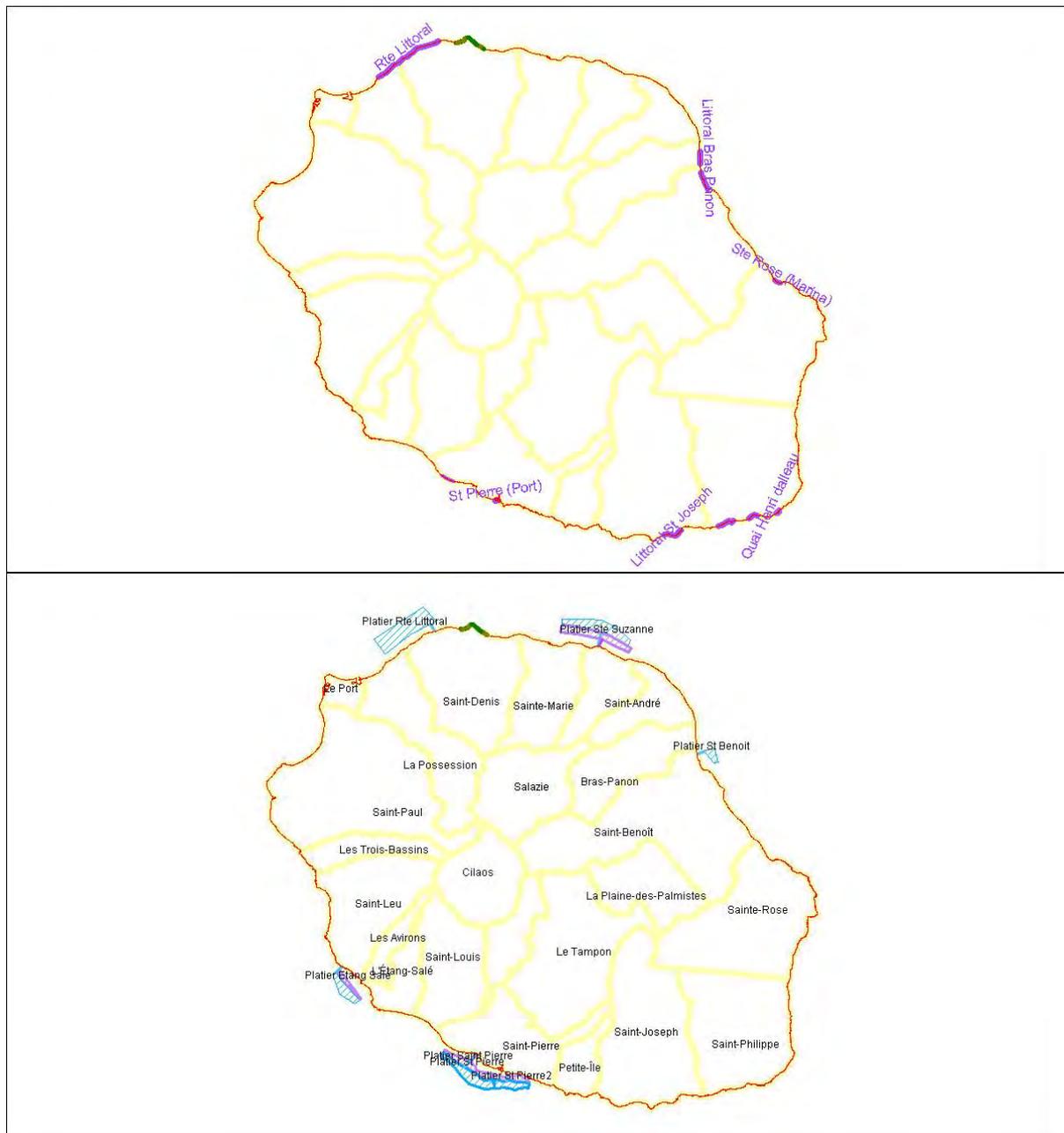


Figure 78 : Sites potentiels pour la houle à la côte (on shore), côtière (near shore) et au large (offshore). Source : SREMER 2009.



### c) Projets menés à la Réunion sur le houlomoteur

Pour les projets EMR développés à la Réunion présentés au chapitre précédent, le niveau d'études produites, les éventuelles campagnes d'acquisition de données réalisées, les principales conclusions des études, les raisons d'abandon ou l'avancement du projet sont précisés ci-après.

#### *Etude de l'énergie des vagues à la Réunion (ARER 2003)*

Première étude sur l'énergie des vagues spécifique à la Réunion, ce stage de fin d'étude de Gwenole Perrono de l'Ecole Supérieure de Mécanique de Marseille a permis :

- **D'évaluer la ressource offshore au large de la Réunion**, à partir de données extraites par MétéoFrance dans la base de données du centre européen ECMWF. Les séries de données utilisées débutent le 1er janvier 1992 et finissent le 31 décembre 2001 soit dix années de données. Elles ont fait l'objet d'analyses statistiques visant à caractériser le champ global de vagues : moyennes mensuelles, roses de direction, fréquences d'occurrence, etc. Ces analyses n'ont porté que sur les nœuds 46, 47, 48, 56, 58, 66, 67 et 68 du maillage (situés dans le cadre vert).

Figure 81 : zone d'étude du potentiel offshore.  
Source : ARER 2003

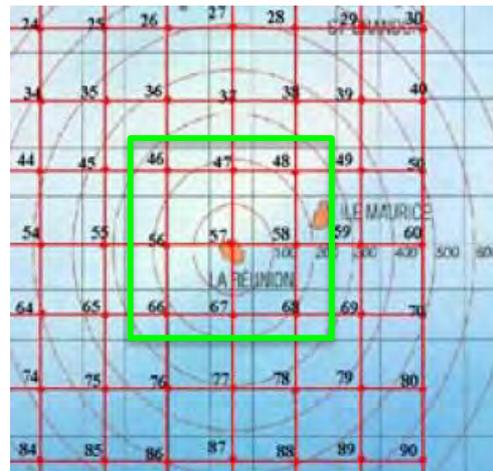


Tableau 21 : potentiel énergétique de la houle au large de la Réunion calculé sur 10 ans de données. Source : ARER 2003

Points	46	47	48	56	58	66	67	68
latitude	19,5°	21°	22,5°	19,5°	22,5°	19,5°	21°	22,5°
longitude	54°	55,5°	57°	54°	57°	54°	55,5°	57°
H1/3 principale	1,9	1,5	2	1,6	1,9	2,1	2,1	2,2
T1/3 principale	9,1	8,4	8,4	9,5	9,4	9,3	9,5	9,3
	16,4255	9,45	16,8	12,16	16,967	20,5065	20,9475	22,506
(H1/3;T1/3) principal	{2;10}	{1,5;9}	{2;9,5}	{1,75;11}	{2;10}	{2,75;11}	{10,5;2}	{10,5;2,25}
H1/3	2	1,5	2	1,75	2	2,75	2	2,25
T1/3	10	9	9,5	11	10	11	10,5	10,5
potentiel associé	20	10,125	19	16,84375	20	41,59375	21	26,578125
Secteur le plus énergétique	135° à 150°	105° à 120°	120° à 135°	195° à 210°	120° à 135°	180° à 195°	180° à 195°	180° à 195°
Potentiel total	20,51	13,82	20,46	17,26	21,4	24,7	25,89	27,6

- **D'évaluer la ressource onshore** à partir des données des houlographes de l'île, au niveau de la bouée (profondeur moyenne 25 m), sans calcul de propagation. Le potentiel annuel moyen calculé est de **12 kW/m à Saint-Pierre**, de 17,5 kW/m à Vincenzo, de 3 kW/m à Sainte-Rose et de 1,65 kW/m à la Pointe du Gouffre.
- D'effectuer une **veille technologique** sur les systèmes houlomoteurs et d'établir le **cadre réglementaire** s'appliquant à ces dispositifs d'énergie ;
- De rédiger les **cahiers des charges** pour lancer des études plus approfondies :
  - étude de la houle côtière par simulation numérique de la propagation à la côte,
  - diagnostic environnemental, réglementaire et d'accessibilité aux réseaux électriques et routiers,
  - campagne de mesure in situ de la houle sur 1 an.

*Etude du potentiel houlomoteur du BCEOM (2007)*

L'étude finalisée en 2007<sup>23</sup> portait sur le Sud de l'île et comportait :

- Une **analyse statistique des données de houle Météo France** disponibles sur la période 1999-2002, en 4 points au large de la moitié Sud de l'île ;
- Une **modélisation de la propagation du large à la côte** à l'aide du logiciel Tomawac sur Télémac ;
- L'estimation du potentiel énergétique sur 12 sites ;
- **L'identification de 6 sites propices** à l'implantation de dispositifs houlomoteurs :
  - Site 1: Quai d'Henri Dalleau, Saint-Philippe ;
  - Site 2: Pointe du bétail, à 800 m à l'Est du Baril, Saint-Philippe ;
  - Site 3: Pointe Langevin, Saint-Philippe ;
  - Site 4: Pointe du Parc, Saint-Pierre ;
  - Site 5: Étang Salé (le gouffre) ;
  - Site 6: Saint-Leu (face à la ravine du Grand Étang).
- Une analyse multicritères de ces sites.

Le potentiel estimé sur les sites varie de 17 à 24 kW/m à des distances de 150 m à 1 km de la côte, et des profondeurs supérieures à 50 m.

*Projet SEAWATT de technologie PELAMIS (2009-2014)*

Porté par la société SEAWATT, le projet prévoyait l'installation à la Pointe du Diable, à Saint-Pierre :

- D'abord un parc pilote de 5 machines houlomotrices PELAMIS de 2<sup>e</sup> génération, d'une puissance unitaire prévue à l'époque de 1 MW ;
- Puis d'ici 2015, un parc industriel de 30 MW, soit 30 à 40 machines selon la puissance unitaire considérée (les machines de 2<sup>e</sup> génération seront finalement de 750 kW et non de 1 MW).

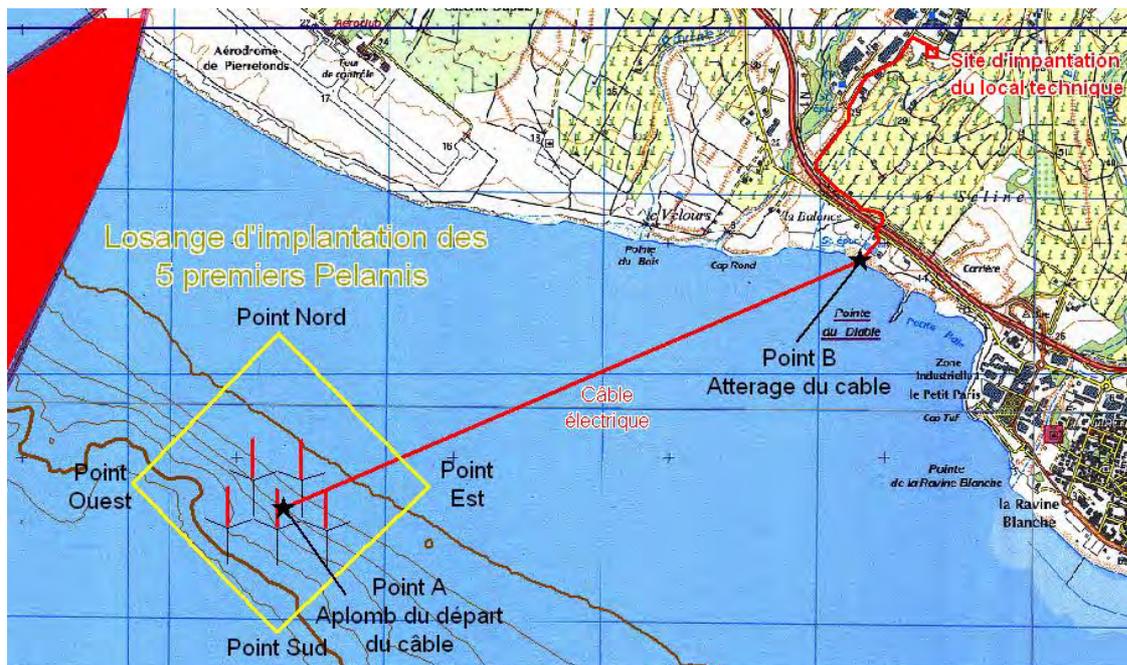


Figure 82 : localisation du projet SEAWATT à Saint-Pierre. Source : SEAWATT.



Figure 83 : machine PELAMIS de 2<sup>e</sup> génération en Ecosse. Source : EMEC

<sup>23</sup> La première version du rapport est parue en 2005, la version 7 finale validée date de 2007.

Faute d'un tarif de rachat suffisant, et suite à la faillite de la société PELAMIS conceptrice des machines, le projet n'a pas été porté à son terme.

Le projet a néanmoins fait l'objet des études suivantes :

- **Campagnes d'acquisition de données** sur le site de la Pointe du Diable (non communiquées, confidentielles) :
  - Bathymétrie multi-faisceaux,
  - Prospection au sonar latéral bi-fréquences,
  - Prospection au sondeur de sédiments,
  - Prélèvements de sédiments par benne Van Veen,
  - Mesure de houle et de courant par ADCP sur 48 jours de septembre à novembre 2009.
- **Expertises environnementales** : diagnostic des milieux terrestres littoraux, des fonds marins (plusieurs campagnes ont été réalisées pour compléter les demandes de la DEAL sur les milieux coralliens), des cétacés et des tortues marines.
- **Obtention des autorisations réglementaires** : étude d'impact, concession DPM, enquête publique, permis de construire, raccordement EDF.
- **Publication scientifique**<sup>24</sup> conjointe du laboratoire PIMENT de l'Université de la Réunion et de la société SEAWATT sur l'intérêt technico-économique du stockage d'énergie par air comprimé pour la technologie PELAMIS, dans le cas du projet de Saint-Pierre.

*Projet « Houles australes » de technologie CETO (2009-2014)*

Porté par la société EDF Energies Nouvelles, le projet prévoyait l'installation à Saint-Pierre, au large de Pierrefonds :

- 2010-2011 : d'un prototype houlomoteur de technologie CETO, d'une gamme de puissance 100 à 200 kW, non connecté au réseau, pour une phase de test de 6 mois ;
- 2012-2014 : puis d'un parc pilote de quelques unités, d'une puissance totale de 2 à 5 MW ;
- 2015 : d'un parc industriel d'une puissance totale de 15 MW.

La phase prototype a finalement duré jusqu'en 2014. Le prototype (type CETO 4) est arrivé morceau par morceau en pièces détachées à la Réunion entre fin 2010 et début 2011. Les éléments ont été installés en mer et testés séparément. Suite à de nombreux soucis techniques, la phase de tests a duré jusqu'à 2013. Le prototype complet a finalement été installé en mer fin décembre 2013. L'installation du prototype a nécessité d'adapter les procédures de pose/dépose et d'installation en mer aux moyens disponibles en local. Tous les moyens possibles ont été mobilisés : 2 remorqueurs affrétés de Maurice, 1 hélicoptère, équipe de plus d'une douzaine de plongeurs. Quelques jours après l'installation, la liaison entre le flotteur et le corps-mort s'est rompue. Le 12 janvier 2014, le cyclone Bejisa a achevé de détruire le prototype.



*Figure 84 : remorquage du flotteur du prototype CETO au Port-Ouest / vue d'ensemble du système CETO 4e génération déployé à la Réunion. Source : EDF EN*

Le projet a pris fin avec la destruction du prototype.

<sup>24</sup> D. Hernandez-Torres, L. Bridier, M. David, P. Lauret, T. Ardiale. Technico-economical analysis of a hybrid wave power-air compression storage system. Renewable Energy, Elsevier, 2015, 74, pp.708-717. DOI : <10.1016/j.renene.2014.08.070>. <hal-01066899>

Le projet CETO a fait l'objet des études suivantes :

- **Campagne d'acquisition de données géophysiques** réalisée en 2009 par la société In Vivo Environnement, sur deux zones situées aux extrémités Sud-Est et Nord-Ouest de la piste d'atterrissage de Pierrefonds (superficies respectives de 2,4 et 1,2 km<sup>2</sup>). L'objectif était de définir et caractériser une zone d'implantation pour le projet. La campagne comprenait :
  - un levé bathymétrique,
  - un levé au sonar latéral,
  - un levé au sub bottom profiler (sondeur à sédiments),
  - des prélèvements de sédiments.
- **Réalisation d'un modèle local d'états de mer** par EDF EN R&D sur la zone de Saint-Pierre :
  - Construction d'une base de données d'états de mer à partir de simulations numériques effectuées avec TOMAWAC, sur une période de 20 ans (1989-2008).
  - Forçages météo (houle et vent) : réanalyse ERA Interim de l'ECMWF.
  - Domaines : 2 modèles emboîtés (grossier et raffiné) : les résultats du modèle grossier serviront comme entrées pour le modèle raffiné,
  - Validation du modèle basé sur les données de la bouée de Saint Pierre.

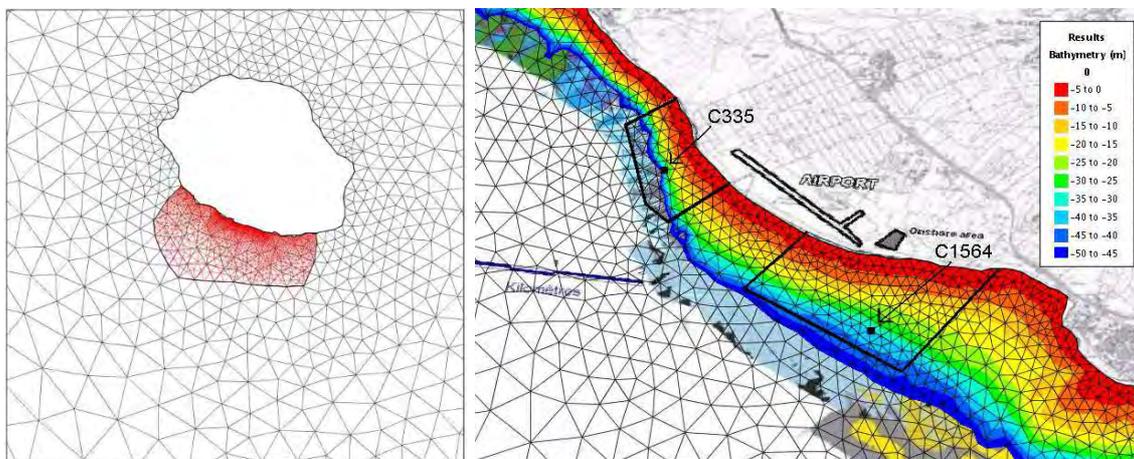


Figure 85 : maillages et emprises du modèle grossier et du modèle raffiné d'état de mer développé par EDF EN pour le projet « houle australe » (à gauche) et vue du modèle raffiné sur la zone de projet (à droite). Source : EDF EN 2009.

- **Obtention des autorisations réglementaires** : notice d'impact environnemental, déclaration ICPE au titre de la rubrique 2.9.2.0 (installation de compression), déclaration loi sur l'eau au titre de la rubrique 4.1.2.0 (travaux en contact avec le milieu marin et ayant une incidence sur la qualité de l'eau), demande d'AOT du Domaine Public Maritime (demande initiale fin 2010, prolongée deux fois en raison des retards sur le prototype). Ont notamment été réalisées :
  - **Expertise sur les biocénoses marines** avec reconnaissance sous-marine et cartographie des habitats ;
  - **Expertise mammifères marins** ;
- **Suivi environnemental** prévu lors des phases de tests en mer :
  - Suivi du courant et de la houle par ADCP : 2 campagnes de 3 mois prévues, l'une de juin à août 2011 et l'autre de septembre à novembre 2011,
  - Suivi de la qualité physico-chimiques des eaux : 15 prélèvements d'eau en 3 stations (sur le site d'implantation, en amont et en aval du courant) selon des transects dans le sens du courant et le long de la colonne d'eau (sub surface, milieu, fond). Une campagne réalisée en février 2011,
  - Suivi biologique des peuplements mobiles et fixes par plongées sur 3 radiales. Trois campagnes prévues à t0, t+3 mois et t+6mois. Campagne initiale réalisée en avril 2011,
  - Suivi hydroacoustique et suivi visuel pour évaluer l'impact du prototype sur les mammifères marins.

#### *Etude de pré-faisabilité houlomoteur côtier intégré sur digue (2010)*

3 sites faisant l'objet d'aménagement littoraux ont été étudiés, dans l'idée d'intégrer des systèmes houlomoteurs aux digues projetées pour :

- le réaménagement de la cale de halage à Saint-Philippe,
- la nouvelle route du littoral,
- l'extension du port de Sainte-Marie.

Le potentiel a été estimé à partir de la base de données CANDHIS du CETMEF. La localisation des sites de mesures des données CANDHIS est indiquée en jaune sur la figure ci-dessous.



Figure 86 : Estimation du potentiel houlomoteur autour de la Réunion. Source : SPL ER 2010

3 technologies houlomotrices ont été passées en revues sur les aspects techniques et économiques :

- La technologie **LIMPET** développée par la société WaveGen (rachetée en 2005 par Voith Hydro<sup>25</sup>), mise en œuvre sur deux sites (île d'Islay en Ecosse et port de Mutriku au pays basque espagnol). Malheureusement, **Voith Hydro a fermé sa branche marine** située en Ecosse en 2013 et semble depuis avoir abandonné ce secteur.
- La technologie **SDE** de la société israélienne WERPO, dont un prototype avait été testé au port de Jaffa. **La société semble avoir fermé depuis** (site internet disparu, aucune référence récente de la société).
- La technologie **SSG** développée par la société norvégienne Wave Energy. Aucune réalisation concrète de ce concept multi turbine. **La société semble avoir fermé depuis** (dernière actualisation du site en 2007, aucune référence récente dans la presse conventionnelle ou universitaire).



Figure 87 : de gauche à droite, technologies houlomotrices LIMPET, SDE, SSG.

Les conclusions du rapport étaient les suivantes :

- Marine de Saint-Philippe : site et contexte favorable.
- NRL : le site a été étudié dans le cadre de la tranche 1 du projet de recherche national EMACOP (Energies Marines COtières et Portuaires) lancé sur la période 2012-2016. Le potentiel évalué a été estimé insuffisant pour pousser plus loin l'étude (tranche 2).
- Sainte-Marie : l'étude de cas s'intégrant dans la réflexion sur l'allongement de la piste de l'aéroport devait se faire dans le cadre d'un projet monté avec EMACOP en cofinancement à 50% par la Région Réunion. Elle n'a jamais pu se concrétiser faute de financements.

Pour le site de la cale de halage de Saint-Philippe, les conclusions favorables de l'étude de 2010 ont conduit l'ARER à mener en 2011 un travail d'interface entre les acteurs et d'analyse du portage du projet. La commune portait alors un projet de réaménagement de la cale de halage sommaire existante. Des études de stade DCE ont été effectuées par Egis Eau.

<sup>25</sup> Voith Hydro est une multinationale allemande. C'est un fournisseur d'équipements pour centrales hydro-électriques.



Figure 88 : site envisagé pour un projet houlomoteur intégré sur digue, la cale de halage à la Marine de Saint-Philippe, version actuelle en haut, version projet sécurisée (sans dispositif houlomoteur) en bas. Source : EGIS 2010.

Le **projet global de réaménagement de la cale avec système houlomoteur intégré de type LIMPET** est alors évalué à 8 millions d'euros. En 2012, l'ARER étudie l'acceptabilité du projet et son contexte réglementaire. Il semble que deux facteurs aient conduits à **la mise en pause du projet** :

- Le **coût** trop élevé du projet pour le Maître d'Ouvrage. La nouvelle cale de halage elle-même ne verra pas le jour pour cette raison financière,
- La **mauvaise intégration paysagère** du module houlomoteur, d'une hauteur importante, ainsi que la **nuisance sonore potentielle** générée par les mouvements d'eau dans la structure vis-à-vis des habitations voisines.

Le projet de sécurisation de la cale de halage a été relancé par la CIVIS en 2018. Les études vont être relancées et actualisées, ce qui pourrait être l'occasion de réétudier le projet houlomoteur au regard de l'évolution du secteur.

#### **d) Projets menés à la Réunion sur l'hydrolien**

*Etude de potentiel hydrolien (2009)*

Une **campagne de mesure courantologique** par ADCP (profils de mesure sur toute la hauteur de la colonne d'eau) a été menée **sur 3 sites**, à des profondeurs d'environ 40 m, pour une durée de 1 mois par site :

- Baie de Saint-Paul (campagne en juillet/août)
- Cap La Houssaye (campagne au mois de juin),
- Passe de l'Hermitage (campagne en août/septembre).

L'étude conclut à un **potentiel trop faible**, avec :

- Baie de Saint-Paul : 80% des courants < 0,1 m/s,
- Cap La Houssaye : 80% des courants < 0,4 m/s,
- Passe de l'Hermitage : courants plus forts en surface, mais qui restent insuffisants, les courants compris entre 1 et 1,5 m/s ont une occurrence de 10% seulement.

## f) Projets menés à la Réunion sur l'éolien en mer

### Etude du potentiel éolien en mer flottant (2015)

L'estimation de la ressource est basée sur les données de vent à 50 m calculées selon le modèle AROME par MétéoFrance à partir d'un historique de mesures sur 30 ans. Ces données ont été extrapolées à 100 m dans l'étude pour correspondre aux hauteurs de mats des éoliennes offshore.

Après analyse des contraintes d'implantation, de raccordement, d'environnement et de réglementation, l'étude identifie **5 zones propices** à l'éolien en mer flottant, situées **entre 50 et 400 m de fonds**. Une estimation supplémentaire est effectuée en étendant ces zones jusqu'à 1000 m de fond (non représentées ci-dessous).

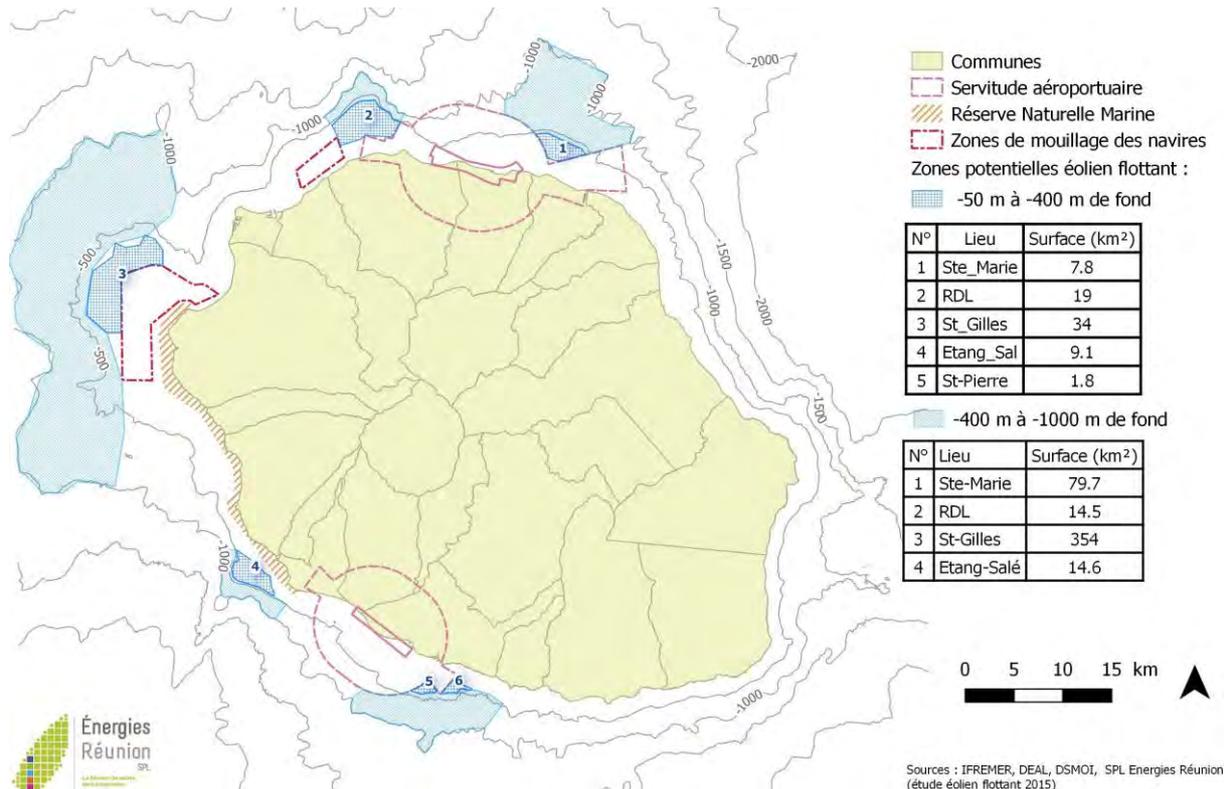


Figure 89 : zones potentielles pour l'éolien en mer flottant identifiés en 2015 par la SPL Energies Réunion

Le potentiel éolien en mer a été évalué en considérant ces 5 zones. L'estimation comprend une fourchette basse avec des éoliennes de 2 MW et 100 m de diamètre, et une fourchette haute avec des éoliennes de 6 MW et 150 m de diamètre. Le nombre d'éoliennes dans chaque zone est calculé en tenant compte d'une distance entre les éoliennes du parc de 8 fois le diamètre du rotor pour deux éoliennes alignées dans le sens du vent, et de 5 fois le diamètre du rotor dans le sens perpendiculaire au vent<sup>26</sup>.

Tableau 22 : Sites potentiels pour l'éolien en mer flottant identifiés en 2015 par la SPL Energies Réunion

Lieu	Surface (km <sup>2</sup> ) zone 50-400 m	Potentiel zone 50-400 m	Surface (km <sup>2</sup> ) zone 400-1000 m	Potentiel zone 400-1000 m
Sainte-Marie	7.8	24 à 42 MW	80	200 à 300 MW
Route du Littoral	19	60 à 90 MW	15	50 à 60 MW
Cap La Houssaye	34	90 à 140 MW	175	160 à 240 MW
Etang Salé	9.1	30 à 48 MW	15	42 à 72 MW
Saint-Pierre	1.8	20 à 36 MW	50	140 à 210 MW
<b>TOTAL</b>	<b>53 km<sup>2</sup></b>	<b>224 à 356 MW</b>	<b>335 km<sup>2</sup></b>	<b>592 à 882 MW</b>

Le critère profondeur avait été considéré à l'époque de l'étude comme limitant. **Aujourd'hui, il semblerait que des zones beaucoup plus profondes (> 1000 m) soient envisageables.** Dans ces conditions, le potentiel

<sup>26</sup> Soit une densité de puissance d'environ 3 à 5 MW/km<sup>2</sup>, ce qui correspond aux valeurs usuelles retenues (par exemple par le U.S. Department of Energy).

serait alors plus élevé car les conflits d'usages diminuent en s'éloignant de la côte, tandis que le gisement en vent augmente.

### g) Projets menés à la Réunion sur l'énergie thermique des mers

#### *Prototype à terre ETM DCNS (2012- en cours)*

---

Depuis 2012, l'IUT de Saint-Pierre héberge un banc d'essais de système de conversion d'énergie de centrale électrique ETM. Ce prototype à terre (PAT) ne comprend pas la partie maritime, à savoir les conduites, la prise d'eau et le pompage de l'eau de mer. Il n'est constitué que du système thermodynamique. Il s'agit d'un cycle fermé de Rankine dont le fluide de travail est l'ammoniac. Les sources froides et chaudes (normalement pompées en mer) sont simulées par une pompe à chaleur à l'ammoniac. Il n'y a pas de turbine pour la production électrique, le turbinage est simulé par un désurchauffeur et une vanne de détente. Le prototype a été dimensionné pour une puissance brute de 15 kW. Les résultats expérimentaux montrent que s'il y avait une turbine, le système produirait une puissance électrique brute de 13,7 kW pour une puissance nette de 10,9 kW.

Ce banc d'essai a pour objectif de caractériser les cycles thermodynamiques, de caler les modèles numériques et de tester et d'améliorer les équipements, notamment les échangeurs. Trois thèses ont été réalisées autour du prototype (F. Sinama, 2011 ; A ; Journoud, 2014 ; A. Dijoux, 2019).

Le programme de R&D associe Naval Energies (ex DCNS), l'Université de la Réunion via le laboratoire PIMENT (Physique et Ingénierie Mathématique Pour l'Énergie et l'environnement), et la Région Réunion. Les liens entre ces trois acteurs sont définis dans deux conventions :

- L'une, tripartite, entre la Région Réunion, l'Université et Naval Energies, qui définit les modalités d'utilisation du prototype et des résultats qui en émanent.
- L'autre, bipartite, entre la Région Réunion et Naval Energies, qui définit les essais menés chaque année et intègre le financement à parité des actions de maintenance.

#### *Valorisation d'eau froide profonde au Port (2008)*

---

Au Port, l'étude comportait :

- Des prélèvements et analyses d'eau en 3 sites et jusqu'à 1000 m de fond pour l'établissement de profils de température. La température mesurée à 1000 m de profondeur est de 5,1°C, qui est une température plus basse que celle de nombreux autres sites mondiaux.
- L'identification d'une zone d'atterrage préférentielle en collaboration avec des géologues de l'Université de la Réunion,
- Le pré-dimensionnement d'une centrale électrique ETM en cycle ouvert de 2,5 MW pour un  $\Delta T$  de 20°C,
- L'analyse de l'intérêt d'un couplage à la future centrale électrique du Port,
- L'analyse des besoins en froid au Port dans l'hypothèse d'un SWAC,
- L'analyse des besoins en eau douce et du potentiel de valorisation pour l'irrigation des espaces verts du Port,
- L'analyse des valorisations possibles de l'eau froide profonde : aquaculture, thalassothérapie, eau minérale à forte valeur ajoutée,
- Une estimation technico-économique de toutes ces solutions.

L'étude montrait que les conditions sont favorables à la réalisation d'un tel projet au Port, avec plusieurs activités à développer :

- La **production d'électricité** via une **centrale ETM en cycle ouvert de 2,5 MW nette** (soit 3,5MW brute avec 30% de perte pour le pompage de l'eau profonde), avec un tarif de rachat du kWh à hauteur de celui du photovoltaïque à l'époque, soit 0,40€/kWh. L'investissement était estimé à environ **60M€**, dont 60% pour la conduite d'eau froide profonde.
- La **production d'eau potable** pour les portois avec revente du m<sup>3</sup> d'eau à 2,8 €.
- La **production d'eau minérale** pour les marchés asiatiques avec revente à 1,3 €/litre.
- La **climatisation urbaine** (circuit long de **7 MW<sub>froid</sub>**) avec un SWAC pour l'ensemble de la ville du Port, d'un investissement estimé à 10 M€.
- Un questionnaire a été envoyé afin d'évaluer les besoins en **froid industriel**. Les réponses reçues ont permis d'identifier 600 kWf au Port-Ouest (SAPMER, Réunion Pélagique et Armement des Mascareignes) et à 1 MWf à la ZAC 2000 (Danone). Néanmoins, les températures sont trop basses pour être délivrées par un SWAC simple : -18°C en froid négatif et 2°-4°C en froid positif.
- Par la suite, il serait possible de développer les **activités d'irrigation** (en lien avec la politique de la ville en matière d'espaces verts).
- **L'aquaculture est difficilement envisageable** en raison du manque de foncier sur la commune et de la qualité de l'air défavorable (poussières problématique au maintien de la qualité de l'eau).

- Le couplage avec la **centrale électrique de Port-Est** (à l'époque en projet) n'était pas possible car la conception présentée par EDF ne le permettait pas.
- La rentabilisation du projet passe par le développement des activités de valorisation de l'eau froide profonde. Comparé à une centrale photovoltaïque de 12 Mwc (représentant la même production énergétique que la centrale électrique ETM et environ le même investissement), le projet autour de l'eau froide profonde générerait un développement économique local beaucoup plus important, qu'une centrale photovoltaïque.

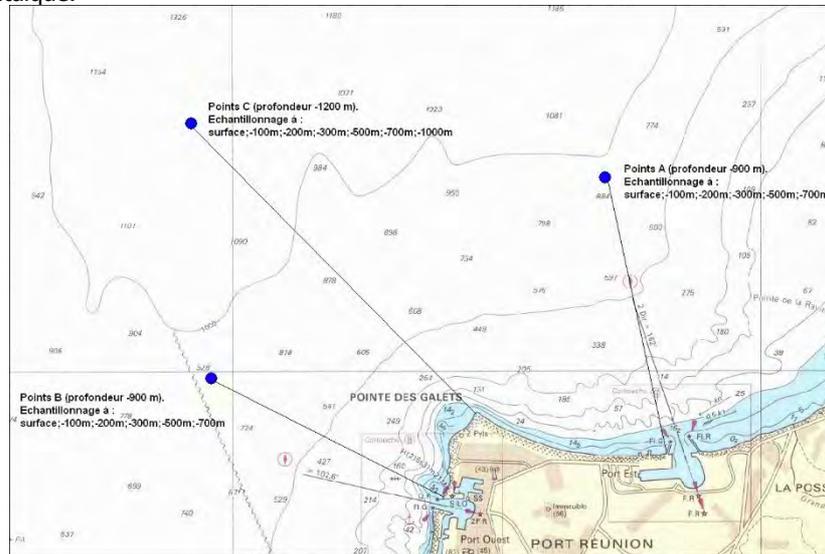


Figure 90 : Plan d'échantillonnage des prélèvements d'eau profonde au large de la ville du Port (d'après carte SHOM)

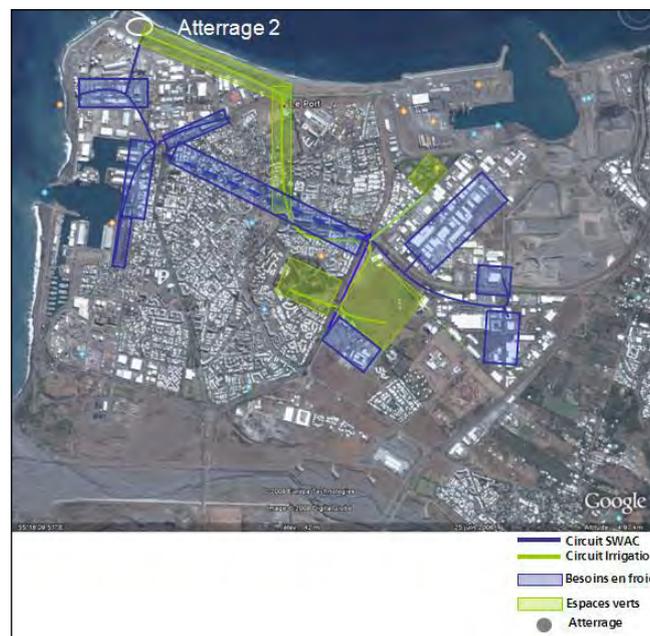


Figure 91 : Circuit de SWAC et d'irrigation au Port à partir de l'atterrage de la Pointe des Galets (Att 2)

Le projet n'a pas eu de suite, pour plusieurs raisons :

- Le Port faisait partie des sites envisagés par DCNS pour son projet NEMO, centrale électrique ETM flottante d'une dizaine de mégawatts. C'est finalement le site de Bellefontaine en Martinique qui a été choisi, vers 2012, comme premier site d'implantation.
- Les projets d'aménagement de la ville (notamment le projet « Ville et Port » d'ouverture du centre-ville vers le Port-Ouest) ont évolué ou ont été mis en pause, modifiant en cela les besoins en froid.
- C'est la solution de réutilisation des eaux usées traitées qui a finalement été choisie et mise en œuvre pour l'irrigation des espaces verts de la commune.

*Valorisation d'eau froide profonde à Sainte-Rose (2009)*

A Sainte-Rose, l'étude comportait :

- Des prélèvements et analyses d'eau réalisés le 07 janvier 2009 au large de Sainte-Rose jusqu'à 1600 m de fond pour l'établissement de profils de température. La température mesurée à 1600m de profondeur était de 2,9°C, et de 5,11°C à -1030 m. Les mesures ont permis de confirmer la stabilité de la température de la masse d'eau.
- L'analyse comparative de 4 zones d'atterrage, dont la plus intéressante serait située au niveau de la pointe de Bonne Espérance.
- Le pré-dimensionnement d'une centrale électrique ETM on shore en cycle ouvert d'une puissance nette de 3 MW pour un  $\Delta T$  de 20°C.
- L'analyse des valorisations possibles de l'eau froide profonde : climatisation, aquaculture, thalassothérapie, eau minérale à forte valeur ajoutée, eau de potabilisation et d'irrigation.
- Une analyse technico-économique de ces solutions.

L'étude conclut que :

- Les conditions environnementales à Sainte-Rose sont très favorables à l'énergie thermique des mers.
- Néanmoins, les besoins en froid, en eau potable et en irrigation de la commune sont trop faibles pour développer cette énergie à Sainte-Rose. Il faudrait attendre que cette énergie soit déjà développée à la Réunion avant de pouvoir envisager d'implanter un projet sur cette partie de l'île.

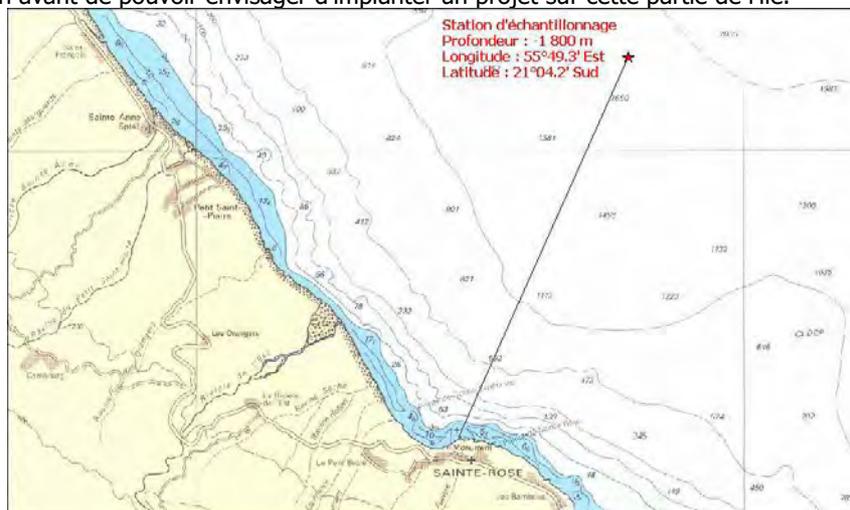


Figure 92 : Plan d'échantillonnage des prélèvements d'eau profonde au large de la ville de Sainte-Rose (d'après carte SHOM)

*Etude de refroidissement industriel marin pour la turbine à combustion EDF du Port-Est (2015-2016)*

De Profundis Ingenium a réalisé pour EDF une étude de faisabilité du refroidissement de centrale thermique du Port-Est à l'aide d'eau de mer pompée en profondeur. La centrale, exploitée par EDF SEI, est constituée de deux turbines à combustion alimentées au gazole. D'une puissance électrique brute de 80 MW, cet équipement permet de satisfaire les pointes de consommations journalières. La centrale fonctionne donc de manière ponctuelle, à raison de quelques centaines d'heures par an.

Par conséquent, bien que l'étude ait démontré la faisabilité technique d'un refroidissement marin, le **faible nombre d'heures de fonctionnement** de l'installation ne **permettait pas d'amortir le coût** de la conduite de pompage en mer.

*Etude de refroidissement industriel marin pour la centrale thermique de Bois Rouge (2012)*

Dans le cadre d'une réflexion interne, Séchilienne-Sidec, l'exploitant de la centrale, a étudié en 2012 l'opportunité et la faisabilité de pomper de l'eau de mer en substitution du pompage d'eau douce en rivière qui alimente les procédés de la centrale. Plusieurs scénarios et usages étaient envisagés :

- Le refroidissement par eau de mer du condenseur du procédé de production électrique, avec ou sans tour aéro-réfrigérante,
- La désulfuration des fumées par eau de mer (procédé de dépollution), suivant deux options différentes de procédé.
- Deux modes de pompages étaient envisagés, par forage dans la nappe ou par pompage en mer, avec différentes options de profondeurs de pompage et rejets.

L'industriel a confié l'étude, de stade pré-faisabilité, au bureau d'étude ARTELIA, avec une sous-traitance à PARETO pour la partie marine et à Marc Cruchet, hydrogéologue, pour la partie forage. L'étude, confidentielle, comprend une caractérisation de l'environnement et une analyse multicritères des différents scénarios.

Elle propose notamment un scénario avec pompage à 1000 m de fond qui envisage à long terme le développement d'activités innovantes autour de l'eau de mer et de l'énergie thermique des mers.

*SWAC Nord du SIDEO (2012-2016)*

Initié en 2009, le projet prévoyait la réalisation d'un réseau urbain de climatisation d'environ 20 km alimenté par un SWAC dont la puissance à terme devait atteindre 40 MW<sub>froid</sub>. Le réseau devait s'étendre de l'espace Océan en centre-ville de Saint-Denis à l'Ouest jusqu'à la Zone d'activité de la Mare à Sainte-Marie à l'Est, avec une extension envisagée jusqu'à l'Hôpital de Bellepierre. Il devait desservir jusqu'à 30 clients potentiels pour 54 sites.



Figure 93 : plan du réseau urbain de climatisation du SWAC Nord du SIDEO. Source : Climabyss avril 2012.

Le projet prévoyait de pomper l'eau à 1100 m de profondeur à environ 6 km au large de la Jamaïque. Les caractéristiques des ouvrages maritimes étaient les suivantes :

- prise d'eau à la profondeur de 1100 m environ,
- 6,2 km de conduite d'aspiration en PHED de diamètre 1600 mm, pour un débit nominal de 5 700 m<sup>3</sup>/h,
- 950 m de conduite de rejet en PEHD de diamètre 1400 mm,
- rejet par diffuseur situé entre les profondeurs 50 et 55 m,
- les conduites sont posées sur le fonds sous-marin, stabilisées par des lests en béton et des ancres. De 35 m de fond jusqu'au littoral, elles sont enfouies pour les protéger de la houle.

Le projet était porté par la Ville de Saint-Denis et la Ville de Sainte-Marie, regroupées sous la forme du SIDEO (Syndicat Intercommunal d'Exploitation des Eaux Océaniques). Un marché de conception, réalisation et exploitation a été lancé et attribué à la société Climabyss en 2011. La phase travaux prévue pour 2015 n'a jamais débuté car l'actionnaire principal de la société (Engie) a estimé que le projet n'était plus financièrement intéressant.

### *SWAC du CHSR Saint-Pierre (2014- en cours)*

---

Le besoin en froid du CHU de Saint-Pierre est estimé à environ 22 GWh/an pour 6 MW froid.

Les premières études commandées par EDF comprenaient :

- Etude de faisabilité, avant-projet sommaire et avant-projet détaillé réalisées par De Profundis Ingenium (2012-2016) ;
- Analyse du contexte réglementaire et environnemental par les bureaux d'étude ARTELIA/PARETO/ACOA (2013-2014). Cette étude incluait des **campagnes d'acquisition de données** sur le site (non communiquées, confidentielles) par ADCP (mesure de houle directionnelle, Courantométrie).

Le CHU a lancé en 2017 un appel d'offres pour l'achat de froid issu d'une production « dite verte / renouvelable » (de type SWAC ou autres procédés équivalent), dans le cadre d'une **procédure de dialogue compétitif**. Les candidats retenus devaient rendre leur offre pour le 31 mai 2018. Des échanges avec les candidats sont prévus pour mi-2018 et la signature du contrat est espérée pour la fin d'année 2018.

### *SWAC de l'Aéroport Roland Garros de Saint-Denis (2018)*

---

L'Aéroport Roland Garros de la Réunion a lancé en mars 2018 une étude sur ses besoins en froid. Réalisée par le bureau d'étude ARTELIA, celle-ci se décompose en 3 phases :

- Phase 1 : analyse des besoins frigorifiques de l'aéroport ;
- Phase 2 : étude des moyens de production de froid. L'une des pistes envisagée est l'exploitation de la nappe phréatique, car l'aéroport dispose d'un forage privé.
- Phase 3 : étude spécifique d'une solution SWAC avec 2 scénarii : l'un couvrant le périmètre de la concession aéroportuaire, l'autre s'étendant au-delà, vers la zone d'activité aéroportuaire Pierre-Lagourgue notamment.

### *Projet d'ETM à Bois Rouge (2017 – en cours)*

---

La Région Réunion, la CIREST et la ville de Saint-André se sont constituées en un Groupement d'Intérêt Public (GIP) pour la création d'un Pôle Portuaire Industriel et Énergétique à Bois Rouge. Le projet comprend :

- La création d'un port industriel à Bois-Rouge, à vocation internationale, incluant :
  - La création d'un terminal GNL ;
  - L'approvisionnement en combustible pour la centrale thermique de Bois-Rouge ;
  - L'exportation d'eau douce en vrac (issue des ressources abondantes sur la côte Est) vers les pays de la zone Océan Indien en situation de pénurie ;
  - Le transfert de certaines activités de Port-Est et Port-Ouest sur Bois-Rouge.
  - La création d'une « éco technopôle » tournée autour des activités portuaires, logistiques et d'exploitation d'eau de mer profonde. Sont notamment envisagés : l'implantation d'un data center, qui serait alors refroidi via un SWAC, un centre de recherche et formation, une pépinière d'entreprises innovantes et axées sur la valorisation de l'eau profonde.
- Un volet énergétique basé sur la **valorisation de l'eau de mer profonde et de la chaleur fatale industrielle**. Plusieurs scénarios sont envisagés, d'emprise, de calendrier et de technologies différentes. L'objectif est de réaliser au moins un scénario d'ici 2023, en accord avec la PPE. Parmi les technologies étudiées figurent :
  - La production électrique à partir de la chaleur fatale de la centrale thermique de Bois-Rouge (ORC) ;
  - La production électrique grâce à l'énergie thermique des mers ;
  - La production électrique par cycle organique de rankine avec des sources froides et chaudes optimisées (source froide avec l'eau de mer profonde et source chaude avec la chaleur fatale industrielle : HOTECH) ;
  - La production de froid à usage tertiaire (SWAC pour les activités liées à l'éco-technopôle) ou industriel (alimentation du condenseur de la centrale thermique de Bois-Rouge).

Une étude stratégique a été menée en 2018 par le groupement Naval Energie / ARTELIA pour le volet portuaire du projet. Sur le volet énergétique, une étude de pré-faisabilité technique, économique et réglementaire a été lancée en avril 2018 pour une durée de 12 mois. Elle est menée par le groupement Bardot Group / Enogia / Acoa Conseil / Cabinet Claisse & Associés, en collaboration étroite avec ALBIOMA pour les scénarios impliquant la centrale thermique de Bois-Rouge. La SPL Energies Réunion est AMO pour le GIP PPIEBR. Les coproduits de l'eau profonde sont intégrés à l'étude. Une estimation des externalités<sup>27</sup> du projet est également prévue.

---

<sup>27</sup> Les externalités sont les coûts induits cachés qui sont in fine supportés par la force publique (par exemple coût de la pollution sur la santé, coût de la disparition des insectes au regard des services rendus sur la pollinisation en agriculture).

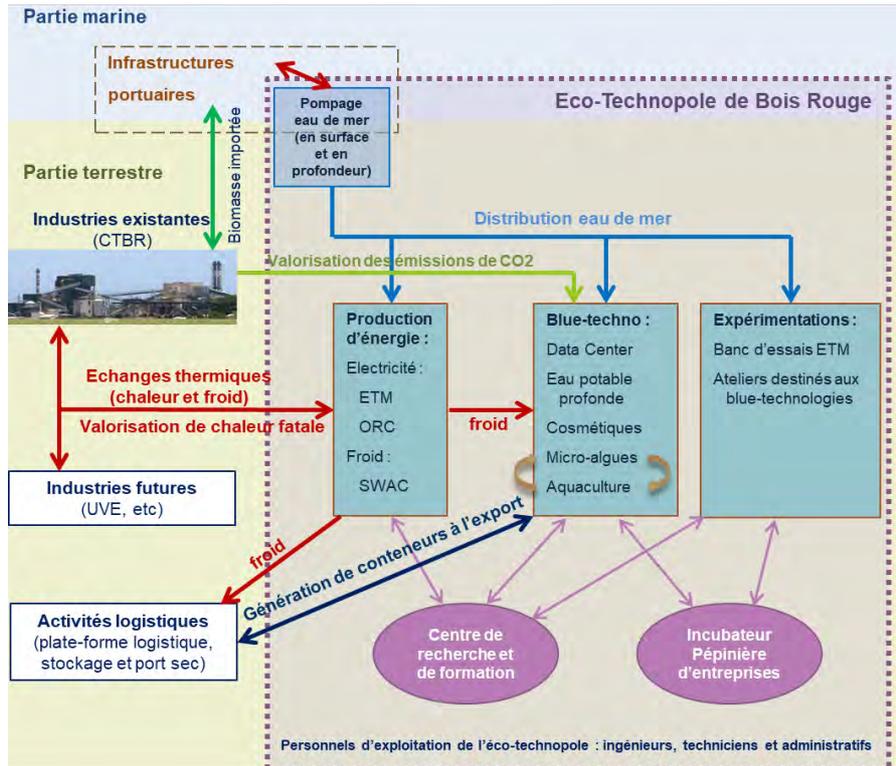


Figure 94 : projet de pôle portuaire, industriel et énergétique de Bois-Rouge. Source : Naval Energie

## h) Projets menés à la Réunion sur l'énergie osmotique

### *Valorisation du rejet d'eau de la centrale hydro-électrique de Sainte-Rose via l'énergie osmotique (2009)*

Cette étude conduite par l'ARER en 2009 étudie l'opportunité de valoriser le rejet d'eau douce de l'usine hydro-électrique du port de Sainte-Rose grâce à l'énergie osmotique. Elle comporte :

- Une **caractérisation du rejet** de la centrale hydro-électrique,
- Un **pré dimensionnement** basé sur les informations fournies par un développeur de cette technologie, le fabricant Statkraft. La centrale osmotique proposée repose sur la **technologie des membranes semi-perméable à spirale enroulée**. Elle serait composée de modules cylindriques de membranes disposés en étage, et d'une unité de pré-traitement de l'eau de mer par filtre à sable, avec éventuellement un bassin de stockage tampon de l'eau de mer. Plusieurs capacités sont étudiées. Il est proposé dans une première phase expérimentale, une centrale de 4 MW produisant 28 000 MWh/an, utilisant 4 m<sup>3</sup>/s d'eau douce sur les 6 m<sup>3</sup>/s rejetés par la centrale hydroélectrique.
- Cette centrale à énergie osmotique de 4 MW ferait une quarantaine de mètres de côté et une douzaine de mètres de haut. Elle pourrait être implantée à côté de la centrale hydroélectrique d'EDF, sur l'actuelle zone de carénage, au plus proche du rejet d'eau douce et d'un accès à l'eau de mer.
- Elle alimenterait en électricité environ 23 000 personnes et éviterait le rejet de 22 800 tonnes de CO<sub>2</sub>/an.
- L'aboutissement d'un tel projet est pour l'instant limité par le manque de maturité de la filière. **Le coût des membranes semi-perméables reste prohibitif**. Leur maintenance est difficile et leur durée de vie est limitée à 5 à 10 ans. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que l'eau douce et l'eau de mer disponibles à Sainte Rose sont d'une excellente qualité ce qui limite l'encrassement des membranes et donc allonge leur durée de vie.

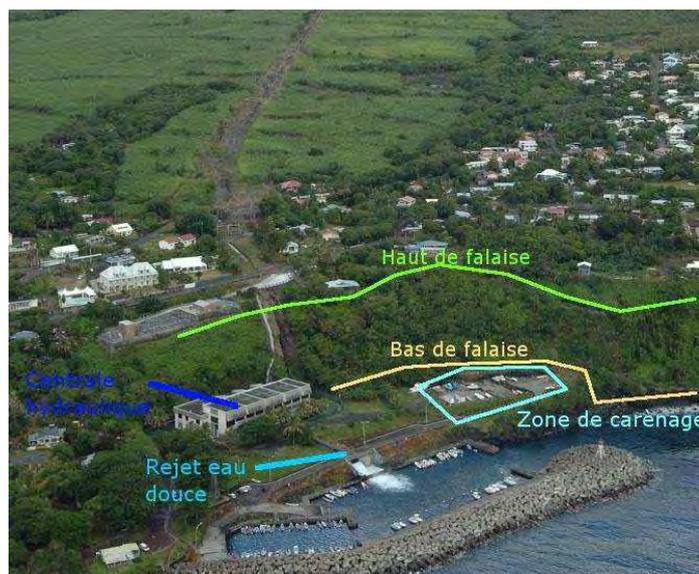


Figure 95 : Zone d'implantation potentielle d'une centrale d'énergie osmotique à Sainte-Rose. Source : ARER 2009.

## i) Carte de synthèse des études et des projets

Les deux cartes ci-après présentent la localisation des sites étudiés à la Réunion, et des projets de réalisation d'énergie marine menés à la Réunion.

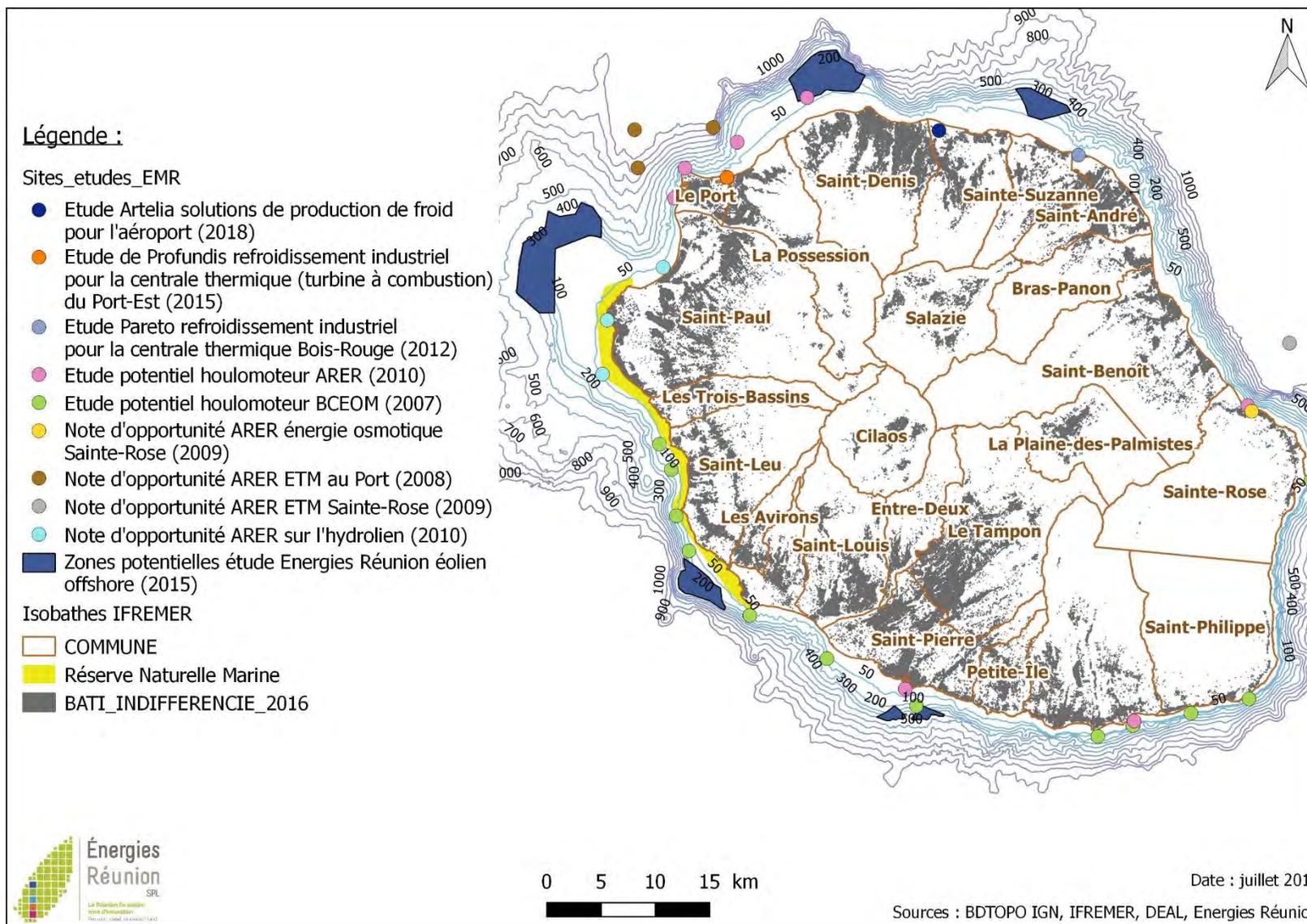


Figure 96 : cartographie des études énergies marines réalisées à la Réunion

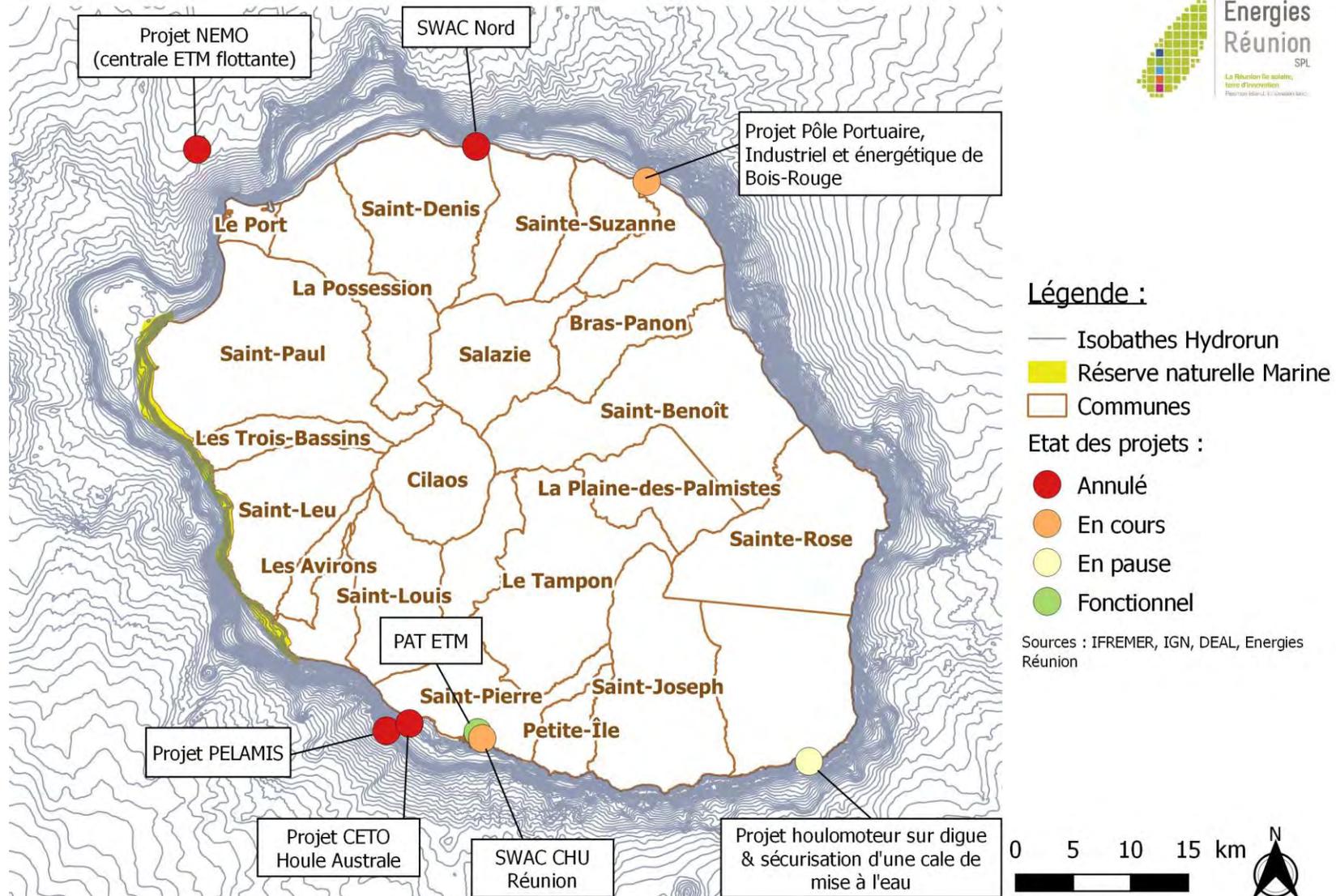


Figure 97 : cartographie des projets d'énergies marines passés et en cours à la Réunion en 2018

## j) Retour d'expérience et bilan de consultation

Une consultation a été menée afin de recenser les projets, recenser les données disponibles, sonder l'intérêt de partenaires potentiels et recueillir les avis et proposition sur les moyens de valoriser les énergies marines à la Réunion. Ont été consultés les aménageurs publics ou privés susceptibles d'accueillir des projets d'énergie marine, les développeurs d'énergies marines impliqués dans des projets à la Réunion, les référents scientifiques, les acteurs de la biodiversité réunionnaise, les acteurs de l'énergie à la Réunion et enfin les institutions de l'Etat. La liste des organismes consultés est disponible en annexe.

Ce travail de consultation a permis de mettre en lumière les points suivants :

- Les énergies marines font appel à une **multitude de thématiques** et donc à une **grande variété d'acteurs**. La consultation a permis de les identifier dans une première approche. S'il y a volonté de développer ce secteur, il apparaît d'ores et déjà nécessaire de rassembler ces acteurs autour de la thématique énergie marine pour faire ressortir des actions transverses et des synergies d'études ;
- Les acteurs consultés ont répondu de façon très variée à la consultation, certains organismes ont montré une forte volonté à s'associer aux initiatives menées sur les énergies marines, quand d'autres n'ont pas manifesté leur intérêt ;
- Les projets de CETO, PELAMIS et SWAC à la Réunion ont **marqué les esprits** ;
- Toutefois, on note dans l'ensemble une **mauvaise connaissance des énergies marines** et de leurs principes, une confusion entre les différentes technologies/énergies ;
- On constate une **perte de l'information au cours du temps** sur les projets avortés. Il n'est pas simple de remonter l'historique des études conduites, ou d'accéder aux données acquises même lorsqu'elles sont publiques. L'expérience gagnée par un maître d'ouvrage est alors plus difficilement valorisable sur un autre projet ou auprès d'une autre collectivité publique.

Plus largement, l'analyse des technologies menée au chapitre 1, croisé avec l'historique des projets menés dans le monde et à la Réunion, montre que :

- Le développement des énergies marines et la réussite des projets dépendent beaucoup d'une volonté politique à l'échelle nationale ou régionale. Lorsque ce soutien s'inscrit dans le long terme et s'accompagne d'un projet de développement régional, les retombées pour la collectivité sont positives : création ou dynamisation des activités portuaires et industrielles, rayonnement scientifique international ;
- Les projets trop ambitieux ne voient pas le jour.
  - Que ce soit le projet CETO à la Réunion, qui prévoyait de passer en 5 ans d'une phase de conception de prototype de 100 à 200 kW à un parc industriel de 15 MW, ou le projet NEMO qui prévoyait de passer en 4 ans d'un prototype à terre de 15 kW à la mise en service d'une centrale flottante de 16 MW, les délais ou les puissances annoncés dans les projets d'énergies marines sont souvent ambitieux.
  - Il s'agit d'effets d'annonce probablement destinés à convaincre les investisseurs, mais qui s'avèrent dans les faits irréalistes. Les échelles de projets trop grandes (en termes de puissance unitaire ou de taille du parc) sont souvent incohérentes avec la maturité de la technologie, ou avec la capacité de production des unités, ou encore avec la capacité de travaux en mer. Les délais annoncés paraissent fantaisistes.
  - Sur l'énergie thermique des mers et la fourniture d'eau de mer profonde, le retour d'expérience du SWAC Nord tend à montrer que l'ampleur du réseau et la multiplicité des clients potentiels se sont avérés pénalisants par la complexité qu'ils rajoutaient au projet.
- Les technologies choisies pour un site doivent intégrer très en amont, dans la conception même des machines, les moyens locaux de déploiement en mer, d'entretien et de maintenance ainsi que toutes les contraintes d'accessibilité (isolement, temps d'acheminements, etc.). **A la Réunion, en l'état actuel, les moyens nautiques et portuaires sont un facteur limitant au développement des énergies marines.** A l'inverse, lorsque des projets conséquents voient le jour, les énergies marines sont à l'origine du développement des infrastructures portuaires et industrielles locales. C'est le cas en France métropolitaine avec les projets d'éolien en mer en cours.
- La Réunion présente des **spécificités** en termes de géographie, de climat, d'insularité et d'environnement qui doivent être prises en compte dans le développement de projets d'énergies marines. Les solutions pour s'y adapter sont à trouver soit en **initiant en local des projets de recherche spécifiques**, soit **en s'associant à des territoires présentant des similarités**.

### **k) Synthèse – historique des projets à la Réunion**

La Réunion a été choisie comme terre d'implantation de plusieurs projets d'énergies marines, démontrant ainsi que son potentiel est reconnu par les industriels. Figuraient ainsi : un parc houlomoteur PELAMIS à Saint-Pierre (abandonné), un prototype houlomoteur CETO à Saint-Pierre (détruit), un projet de système houlomoteur intégré sur digue à Saint-Philippe (stoppé), une centrale flottante d'énergie thermique des mers au large du Port (finalement relocalisée à la Martinique), un réseau de froid urbain par énergie thermique des mers à Saint-Denis et Sainte-Marie (abandonné suite au retrait d'Engie). Ils ont permis d'apporter un retour d'expérience précieux pour fiabiliser les projets futurs.

D'autres projets sont en cours, tous autour de l'énergie thermique des mers : la climatisation marine du Centre Hospitalier Universitaire de Saint-Pierre, un projet de valorisation de l'eau de mer profonde à Saint-André, et une étude pour une climatisation marine pour l'aéroport international Roland-Garros de Sainte-Marie.

### 1.2.4. Synthèse du gisement potentiel d'énergies marines connu et identifié

#### a) Eolien en mer flottant : un potentiel de quelques centaines de mégawatts

##### Régime général des vents

La Réunion est soumise au régime de vent des alizés.

Les alizés sont des vents réguliers créés par la différence de pression entre l'équateur et les tropiques. En effet, chaque région océanique tropicale est soumise à l'influence d'un anticyclone.

Dans l'océan Indien Sud, il prend le nom « d'anticyclone des Mascareignes ». Cet anticyclone se situe au Sud Sud-Est de la Réunion. A basse altitude, les vents circulent depuis cet anticyclone vers l'équateur.

La force de Coriolis provoquée par la rotation de la Terre fait dévier la circulation de ces vents initialement d'axe Nord-Sud vers l'axe Est-Ouest : les alizés tournent ainsi en divergeant autour des anticyclones.

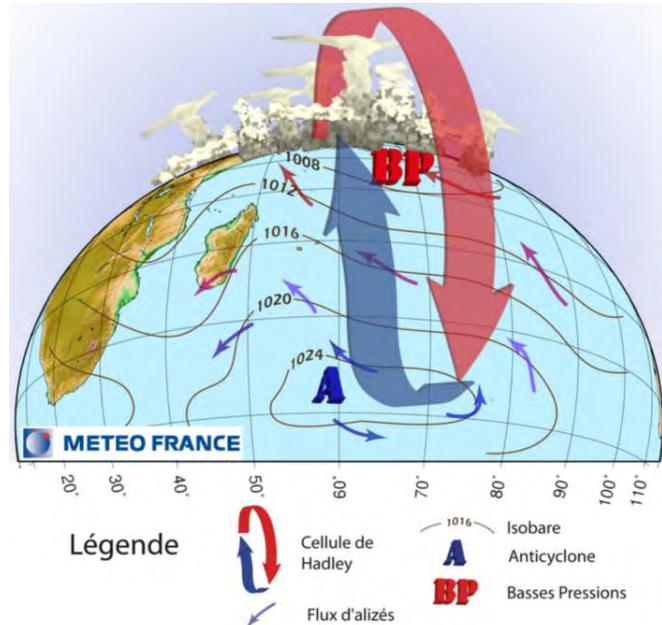


Figure 98 : Anticyclone des Mascareignes et alizés dans le Sud de l'Océan Indien (Météo France).

##### Saisonnalité des vents

Les alizés sont plus forts durant l'hiver austral, ce qui s'explique par le renforcement de l'anticyclone des Mascareignes. Par contre, durant l'été, ils sont plus faibles. A La Réunion, ils disparaissent quand la zone des basses pressions se rapproche.

##### Influence du relief de l'île

A l'approche de la Réunion, le relief imposant de l'île brise l'écoulement uniforme du vent. Les alizés sont ainsi contraints de contourner l'obstacle que représente l'île. Ce contournement crée 3 zones bien distinctes :

- **zone A** : les effets du relief se ressentent plusieurs dizaines de kilomètres en amont de l'île. En arrivant face au volcan, les particules d'air divergent pour amorcer leur mouvement de contournement et laissent la côte directement au vent nettement déventée.
- **zone B** : on observe une accélération du vent au large des côtes parallèles au vent puisque la présence du relief contraint l'air à traverser cette zone dans une section plus étroite. C'est l'effet Venturi.

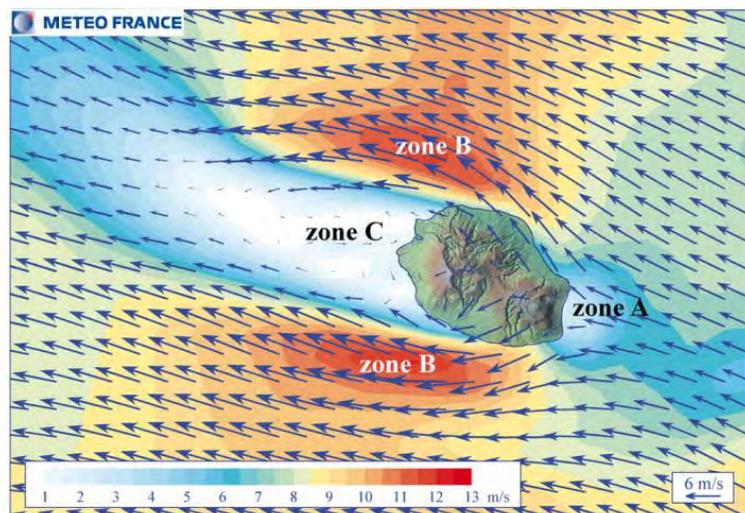


Figure 99 : circulation des alizés à l'approche de la Réunion - vents d'Est Sud-Est (Météo France).

- **zone C** : cette zone, située sous le vent est protégée des alizés par le relief. Des circulations faibles et complexes s'organisent et orientent le vent avec des directions variables sur les rivages de la côte sous le vent.

La direction des alizés, Est-Sud-Est en moyenne, varie classiquement du Sud-Est au Nord-Est. Bien entendu, les zones A, B et C suivent ces variations de direction et se décalent en conséquence comme le montrent les figures ci-contre.

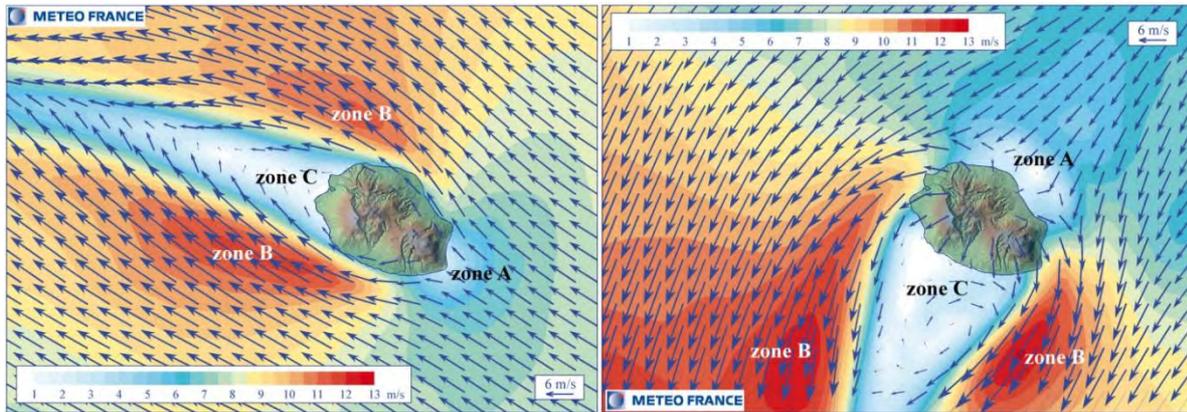


Figure 100 : circulation des alizés à l'approche de la Réunion - vents de Sud-Est à gauche, de Nord-Est à droite.  
(Source : Météo France)

Les flux de Nord-Ouest ou Sud-Ouest, quand par exemple un front froid aborde l'île, sont plus rares.

#### Gisement potentiel

Les zones les plus ventées en mer, au large de la Réunion, se situent donc au Nord-Ouest et au Sud-Ouest de l'île. C'est là que se situe un gisement de vents suffisamment forts pour une valorisation énergétique avec des parcs éoliens offshore flottants.

La carte page suivante illustre la moyenne annuelle des vitesses de vent à 100 m au dessus du niveau de la mer (hauteur de moyeu d'éolienne offshore), issues du modèle haute résolution (maille de 2,5 km) AROME de Météo France (description en annexe 8).

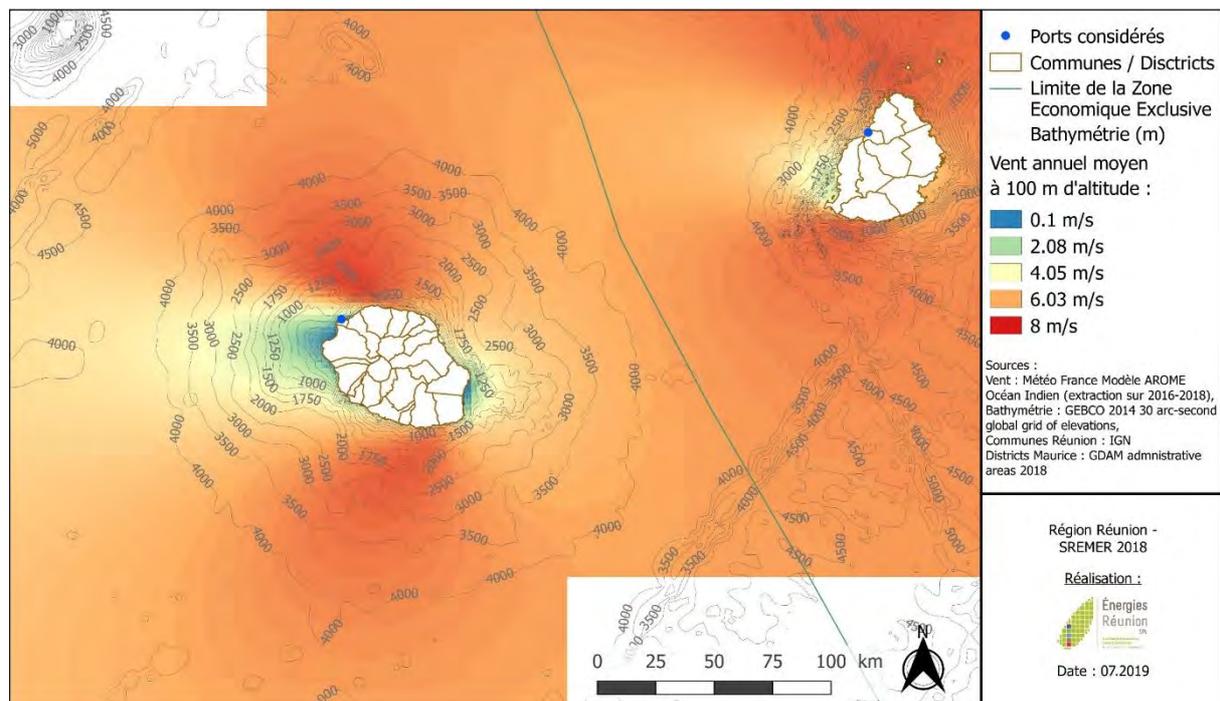


Figure 101 : gisement éolien en mer au large de la zone Réunion-Maurice



## b) Un potentiel houlomoteur intéressant sur la moitié Sud de l'île

### Régimes de houle

Trois types de houles frappent le littoral réunionnais. Elles ne concernent pas toutes les mêmes façades et possèdent des saisonnalités différentes. Ainsi, les houles d'alizés, plus soutenues en hiver austral, concernent plutôt le littoral Sud et Est. Les houles australes, les plus énergétiques et plus fréquentes en hiver, atteignent plutôt le Sud et l'Ouest, tandis qu'en été austral, les houles cycloniques ont plus de probabilité de toucher le littoral Nord.

La **façade Sud, exposée à la fois aux houles australes et aux houles d'alizés, est la plus énergétique.** C'est ce que montre la figure ci-dessous : les distributions des bouées SP et VI sont centrées autour de périodes  $T_s$  de 10 s et des hauteurs  $H_s$  de l'ordre de 1 à 1,5 m. Ces valeurs décrivent des houles plus énergétiques qu'au Nord.

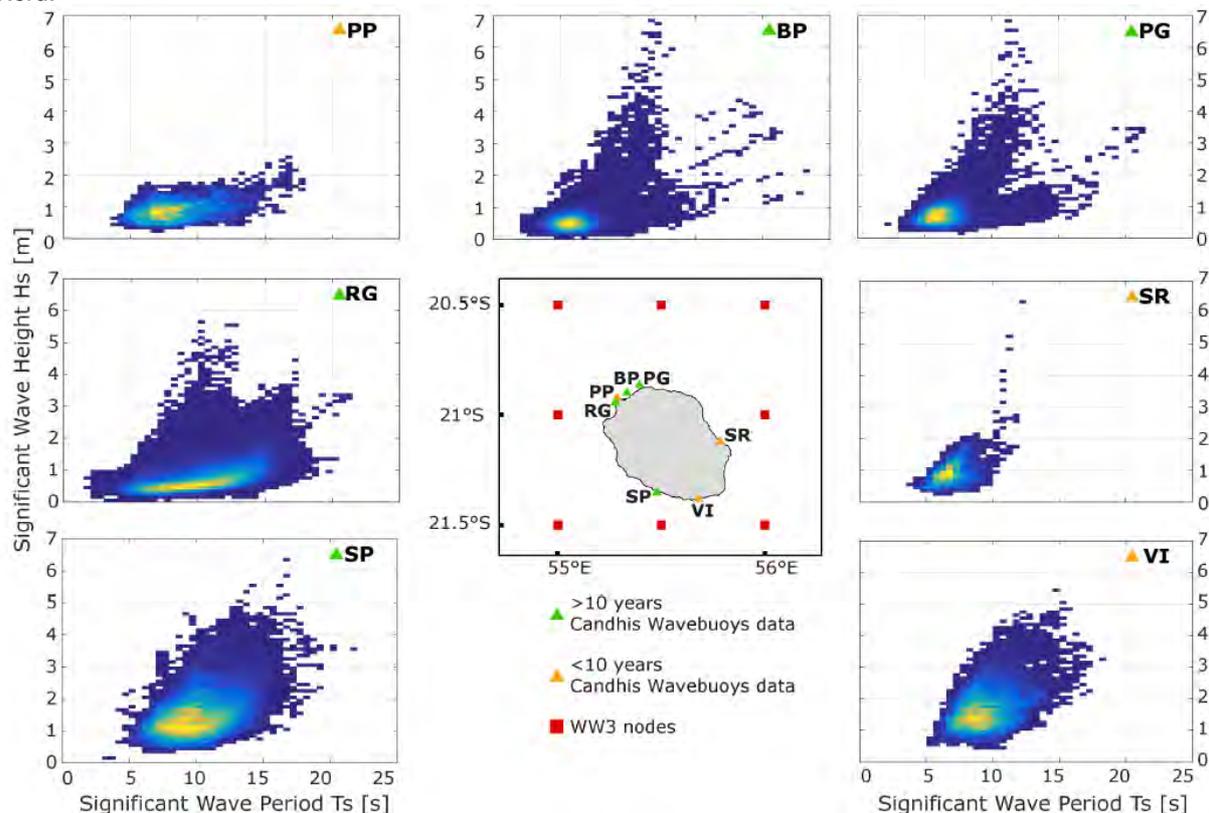


Figure 102 : description des états de mer autour de la Réunion à partir des houlographes du réseau CANDHIS (profondeurs 20 à 35 m). Distribution des occurrences de couples Hauteur significative ( $H_s$ ) / Période significative ( $T_s$ ). Les occurrences les plus faibles sont en bleu, les plus fortes en jaune. Source : Emmanuel Cordier 2018.

### Gisement potentiel

L'étude de l'ARER de 2003 a évalué la ressource à partir des données des houlographes du réseau CANDHIS, au niveau de la bouée (profondeur moyenne 25 m). Le potentiel annuel moyen calculé était de 12 kW/m à Saint-Pierre, de 17,5 kW/m à Vincenzo<sup>28</sup>, de 3 kW/m à Sainte-Rose et de 1,65 kW/m à la Pointe du Gouffre.

L'étude du BCEOM de 2007 a évalué la ressource à partir de données Météo France en 4 points au large du Sud de l'île, sur la période 1999-2002. Ces données ont été utilisées pour simuler la propagation à la côte sur 12 sites. Le potentiel annuel moyen calculé **pour la moitié Sud de l'île varie entre 17,9 et 23,8 kW/m**, pour des points situés à des distances de 150 m à 1 km de la côte, et des profondeurs supérieures à 50 m.

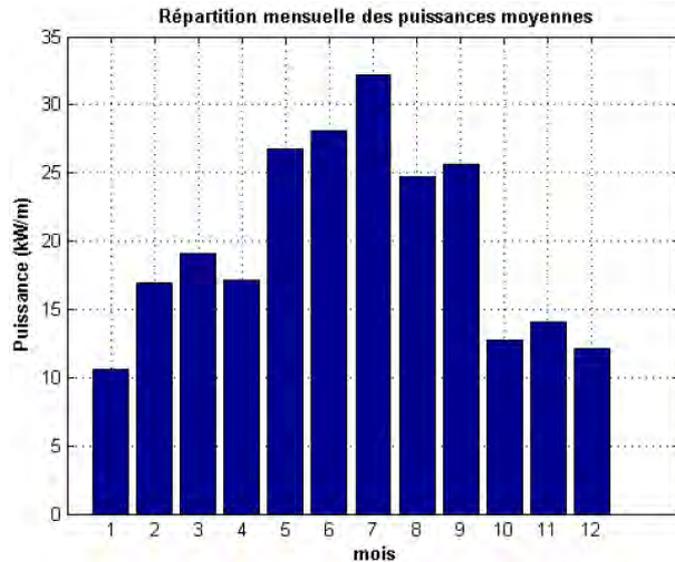
L'étude ARER de 2010 a ré-évalué la ressource à partir des mesures des houlographes du réseau CANDHIS, sur des périodes par conséquent plus longues qu'en 2003.

<sup>28</sup> Le potentiel du site de Vincenzo a été calculé par proportionnalité avec celui de Saint Pierre. En effet les données pour ce site n'étaient disponibles que sur les mois d'octobre à décembre 2002.

Le potentiel annuel moyen calculé est de **20,7 kW/m à Vincenzo**<sup>29</sup> (à 500 m de la côte et 35 m de fond), et de **16,5 kW/m à Saint-Pierre** (à 250 m de la côte et 27 m de fond).

Pour la **moitié Nord** de l'île, le potentiel est estimé **entre 2,5 et 5,7 kW/m selon le site**.

Figure 103 : variabilité mensuelle de la puissance de la houle à Vincenzo (ARER 2010).



Aux points de coordonnées des houlographes de Saint-Pierre et de Vincenzo, les données du modèle de propagation de vague développé par l'association réunionnaise Nérée (créatrice du site Météo La Mer) donnaient, en 2010, un potentiel annuel moyen de **27,6 kW/m à Vincenzo** et de **21,2 kW/m à Saint-Pierre**. Seules les données de houle diffèrent (modèle numérique et non mesures en mer), la formule utilisée pour le calcul de la puissance est identique à celle de l'ARER et la période considérée est identique.

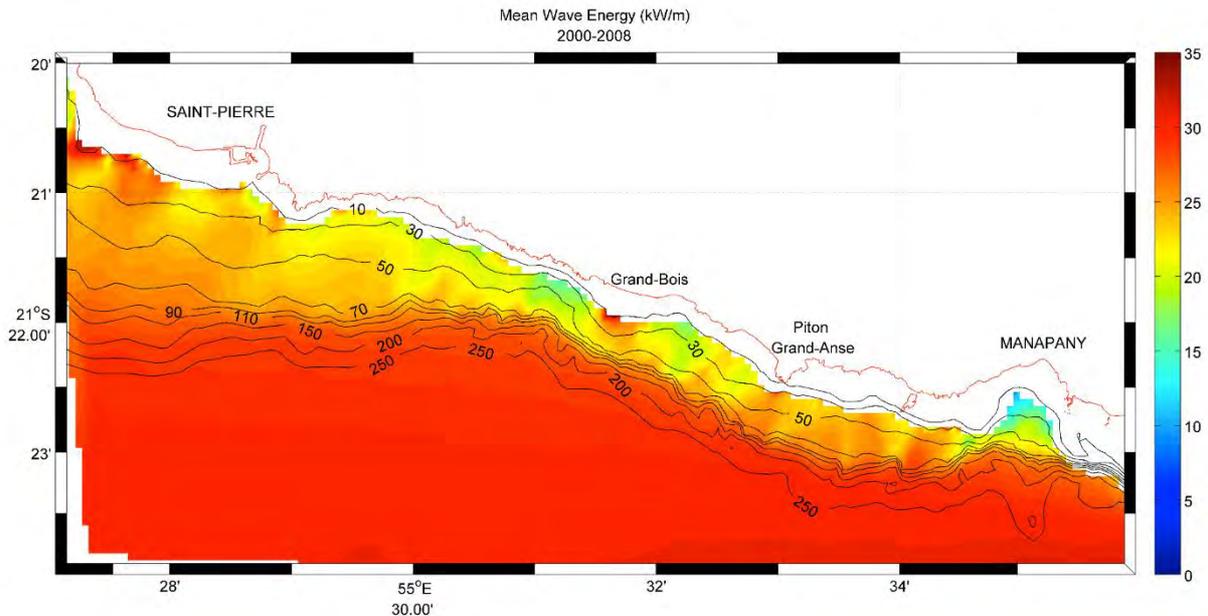


Figure 104 : puissance annuelle moyenne de la houle entre Saint-Pierre et Manapany. Modèle de propagation numérique à la côte Nérée. Source : Nérée 2010.

On note sur la carte ci-dessus que les zones les plus énergétiques se situent à Pierrefonds (zone d'ailleurs choisie pour le projet « Houle australe » de technologie CETO) et à Grand Bois.

L'étude EDF EN de 2009 a estimé le potentiel annuel moyen en deux sites, au Nord et au Sud de l'aéroport de **Pierrefonds**. Celui-ci est de 11,2 kW/m (site Nord, problème de réfraction de la houle) et de **17,4 kW/m** (site Sud retenu pour le prototype CETO, à 600 m de la côte et 25 m de fonds).

Enfin, le potentiel énergétique de la houle peut aussi être **estimé à partir des résultats du modèle HYDRORUN**. Une base d'archives de 10 ans de données d'état de mer a été compilée pour le modèle de houle HYDRORUN. Ce modèle dont l'emprise initiale est régionale (englobe l'Ile Maurice) exploite le code spectral d'états de mer Wavewatch 3 construit sur un maillage triangulaire, forcé par les champs de vent WRF et le modèle global

<sup>29</sup> Le potentiel du site de Vincenzo est cette fois calculé sur la période 2000-2009.

G05 (projet Iowaga). Le modèle est ensuite calibré à partir des mesures des bouées du réseau Candhis. La taille des mailles du modèle varie d'environ 400 m à 2 km, en se resserrant à l'approche des côtes.

La puissance linéique a été calculée par la SPL Energie Réunion en chaque point du modèle HYDRORUN d'après la formule  $P = 0,42.T.Hs^2$  avec T la période moyenne annuelle et Hs la hauteur significative moyenne annuelle. Le fichier raster est généré par interpolation des points du modèle. La carte produite est présentée page suivante.

On observe une **cohérence entre les différentes études réalisées**, avec globalement un potentiel annuel moyen supérieur à 15 kW/m sur la façade Sud de l'île, et un potentiel bien plus faible, de l'ordre de 5 kW/m sur la façade Nord. On peut noter que le potentiel des façades Ouest et Est a été moins étudié.

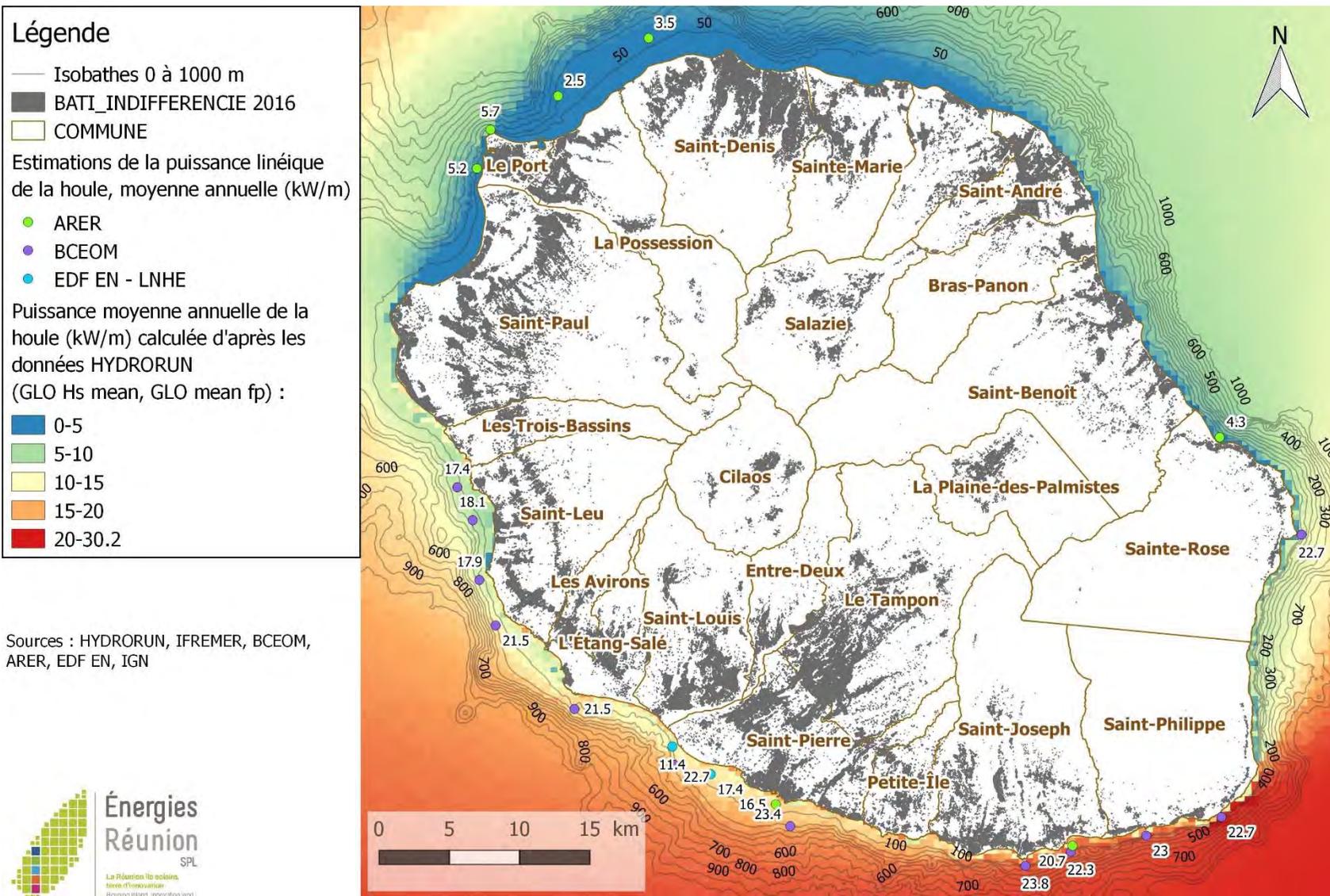


Figure 105 : puissance linéique (kW/m) de la houle en moyenne annuelle d'après les données Hydrorun (10 ans d'archives) et les études ARER, BCEOM et EDF EN.

### c) Des courants marins à priori trop faibles pour l'hydrolien

Le précédent SREMER de 2009 avait identifié les zones propices suivantes, connues par les usagers pour leurs courants dangereux :

- La Baie de Saint-Paul (-20 à - 50 m de fond) ;
- Le platier de Saint-Gilles qui s'étend du Cap La Houssaye à la Saline les Bains, derrière la Réserve Naturelle Marine (-50 à - 100 m de fond) ;
- Grande-Anse (-20 à - 50 m de fond) ;
- De l'embouchure de la Rivière des Remparts à celle de la Rivière Langevin (-20 à - 50 m de fond) ;
- Platier de Piton Sainte-Rose (-20 à -50 m de fond).

Pour les 2 premiers sites, l'étude courantologique menée en 2009 en baie de Saint-Paul, Cap La Houssaye et passe de l'Hermitage par 40 m de fond a démontré que **les vitesses et fréquences de courants étaient bien plus faibles qu'escompté** (seulement 10% des courants compris entre 1 et 1,5 m/s à la Passe de l'Hermitage) et ne permettaient pas l'implantation d'hydroliennes.

**Les résultats du projet HYDRORUN de l'IFREMER viennent appuyer ce constat défavorable.** Le modèle local mis en œuvre a calculé, sur une période d'un an (année 2006), les vitesses et direction de courant autour de la Réunion selon une maille de 100 m de côté et sur 30 niveaux de profondeur en chaque point. Le modèle est calibré en fonction des résultats de mesures réalisées sur la même période, pour la plupart issues d'études d'émissaires de stations d'épurations.

Ainsi, les vitesses maximales annuelles et trimestrielles des courants barotropes (moyennés sur toute la hauteur de la colonne d'eau) ou des courants de surface issues du modèle HYDRORUN ne dépassent pas 1 m/s.

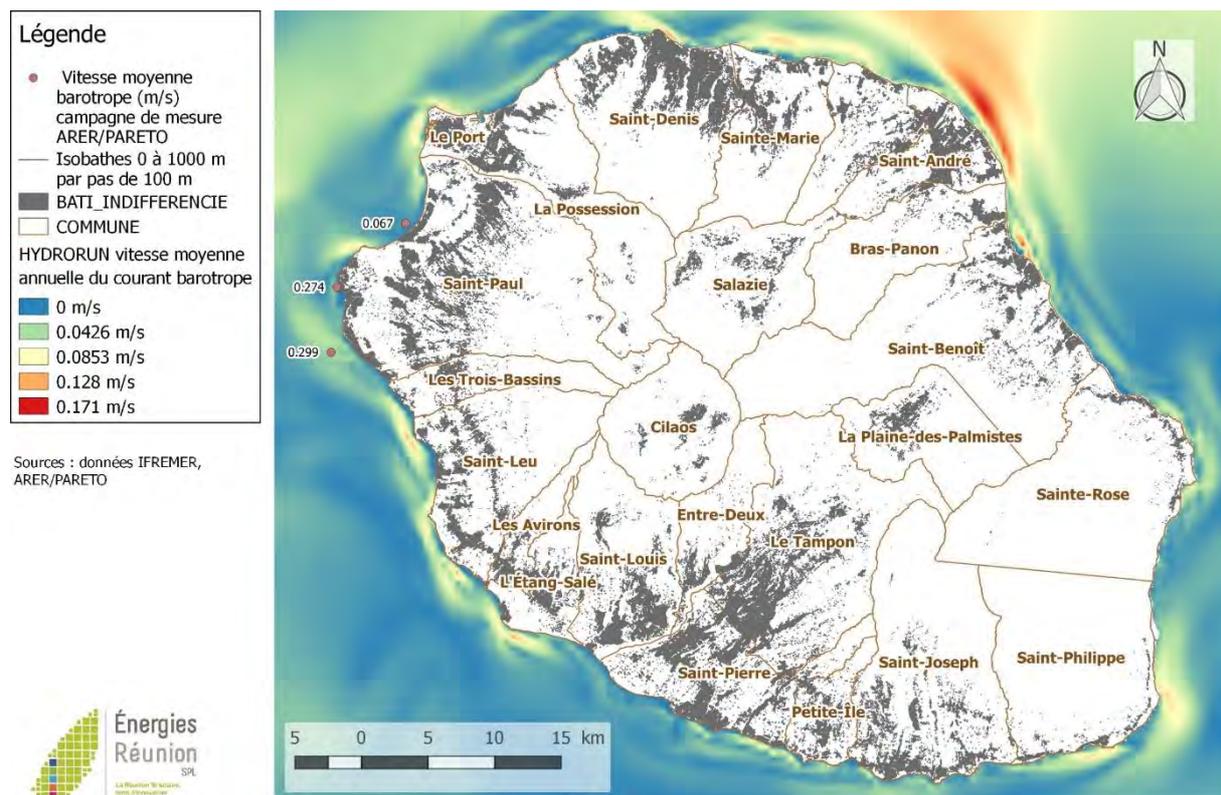


Figure 106 : vitesse moyenne annuelle du courant barotrope autour de la Réunion. Source : Hydrorun

Toutefois, ces résultats sont à modérer par le fait que :

- Les données d'Hydrorun sont issues de modélisations numériques (et non de mesures sur site),
- La maille de 100 m (mais maille originale 450 m) ne permet pas d'apprécier les phénomènes locaux de plus petite échelle, notamment près des côtes,
- Les résultats d'Hydrorun sont donnés soit en surface, soit moyennés sur toute la colonne d'eau. Or les caractéristiques des courants peuvent varier avec la profondeur (exemple figure ci-dessous).

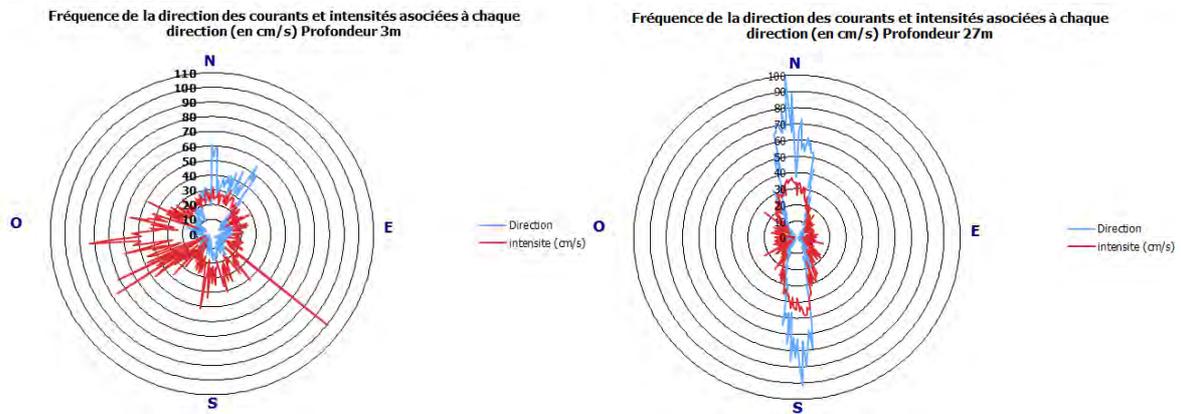


Figure 107 : répartition des directions et vitesses des courants marins par direction mesurée en 2009 dans la passe de l'Hermitage à deux profondeurs différentes (3 m et 27 m). Source : Pareto

Néanmoins, **le suivi météo-océanique réalisé à partir d'octobre 2014 pour le chantier de la Nouvelle Route du Littoral conforte les résultats du modèle HYDRORUN**. Deux bouées mesurent en continu la houle et le courant sur toute la profondeur de la colonne d'eau. Elles sont situées respectivement en baie de la Possession, par environ 20 m de fond et à 700 m de la côte (bouée RLS 503) et au large de Saint Denis, par environ 35 m de fond et à 1 km de la côte.

Les résultats des mesures courantologiques de l'année 2015 sont donnés ci-après. On constate que :

- Les courants moyens sont plus élevés en surface qu'au fond. On observe l'influence du vent : la bouée de Saint-Denis est plus exposée aux vents et aux houles d'alizés.
- A la Possession, les directions de courant sont parallèles à la côte et alternent de sens avec la marée, tandis qu'à Saint-Denis, les directions du courant sont dictées par les vents.
- Les vitesses maximales mesurées sont de 1,20 m/s à la Possession et de 1,25 m/s à Saint-Denis, en surface.
- A La Possession, en surface :
  - 74% des vitesses mesurées sont inférieures à 20 cm/s,
  - 95,5% des vitesses mesurées sont inférieures à 1 m/s.
- A Saint-Denis, en surface :
  - 50% des vitesses mesurées sont inférieures à 20 cm/s,
  - 99,6% des vitesses mesurées sont inférieures à 80 cm/s.

### Bouée RLS 503 : La Possession

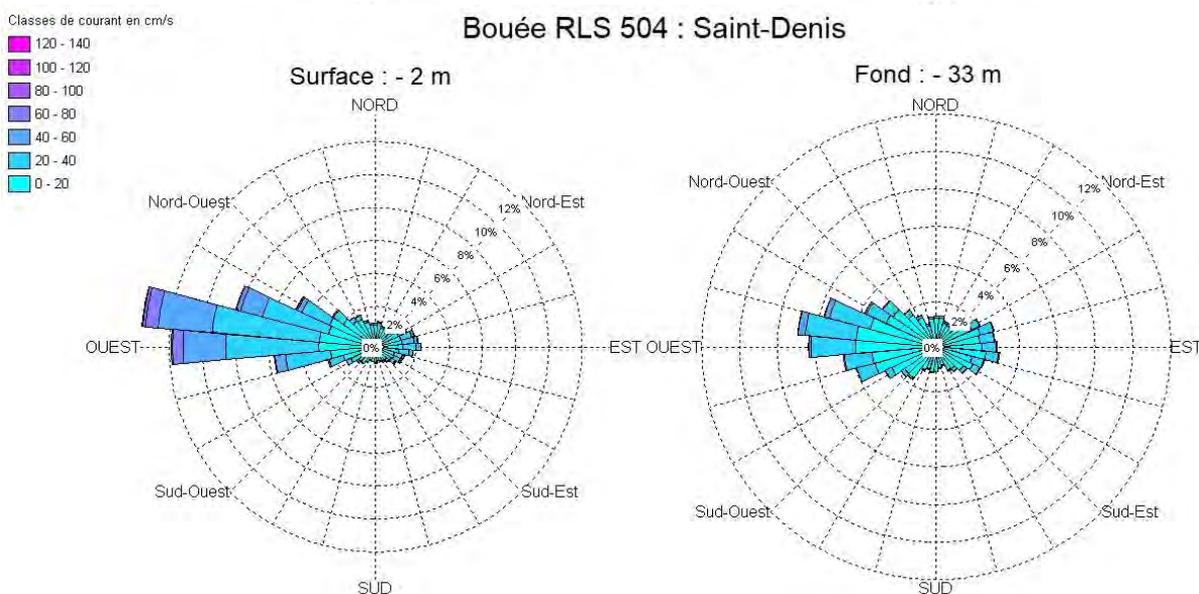
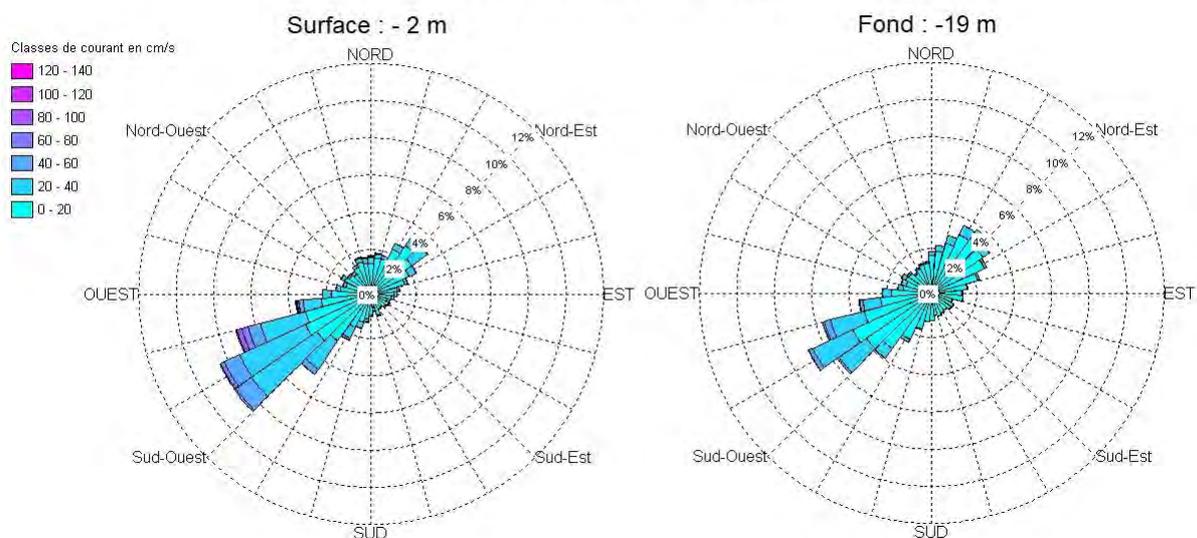


Figure 108 : roses des courants en surface et au fond à La Possession et au large de Saint-Denis de septembre 2014 à décembre 2015. Source : ARTELIA-iXSurvey, suivi du chantier de la Nouvelle Route du Littoral, 2016.

Le peu de données disponibles sur les courants marins à La Réunion laisse donc plutôt penser que les vitesses et fréquences de courants sur l'île ne sont **pas suffisantes pour constituer un potentiel significatif d'énergie valorisable à l'échelle du territoire et de ses besoins**. A une échelle plus fine, il existe peut-être des zones favorables, mais elles restent à identifier et à caractériser. Compte-tenu des nombreuses contraintes à considérer pour leur exploitation, on peut penser que ces zones éventuellement exploitables seraient probablement limitées en nombre.

#### d) Des marées de trop faible amplitude pour être exploitées

La marée à La Réunion est de type semi-diurne à inégalité diurne (deux pleines et basses mers par jour, dont les hauteurs peuvent être différentes). L'onde de marée arrive à La Réunion en provenance du Sud.

Les hauteurs d'eau minimales et maximales enregistrées sont respectivement de 0,02 m et 1,01 m pour les marées de mortes eaux et de vives eaux. En dehors de ces valeurs extrêmes, les marnages moyens à La Réunion sont compris entre 65 et 80 cm pour les vives eaux et entre 20 et 35 cm pour les mortes eaux. Cela classe la Réunion dans la catégorie des faibles marnages.

### e) Energie thermique des mers : un potentiel connu et reconnu

La bathymétrie de la Réunion est très favorable à l'exploitation de l'énergie thermique des mers. Les différents projets de SWAC et l'intérêt porté par Naval Energies (ex DCNS) à l'île le démontrent largement. Les zones propices suivant le critère distance à la côte de la ligne bathymétrique 1000 m sont listées ci-dessous, avec entre parenthèse la distance à la côte de la ressource en eau froide profonde :

- Le Port (4 km) ;
- Saint-Denis (4 à 5 km) ;
- Littoral Est de Bois-Rouge, Saint-André jusqu'à la ville de Sainte-Rose (2 à 5 km) ;
- Saint-Philippe (3 à 4 km) ;
- Saint-Joseph (environ 4 km) ;
- Saint-Pierre (7 km) ;
- Etang-Salé (4 km) ;
- Le Portail à Saint-Leu (3 km) ;

Les zones défavorables sont :

- Le plateau sous-marin prolongeant les falaises de la route du littoral ;
- Le plateau sous-marin qui s'étend de part et d'autre du Cap La Houssaye, de la baie de Saint-Paul jusqu'au Nord de la commune de Saint-Leu ;
- Le plateau sous-marin face à la pointe du Hazier, entre Sainte-Marie et Sainte-Suzanne ;
- Le prolongement en mer de l'enclos du volcan ;
- La commune de Petite-Ile, intégralement bordée de falaises littorales.

Il est difficile de quantifier la quantité d'énergie thermique des mers que l'on peut espérer exploiter sur l'île. Il faut déjà pour cela distinguer les 2 usages potentiels de l'eau froide profonde :

- **Production électrique** : la technologie n'est pas mature, on peut donc considérer :
  - **à court terme, un prototype de R&D de quelques centaines de kilowatts** tout au plus ;
  - **à moyen terme, une centrale pilote de 1 MW**. Les experts estiment qu'il faudrait atteindre une puissance de 100 MW pour atteindre un coût de l'énergie compétitif, mais qu'en contexte insulaire ce seuil pourrait baisser à 10 MW (Ikegami, 2015). Les centrales de 1 à 10 MW sont donc considérées comme des premières installations pilotes.
  - **à long terme, une centrale de plusieurs mégawatts** (5-20 MW).
- **Production de froid** : le frein réside moins dans la faisabilité technique que dans la capacité à convaincre les investisseurs à concrétiser un procédé innovant. Le gisement potentiel peut être estimé, au vu des études passées et des projets en cours, à :
  - SWAC du Centre Hospitalier Universitaire de Saint-Pierre : 6 MWf,
  - SWAC Nord du SIDEO, incluant entre autres le Centre Hospitalier Universitaire de Saint-Denis, la clinique Sainte-Clotilde, l'aéroport Rolland Garros et la zone d'activité aéroportuaire, la zone commerciale du Chaudron / Rivière des Pluies : 40 MWf,
  - Besoin en froid actuel de l'aéroport Rolland Garros seul : 3 MWf mais extension prévue pour 2022,
  - Besoin en froid estimé en 2008 par l'ARER pour les entrepôts frigorifiques du Port : 7 MWf,

Il s'agit de sites implantés à proximité d'une côte à bathymétrie plongeante, situés à proximité de la mer, à une altimétrie raisonnable, et concentrant un important besoin en froid. Le premier projet qui verra le jour sur l'un de ces sites devrait ouvrir la voie pour d'autres réalisations. Sur le long terme, l'évolution de l'urbanisation ou de l'industrie dans l'Est ou le Sud pourrait également s'accompagner, si le besoin est suffisant, du développement de SWAC.

### f) Un potentiel d'énergie osmotique certain, mais pour plus tard

Le potentiel à la Réunion existe, notamment à Sainte-Rose grâce à la présence combinée d'un rejet artificiel d'eau douce et d'eau de mer dans le port. Néanmoins, la technologie n'est pas encore assez mature pour envisager un développement de cette énergie, ni pour en estimer le potentiel.

**Légende :**

-  Communes
  -  Réserve Naturelle Marine
- Isobathes (m)

Différence de température  
de l'eau de mer entre la surface  
et le fond (en °C) :

-  ≤ 5
-  5 - 10
-  10 - 15
-  15 - 20
-  > 20

Sources : IFREMER - projet Hydrorun,  
IGN - BDTOPO, DEAL.

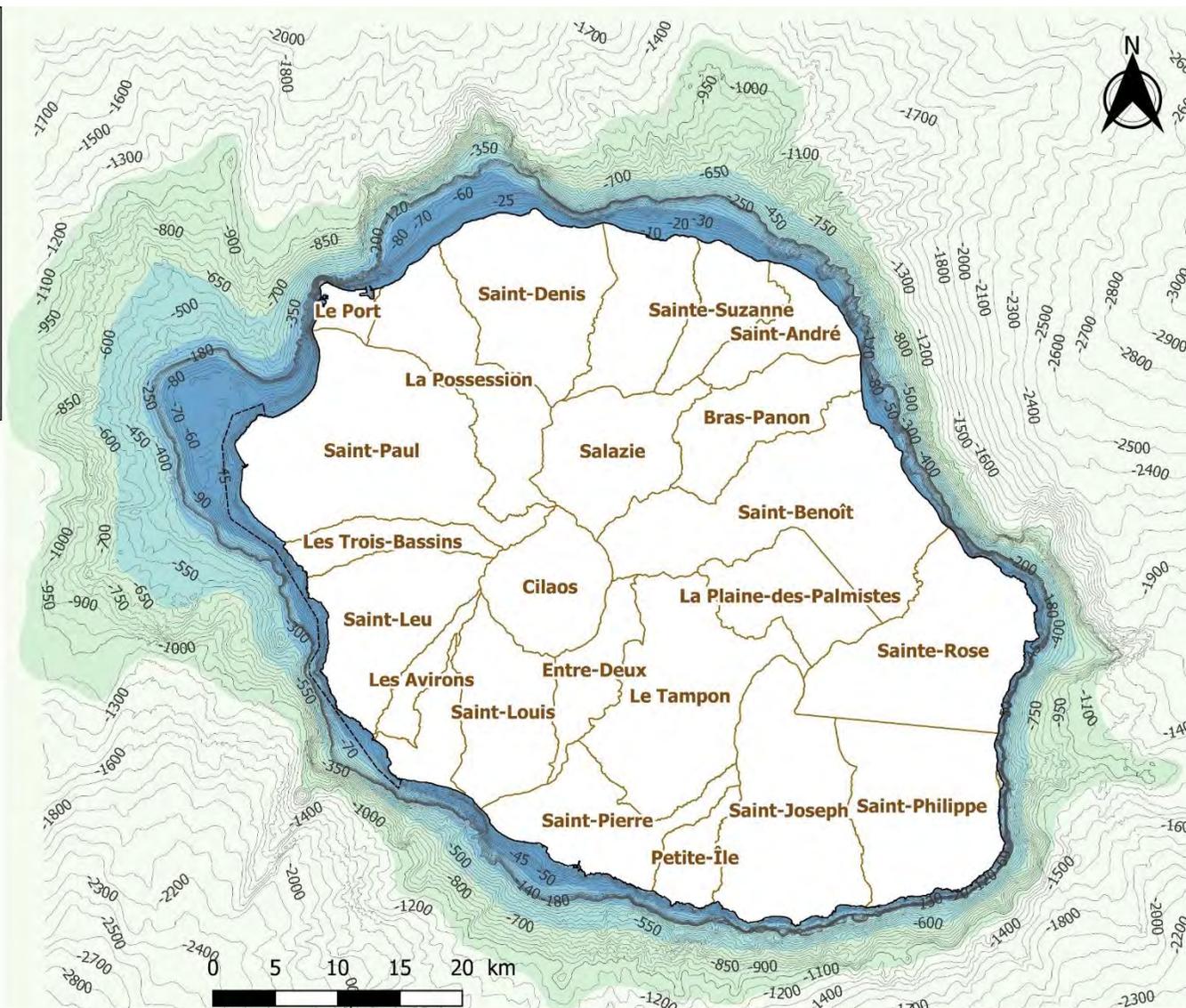


Figure 109 : gisement potentiel d'énergie thermique des mers pour de la production électrique : différence de température fond/surface en moyenne annuelle

### **g) Synthèse – gisement potentiel**

La Réunion présente un gisement potentiel intéressant pour l'éolien en mer, avec deux zones bien exposées au Nord et au Sud de l'île, pour le houlomoteur notamment sur la moitié Sud de l'île, et pour l'énergie thermique des mers sur la majeure partie de l'île (sauf au niveau du plateau sous-marin au large de Saint-Gilles).

L'énergie osmotique dispose d'un gisement probablement suffisant, mais la technologie n'est pas encore opérationnelle.

En revanche, le gisement est insuffisant pour exploiter l'énergie des courants marins ou de la marée.

### 1.3. Conclusion partie 1 : les pistes à creuser pour la Réunion

Les chapitres précédents ont permis de conclure que :

- La Réunion dispose d'un potentiel intéressant en matière d'énergie de la houle, d'éolien en mer et d'énergie thermique des mers,
- Le potentiel pour ces 3 types d'énergies est toutefois à modérer par des contraintes ou des freins spécifiques au territoire,
- L'énergie des courants marins n'est pas suffisante à la Réunion pour pouvoir être exploitée,
- L'énergie osmotique n'est pas envisageable, malgré un potentiel existant sur l'île, car les technologies ne sont pas matures.

Pour les 3 énergies qui se dégagent (houle, éolien en mer et énergie thermique), le présent chapitre se propose d'effectuer une analyse plus fine de ces filières potentielles en fonction des caractéristiques du territoire identifiées au chapitre 1.1.

#### 1.3.1. Energie de la houle : de nouveaux concepts pour relancer la filière ?

L'état de l'art effectué au chapitre 1.1 a révélé la grande diversité des systèmes inventés pour exploiter l'énergie de la houle. Parmi cette vaste palette de technologies, il s'agit d'identifier celles qui présentent le plus d'intérêt pour la Réunion. Une première sélection de systèmes houlomoteurs a donc été effectuée selon les critères suivants :

- Maturité de la technologie : le système doit être opérationnel, c'est-à-dire avoir au moins une expérience réussie de prototype en mer connecté au réseau ;
- Possibilités d'implantations à la Réunion : le système doit permettre une bonne intégration paysagère, être en adéquation avec la bathymétrie et pouvoir espérer résister aux conditions de mer locales ;
- Puissance développée significative : le système doit présenter un intérêt en termes d'approvisionnement électrique.

Cette sélection est disponible en Annexe 4. Ce qu'il faut en retenir est que :

- Certains systèmes houlomoteurs sont conçus pour être implantés sur le trait de côte, sur des côtes rocheuses basses. Cette option n'est pas retenue à la Réunion.
- D'autres s'intègrent sur des ouvrages côtiers : cette option semble la plus facile à mettre en œuvre à la Réunion.
- Enfin, le choix de systèmes à implanter en pleine mer est limité par la capacité d'accueil portuaire et les moyens de mise à l'eau disponibles à la Réunion.

Ces éléments sont développés ci-après.

#### a) Les systèmes implantés à terre sur une côte rocheuse basse

Les implantations sur un littoral naturel non aménagé concernent exclusivement les côtes rocheuses basses. Il s'agit en effet d'un support fixe (à l'inverse des plages de sable ou de galets) dont l'accès à la mer est aisé (à l'inverse des falaises). Les réalisations de ce type concernent principalement des systèmes à colonne d'eau oscillante, très volumineux notamment en hauteur (voir ci-dessous), ou des systèmes à bras oscillant ou à masse oscillante (plus rares néanmoins).



Figure 110 : systèmes à colonne d'eau oscillante : Shanwei, Province de Guangdong, Chine, 100 kW – île d'Islay, Ecosse, 500 kW (LIMPET) - île Pico, archipel des Açores, Portugal, 700 kW

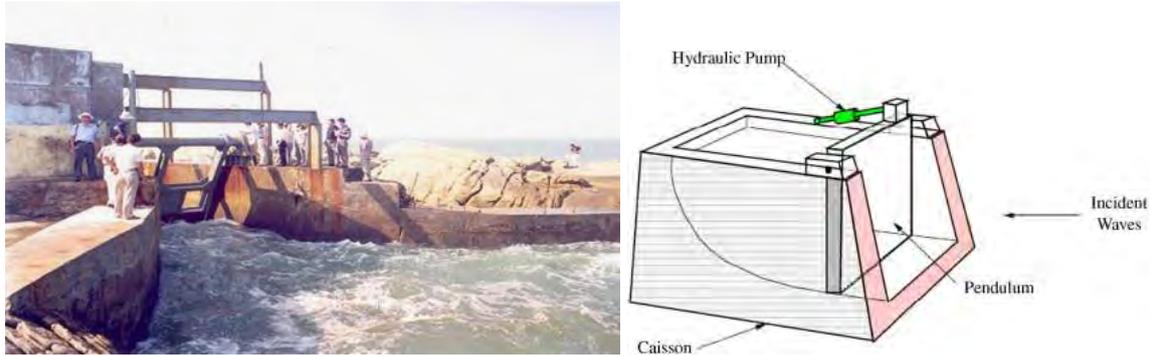


Figure 111 : système à bras oscillant sur l'île Daguan, province de Shandong, Chine - 100 kW – 2000 (Wang et al. 2011)

A la Réunion, les côtes rocheuses basses sont rares (12% du linéaire), qui plus est, elles sont toutes situées en Espace Naturel Remarquable du Littoral, sur des sites à fort enjeu paysager et touristique (Pointe au Sel, Le Gouffre, Marine de Vincendo, etc.). Par ailleurs, une partie de ces côtes rocheuses basses est constituée de pyroclastites, roches volcaniques friables qui s'érodent rapidement et déstabilisent les formations. Leur aptitude à recevoir des ouvrages serait donc à étudier au cas par cas.

Pour ces raisons, paysagères et géotechniques, ces solutions ne sont pas jugées adaptées à la Réunion.

#### b) Systèmes intégrés à un ouvrage côtier

Les systèmes houlomoteurs à colonne d'eau oscillante ou à flotteur sur bras articulé peuvent aussi s'implanter au sein d'ouvrages côtier : digues de protection, quais, pontons, jetées etc.



Figure 112 : système "Eco wave power" de 10 kW au port de Gibraltar (Espagne) à gauche, à droite autre système du même type de 50 kW installé en 2012 par l'Université de Rio de Janeiro au port de Pecem (Brésil)

Lorsqu'ils s'implantent sur des ouvrages existants, ces systèmes houlomoteurs n'impliquent aucune emprise supplémentaire sur les fonds marins. Leur impact paysager est faible à modéré, ils s'insèrent bien dans un environnement portuaire. Les systèmes existants actuellement présentent un rapport encombrement / puissance moyennement intéressant, mais ceci pourrait évoluer dans les années à venir.

Actuellement, la Corée du Sud et l'Italie sont deux pays assez actifs dans le domaine.

**L'Italie** possède deux réalisations, l'une dans une des digues en enrochements du port de Naples, l'autre dans les digues en caissons du port de Rome, Civitavecchia. Situés dans des zones peu énergétiques (< 5 kW/ml), le contexte de ces sites est à rapprocher des sites portuaires du Nord de la Réunion.

**En Corée du Sud**, l'Etat finance un important programme, mené par le KRISO<sup>30</sup>, sur la période 2016-2020, dont l'objectif est la mise en service d'un démonstrateur en 2020 d'un système houlomoteur à colonne d'eau oscillante intégré à un corps de digue. Vu les avancées très rapides faites par le pays dans le domaine des énergies marines, il est très probable que ce démonstrateur voit le jour.

Les conditions de conception – **milieu insulaire et zone cyclonique** – sont intéressantes vu les similitudes avec la Réunion.

*Figure 113 : concept de digue à système houlomoteur intégré développé par le KRISO dans le cadre de réseaux insulaires isolés et microgrid*



Il s'agit donc là de **solutions techniques intéressantes pour la Réunion** dont l'intégration dans les infrastructures existantes ou futures est à réfléchir.

### c) Les systèmes en mer

Ils se distinguent entre eux par leur profondeur d'implantation, et par conséquent, par leur distance à la côte. Dans l'ensemble, la plupart sont déployés dans des profondeurs de 30 à 50 m. A la Réunion où les fonds plongent rapidement, ils seraient donc implantés plus près des côtes que sur les sites choisis en Europe ou en Asie, ce qui présente l'avantage de réduire les coûts de raccordement électrique.

Certains systèmes nous paraissent prometteurs. **Leur faisabilité d'implantation à la Réunion mériterait d'être étudiée.** En particulier, il s'agirait d'identifier des sites potentiels susceptibles de les accueillir, de réfléchir aux conditions d'acheminement et de manutention à la Réunion ou encore de vérifier leur résistance aux conditions cycloniques.

<sup>30</sup> KRISO : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

### 1.3.2. Energie éolienne en mer : envisageable mais sous conditions

On peut identifier 3 grands freins au développement de l'éolien en mer à la Réunion :

- La maturité des technologies d'éolien flottant,
- Les conflits d'usages potentiels avec la pêche,
- L'impact d'un parc sur les oiseaux marins de l'île.

Sur la **maturité technologique**, notamment l'adaptation aux conditions cycloniques et l'implantation en zones profondes (> 100 m), on sait que cela n'est qu'une question de temps (une ou plusieurs dizaines d'années suivant les avis) pour que cette barrière soit levée.

Sur **les conflits d'usage avec la pêche**, des études plus approfondies seront à mener. Une analyse socio-économique fine de la filière pêche et des zones d'implantation visées doit permettre d'estimer les impacts bruts d'un parc sur la filière, de les réduire grâce à l'adaptation de certains éléments du projet, et enfin d'en compenser les impacts observés. Sur les parcs existants ou en projet en Europe, on peut citer à titre d'exemple, de façon non exhaustive, les mesures suivantes :

- Maintien de la pêche ou de certains types de pêche au sein du parc en exploitation. La décision finale d'autorisation de la pêche à la Réunion reste néanmoins du ressort de la DMSOI qui statuera en fonction de la sécurité de la navigation.
- Adaptation des profondeurs d'ensouillage des câbles (jusqu'à 2 m) pour permettre la pêche aux arts trainants sans risque d'accrochage,
- Augmentation des distances inter-éoliennes pour améliorer la sécurité de la navigation,
- Evitement de certaines zones de pêche majeures au sein du parc éolien,
- Compensation financière des pertes engendrées par la phase de construction et par la réduction des zones de pêche en phase d'exploitation,
- Création d'un fond de garantie pour aider l'investissement des pêcheurs,
- Accompagnement et achat du matériel de sécurité supplémentaire pour la navigation dans le parc,
- Soutien à la filière via le versement d'une part de la taxe éolienne aux Comités de Pêche.

**Sur les oiseaux marins**, des études devront être menées afin d'évaluer les incidences potentielles de cette filière.

#### a) Les Puffins et Pétrels, des espèces à fort enjeux écologiques

La Réunion abrite plusieurs espèces d'oiseaux marins indigènes ou endémiques et protégés (cf Tableau 23 ci-après). Toutes les zones identifiées pour l'éolien flottant se situent dans des corridors de vol d'espèces d'oiseaux marins indigènes ou endémiques et protégés.

Les préoccupations les plus fortes concernent les puffins et pétrels, espèces qui effectuent des trajets nocturnes réguliers entre les zones d'altitude au cœur de l'île (où se situent les terriers où ils nichent) et l'océan. Ces espèces sont exposées à de multiples pressions : réduction d'habitat, prédation par les rats et les chats au niveau des terriers, échouage dû à la pollution lumineuse lors de la traversée des zones urbanisées, risques de collision avec les obstacles situés dans leurs corridors de vols, etc. Leur attirance naturelle vers la lumière de nuit, leur comportement nocturne, leur incapacité à décoller du sol (il leur faut être en mer ou décoller d'une falaise), ainsi que leur faible taux de reproduction (1 seul œuf par couple) en font des espèces particulièrement vulnérables aux pressions de l'Homme.

Tableau 23 : Oiseaux marins protégés à la Réunion. Source : SEOR.

Nom commun	Nom scientifique	Endémicité	Statut UICN(*)	Protection	Lieux de nidification
<b>Pétrel de Barau</b>	<i>Pterodroma barau</i>	Endémique Réunion	<b>EN</b>	Protégé	Falaises du centre de l'île (Piton des Neiges, Gros Morne, Grand Bénare)
<b>Pétrel Noir de Bourbon</b>	<i>Pseudobulweria aterrima</i>	Endémique Réunion	<b>CR</b>	Protégé	Hauts de Saint-Joseph, en falaises
<b>Puffin Tropical</b>	<i>Puffinus bailloni</i>	Indigène à la Réunion, distribution dans toute la zone pantropicale	LC	Protégé	Falaises de toute l'île
<b>Puffin du Pacifique</b>	<i>Ardenna pacifica</i>	Indigène à la Réunion, distribution Océans Indien et Pacifique	<b>NT</b>	Protégé	Falaises de Petite-Ile principalement
<b>Paille en queue</b>	<i>Phaethon lepturus</i>	Indigène à la Réunion, distribution dans toute la zone inter-tropicale	LC	Protégé	Falaises de toute l'île
<b>Noddi brun</b>	<i>Anous stolidus pileatus</i>	Indigène à la Réunion, distribution dans toute la zone inter-tropicale	LC	Protégé	Falaises littorales de Petite-Ile et Saint-Philippe

(\*) LC : Low Concern – Préoccupation mineure

NT : Near Threatened – Quasi menacée

EN : Endangered – En danger

CR : Critical Threat – Danger critique d'extinction

En particulier, le Pétrel Noir de Bourbon est **l'un des oiseaux marins les plus rares au monde**. Sa population est estimée à 50 couples maximum, d'après le nombre d'individus récupérés échoués au sol et sauvés par la SEOR. Longtemps tenu pour disparu, il a été redécouvert à la Réunion en 1970. L'emplacement de ses lieux de nidification est resté un mystère jusqu'à très récemment. Fin 2016, pour la toute première fois, un terrier de nidification a été découvert dans les Hauts de Saint-Joseph.



Figure 114 : Pétrel Noir de Bourbon échoué au sol (gauche), Pétrel de Barau en vol (milieu), Puffin du Pacifique dans un terrier en falaise (droite). Crédits : Martin RIETHMULLER, cellule LIFE+PETREL (Pétrels) et SEOR (Puffin)

Ainsi, l'implantation d'éoliennes en mer constituerait une **pression supplémentaire** qui viendrait se cumuler aux autres. Après avoir échappé à de nombreuses menaces lors de son trajet depuis le terrier à terre, l'oiseau arrivé en mer devrait en plus affronter le risque de collision avec un parc éolien, ou d'échouage à cause de l'attraction causée par le balisage lumineux. D'autres impacts plus subtils existent également, comme la fatigue supplémentaire causée par l'évitement du parc dans les trajectoires de déplacements, fatigue qui diminue les chances de survie.

## b) Des zones potentielles situées sur des corridors de vol d'oiseaux marins

De nombreuses études montrent que la côte Ouest de l'île est le secteur favorisé par les oiseaux marins (pétrels et puffins) pour leurs entrées/sorties sur l'île. C'est aussi là que se situent les zones potentielles pour de l'éolien en mer (Nord-Ouest et Sud-Ouest de l'île).

Les informations disponibles quant aux trajectoires de vol de ces oiseaux sont **récentes et partielles**. Deux exemples sont donnés ci-dessous à titre d'illustration. Pour estimer leur fréquentation en mer, au large, des investigations supplémentaires sont nécessaires.

Ci-dessous les flux d'oiseaux marins mesurés à terre, par mesure radar. On constate l'importance de l'embouchure des 3 cirques de l'île (Salazie, Mafate et Cilaos), et de la côte Ouest en général.

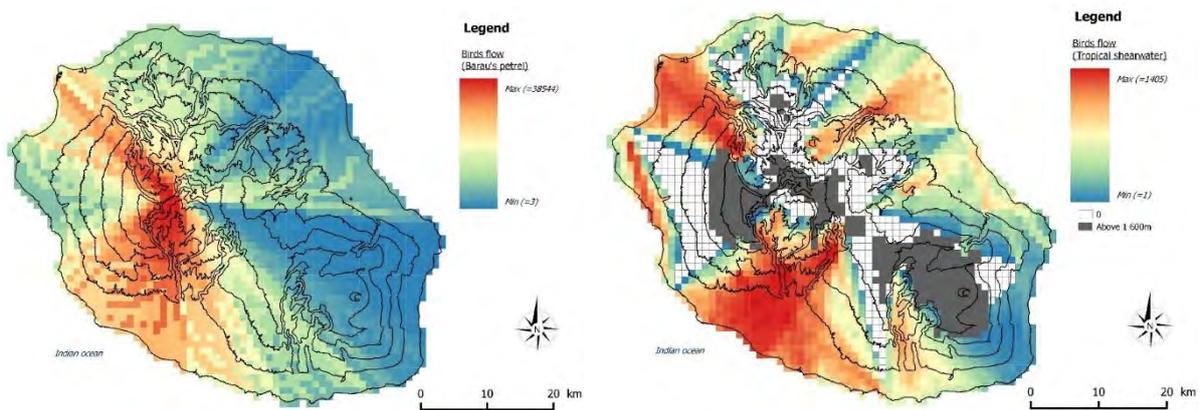


Figure 115 : Flux d'oiseaux marins sortants de l'île, déduits des données radar. Pétrel de Barau à gauche, Puffin du Pacifique à droite. Source : B. Gineste, 2016.

Ci-dessous les trajectoires des oiseaux d'une colonie du Sud-Ouest de l'île, mesurées par suivi GPS haute résolution. On constate que les oiseaux effectuent différents types de déplacements et qu'ils privilégient la zone Ouest dans les deux cas.

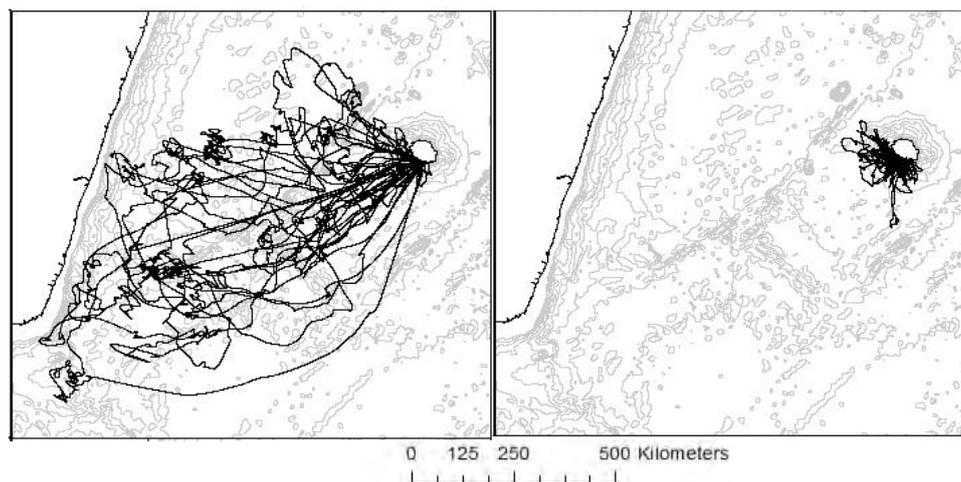


Figure 116 : Suivi GPS de Puffins du Pacifique de la colonie de Petite-Île. Trajets longs et trajets courts. Extrait du travail encore non publié de Danielle van Den Heever, Université de la Réunion, en collaboration avec Pierre Pistorius, Nelson Mandela University

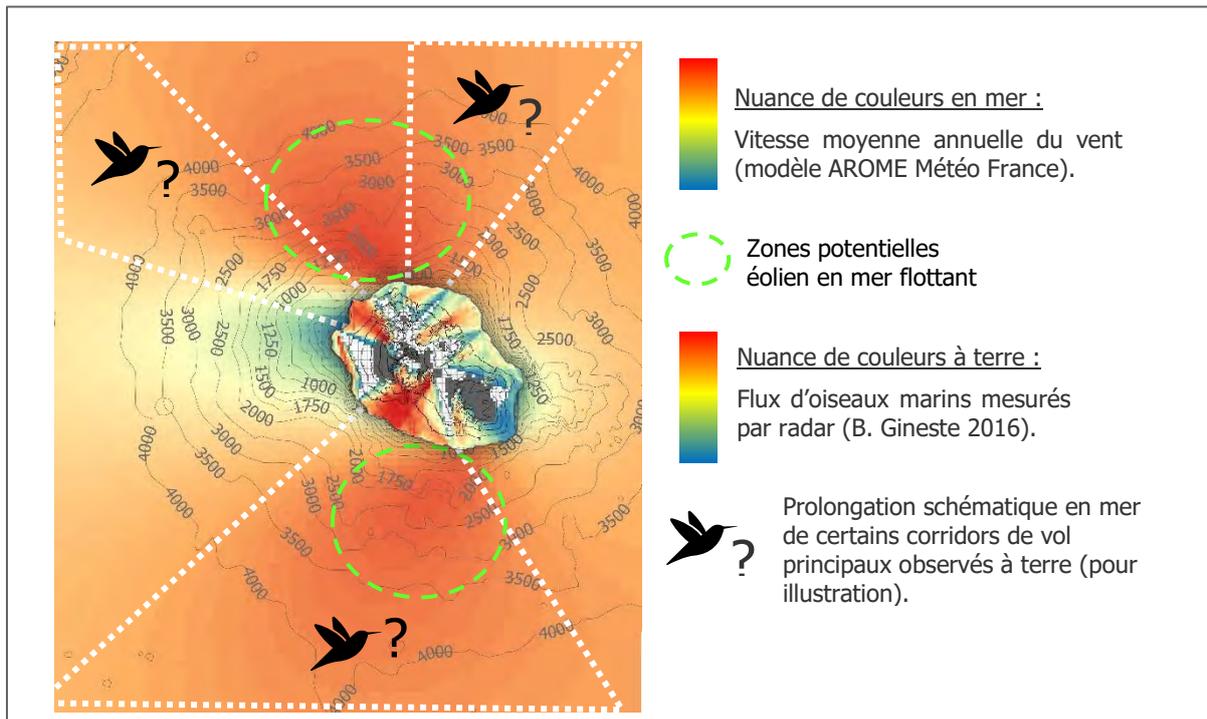


Figure 117 : superpositions potentielles entre enjeux biologiques liés aux oiseaux marins et enjeux énergétiques de l'éolien en mer. NB : ce schéma est illustratif, il n'a aucune valeur scientifique.

#### d) Un impact à quantifier

La question des trajectoires et hauteur de vol des oiseaux est cruciale pour évaluer précisément l'impact d'un parc éolien sur les populations. A ce sujet, la thèse de Benoit Gineste qui a effectué une première série de suivis radars à la Réunion constitue un élément d'éclairage majeur.

Néanmoins, **les connaissances actuelles sont insuffisantes pour statuer sur l'ampleur de l'impact.** En effet, il y a une très grande variabilité du comportement de vol des oiseaux et du flux. Les trajectoires et hauteur de vol varient selon l'espèce, l'âge de l'individu (adulte ou juvénile), la période de l'année (les adultes s'éloignent plus ou moins loin des côtes selon l'âge du poussin à nourrir), les conditions météorologiques (stratégies d'évitement des zones défavorables, prise d'altitude selon la couverture nuageuse et les thermiques, hauteur de vol plus haute si bonne visibilité, etc.). Les hauteurs de vol à terre et en mer sont différentes. En mer, elles sont moins bien connues, mais ces oiseaux volent vraisemblablement plus bas pour se déplacer et s'alimenter (plutôt dans une gamme 0-50 m), tandis qu'à l'approche des côtes il prend de l'altitude pour remonter vers les colonies. Les différentes études menées avec l'outil radar indiquent des variabilités de hauteurs de vol suivant la localisation des points d'échantillonnage et des espèces (puffins et pétrels). Sur le littoral, les hauteurs de vols sont les plus basses (bien que globalement supérieures à 150 m). Sur les pentes, les oiseaux prennent vite de la hauteur pour rejoindre les colonies.

Afin d'évaluer l'impact potentiel d'un parc éolien en mer sur ces populations d'oiseaux marins, il faut donc, dans un premier temps, **mieux connaître l'activité de vol des oiseaux dans les secteurs à priori propices à l'implantation de parcs.** Ce type d'étude est basée sur du suivi radar offshore. En milieu tropical, et en particulier dans l'océan Indien, cette méthode est encore peu développée, et devra être optimisée (cas des embruns masquant l'imagerie radar à faible altitude). On peut toutefois s'en affranchir si on place l'instrument suffisamment haut (mâts de mesure). La **Région Réunion ou l'Etat** pourraient lancer cette étude de manière à lever les incertitudes sur la filière et ouvrir la porte aux porteurs de projets.

Cette étude préalable servira de **point de départ aux analyses environnementales que les développeurs de projets devront mener par la suite.** Seront notamment nécessaires : des demandes de dérogation pour perturbation intentionnelle d'espèces protégées et une évaluation environnementale de l'impact du parc. Ces dossiers devront s'appuyer sur les éléments concrets de projet que seul le développeur est en mesure de fournir : caractéristiques précises d'implantation des turbines, hauteur et diamètre des éoliennes, balisage lumineux prévu, mesures de réduction des impacts, etc.

### 1.3.3. Energie thermique des mers : plus qu'une source d'énergie, un levier de développement à l'échelle d'un territoire

La bathymétrie de l'île de la Réunion est particulièrement favorable à l'exploitation de l'énergie thermique des mers. Les conditions de sa mise en œuvre restent néanmoins à étudier plus en détail afin d'évaluer les opportunités économiques qui permettraient de rentabiliser le coût d'installation des conduites.

S'agissant de **production électrique**, la technologie est très peu répandue dans le monde et une telle application ne peut se concevoir à court ou moyen terme qu'en tant que démonstrateur à visée de recherche et développement. S'il développe une puissance significative (1 MW), un tel projet peut constituer pour ses acteurs une étape charnière décisive dans la conquête des marchés d'approvisionnement des zones insulaires isolées.

S'agissant de **refroidissement urbain ou industriel**, l'effet d'échelle est prépondérant. Ce type de projet doit trouver le compromis entre besoin suffisamment grand pour justifier l'investissement initial et un réseau de consommateurs dont la taille ou le nombre ne soit pas trop complexe à gérer.

S'agissant des **coproduits**, leur intérêt est double : ils permettent de rentabiliser le coût d'installation des conduites et impulsent le développement d'activités économiques. Une étude de marché serait à réaliser pour analyser les conditions et opportunités d'implantation à la Réunion des différents modes d'exploitation commerciale de l'eau de mer profonde. En première approche, on peut dresser les orientations suivantes :

- **Pêche : à voir selon les spécificités du secteur de la pêche à la Réunion** en termes d'infrastructures de débarquement, de conditionnement et de transport des prises, et selon les destinations finales des produits de la pêche. En Asie, cette valorisation découle de la forte demande en produits de la mer que ce soit en local, en national ou à l'export, et d'exigences de qualité et de fraîcheur sans doute spécifiques au marché asiatique.
- **Aquaculture** : ce secteur nécessite de grandes surfaces planes en bord de mer, ce qui est rare à la Réunion à cause de la pression foncière de l'urbanisation et des surfaces cannières. Cela semble donc difficile à mettre en place sur l'île. Les cultures à forte valeur ajoutée permettant des volumes et/ou des surfaces de production plus faibles sont donc à privilégier, telles que :
  - Les **micro-algues**, secteur qui se développe à la Réunion avec la spiruline et la société Bioalgastral. Pour cette dernière, l'eau froide profonde permettrait de réguler la température des bassins et de diversifier les espèces proposées. Certaines souches d'algues d'eaux froides issues des Terres Australes et Antarctiques Françaises sont déjà valorisées en Chine (com. per. L. Blériot, 2017).
  - L'élevage d'espèces pour l'**aquariophilie**.
- **Agriculture** : la réduction des cycles de culture de l'**ananas** avec l'eau froide profonde serait intéressante, à condition que des surfaces suffisamment importantes soient disponibles près des côtes.
- **Thalasso et Spa** : ces activités de santé, beauté et bien-être pourraient tout à fait être développées ici. Elles seraient **à lier à une offre touristique adaptée**. Cette offre serait à définir pour la Réunion : dans le cadre d'un hôtel de luxe, en complément d'autres activités, à destination d'une clientèle locale ou étrangère ?
- **Santé - nutrition – beauté** : regroupe notamment les cures à base de compléments alimentaires ou à base d'eaux hypertoniques ou isotoniques, les produits de beauté et les produits de nutrition sport & santé tels que les eaux minérales en bouteille. Quelques producteurs français existent, utilisant notamment de l'eau pompée en Bretagne, mais ils ne concernent que de l'eau non profonde. Certains produits asiatiques sont distribués en Europe, mais sans doute de façon confidentielle. **Une étude de marché permettrait d'identifier les opportunités pour ce secteur qui semble en première approche plutôt porteur.**

### 1.3.4. Synthèse – énergies marines exploitables à la Réunion

Trois filières présentent un intérêt à la Réunion : l'énergie thermique des mers, l'éolien en mer flottant et l'énergie de la houle.

L'énergie thermique des mers représente un potentiel d'économies d'énergie significatif pour les gros consommateurs de froid. L'eau de mer profonde utilisée, avec ses nombreux usages économiques possibles, représente quant à elle un véritable levier de développement des territoires. Pour développer cette économie bleue, il est nécessaire de fédérer des acteurs aux profils très différents dans un projet commun. A une échelle plus modeste, l'eau profonde peut être utilisée comme un moyen d'améliorer la rentabilité d'un projet d'énergie thermique des mers (objectif opérationnel d'économies d'énergie sur la production de froid ou objectif d'innovation technologique sur la production d'électricité).

L'éolien en mer flottant est une filière naissante mais qui se développe rapidement. Son arrivée à la Réunion nécessite d'être soigneusement anticipée, que ce soit sur les infrastructures portuaires et industrielles ou sur les études environnementales (notamment oiseaux marins, pêche, cétacés).

Enfin, pour valoriser l'énergie de la houle qui frappe la Réunion, les projets devront être menés au cas par cas, chaque site d'implantation propice et chaque technologie présentant des spécificités propres. Les machines houlomotrices intégrées à une digue présentent l'avantage d'avoir des coûts mutualisables, mais elles sont moins facilement répliquables le long du littoral réunionnais que les machines installées en pleine mer, qui peuvent former des parcs.

## 2. Etude stratégique sur les EMR les plus intéressantes pour la Réunion

L'objectif de cette seconde partie est :

- De déterminer pour la Réunion des objectifs raisonnables de développement des énergies marines,
- D'élaborer la stratégie permettant d'atteindre ces objectifs.

### 2.1. Zones propices identifiées

Pour les 3 types d'énergies marines retenues (houle, éolien en mer, énergie thermique des mers), les zones propices de développement sont identifiées ci-dessous. **Ce repérage est donné à titre indicatif**, il n'exclut pas les possibilités de développement sur d'autres zones que celles identifiées ici.

#### 2.1.1. Eolien en mer flottant

L'éolien en mer requiert des vitesses moyennes de vent minimales de **7 à 8 m/s** à hauteur de moyeu (Schwartz et al. 2010 - Lu et al. 2009). D'après les données issues du modèle AROME de Météo France, ces vitesses moyennes annuelles se trouvent **au large de la Réunion, au Nord et au Sud de l'île**. En effet, le vent dominant (alizés d'Est) subit un effet d'accélération lors du contournement de l'île.

Outre le gisement en vent, les zones exploitables seront limitées par une distance maximale à la côte. Celle-ci impacte :

- Le coût de raccordement électrique. L'acceptabilité de ce coût, et donc la distance maximale, dépend de critères technico-économiques qui sont difficiles à anticiper : productible/taille du parc (effets d'échelle) et tarif de vente de l'électricité notamment.
- Le coût d'exploitation, lié à l'accessibilité du parc par la mer ou par les airs, et donc notamment de la distance au port le plus proche. Cette **distance maximale à un port** a été estimée à **40 km** (NREL, 2016).
- L'acceptabilité paysagère : France Energie éolienne préconise une **distance minimale de 10 km à la côte**, pour des contextes toutefois différents de celui de la Réunion (plateau continental). Pour autant, un projet plus proche de la côte mais présentant moins d'enjeu en termes d'acceptabilité pourrait, le cas échéant, avoir un intérêt.

Les parcs envisagés aujourd'hui par les développeurs d'éolien flottant pour des îles volcaniques jeunes similaires à la Réunion comme Hawaii sont situés **à 20-25 km des côtes et à environ 700 m de fonds**. Techniquement la **profondeur** n'est pas une limite, grâce aux techniques issues de l'offshore pétrolier, mais un optimum économique est à trouver.

En fonction des hypothèses prises, la taille des zones favorables peut énormément varier. Voici deux approches données à titre indicatif (voir figures page suivante) :

#### Approche majorante :

- 6,5 m/s minimum de vent moyen annuel,
- 40 km maximum d'un port,
- 2 ports potentiels : Le Port et Saint-Pierre,
- Servitudes aéroportuaires.

On obtient 2 zones potentielles situées entre entre -1000 m et -3000 m de fonds :

- L'une au Nord, de 1 800 km<sup>2</sup> environ,
- L'autre, au Sud, de 1700 km<sup>2</sup> environ.

Si l'on considère un ratio de 3 à 5 MW/km<sup>2</sup> (Musial 2013; Musial et al. 2013), on obtient un **potentiel brut de :**

- **5,4 GW à 9 GW au Nord,**
- **5,1 à 8,5 GW au Sud.**

#### Approche minorante :

- 6,5 m/s minimum de vent moyen annuel,
- 40 km maximum d'un port,
- 2 ports potentiels : Le Port et Saint-Pierre,
- Servitudes aéroportuaires,
- Profondeur maximale : -1000 m.

On obtient 1 zone potentielle au Nord, de 100 km<sup>2</sup>.

Si l'on considère un ratio de 3 à 5 MW/km<sup>2</sup> (Musial 2013; Musial et al. 2013), on obtient un **potentiel brut de 300 à 500 MW.**

Il s'agit bien sûr d'un **potentiel brut à affiner en fonction des contraintes** technico-économiques (ancrages, raccordement électrique, etc.) et environnementales (gisement éolien à caractériser par des mesures sur site, intégration environnementale, etc.).

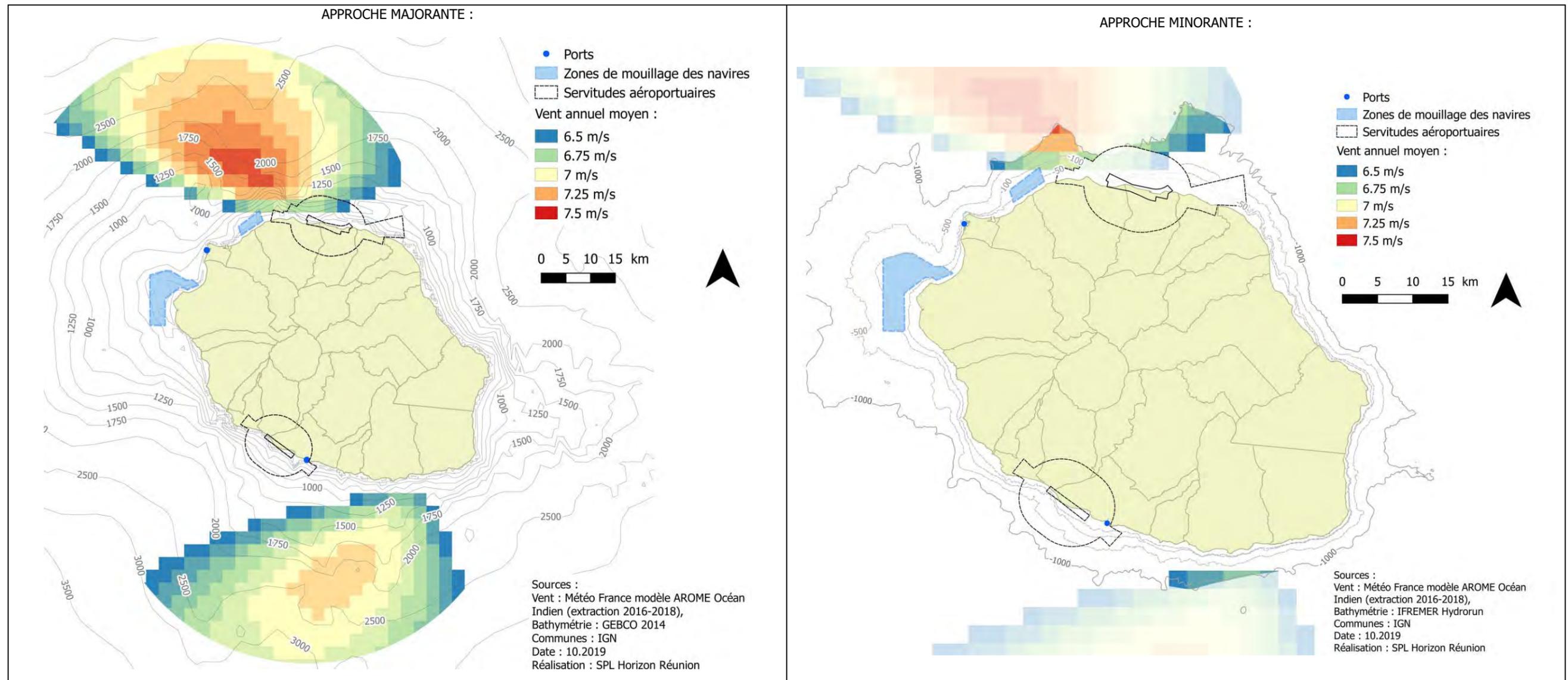


Figure 118 : carte des zones potentielles pour l'éolien en mer flottant

### Synthèse - zones propices éolien en mer flottant

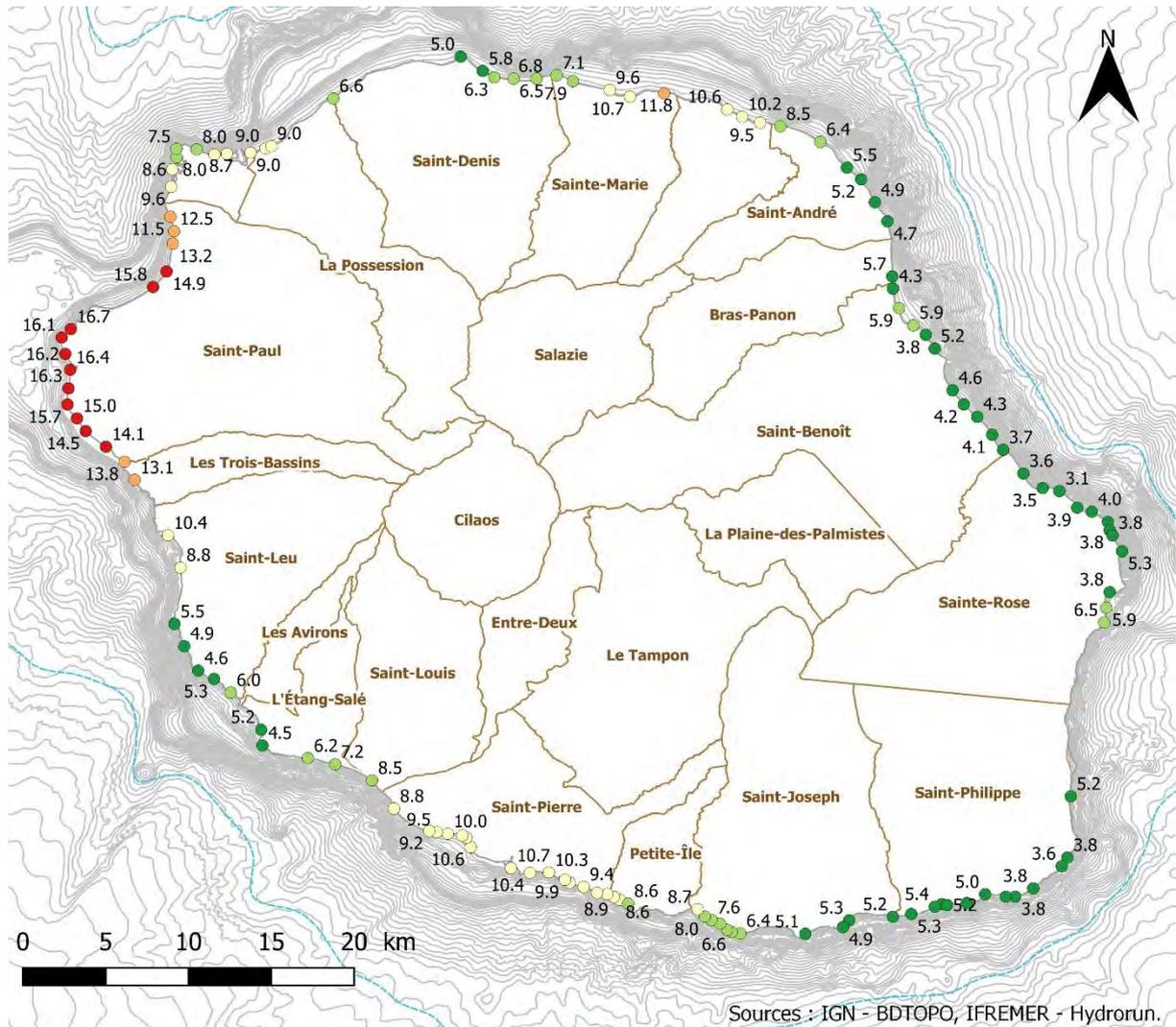
Il existerait deux zones favorables à l'éolien en mer flottant au large de la Réunion : l'une au Nord et l'autre au Sud. La zone Nord est la plus propice car d'une part, plus proche des infrastructures portuaires et d'autre part, le gisement y semble plus élevé. Ces zones présentent des vents moyens annuels supérieurs au égaux à 6,5 m/s. La taille des zones varie considérablement suivant les hypothèses techniques que l'on considère. La délimitation et le potentiel exact de ces zones devra être validé par des mesures sur site, les données actuelles étant issues de modèles.

### 2.1.2. Energie thermique des mers

La plupart des applications de valorisation de l'énergie thermique des mers (et d'eau de mer profonde) nécessitent une eau d'au **maximum 5°C**. A la Réunion, ces températures sont disponibles à environ 1200 m de profondeur.

Le coût de la conduite représente un investissement lourd, c'est le principal poste de dépense des équipements de valorisation de l'énergie thermique des mers. Sa longueur va donc être un facteur limitant.

A la Réunion, la masse d'eau profonde à 5°C se situe à des distances comprises **entre 3 et 10 km des côtes**, sauf à Saint-Paul où le Cap La Houssaye se prolonge par un plateau sous-marin.



#### Légende :

COMMUNE	Distance à la côte en km	8.6 - 11.3
Isobathes	de la masse d'eau à 5°C :	11.3 - 14.0
Ligne des 5°C au fond	3.1 - 5.9	14.0 - 16.7
	5.9 - 8.6	

Figure 119 : Distance la plus courte entre la côte et la masse d'eau à 5°C à la Réunion

Sur les sites de pompage d'eau profonde existants de par le monde, les longueurs de conduite installées varient en moyenne entre 2 et 5 km, pour des profondeurs de pompage variant pour la plupart entre 450 et 950 m de fond. La longueur maximale de conduite installée est de **18 km pour une profondeur de 1032 m** (équipements de la société Watervis Blue Co. Ltd à Gangwon, Corée du Sud).

Enfin, si l'on envisage une valorisation multi-usages de l'eau profonde à terre, avec un réseau de distribution d'eau, il faudra privilégier les zones planes de faible altimétrie. Dans le projet de climatisation marine de Saint-Denis / Sainte-Marie, le point le plus haut du réseau se situait à **60 m NGR** (hôpital Bellepierre).

Si l'on recoupe ces trois critères (température de l'eau, distance à la côte et altimétrie), on peut dessiner une carte des zones les plus propices à la valorisation de l'énergie thermique des mers. Les critères choisis ici sont les suivants :

- Température maximale de 5°C,
- Distance maximale à la côte de 12 km,
- Altitude maximale à terre de 60 m.

On obtient les zones de pompage potentielles en bleu ci-dessous, dont les températures sont comprises entre 2 et 5°C, et les zones terrestres en couleur ci-dessous, d'une altitude inférieure à 60 m NGR.

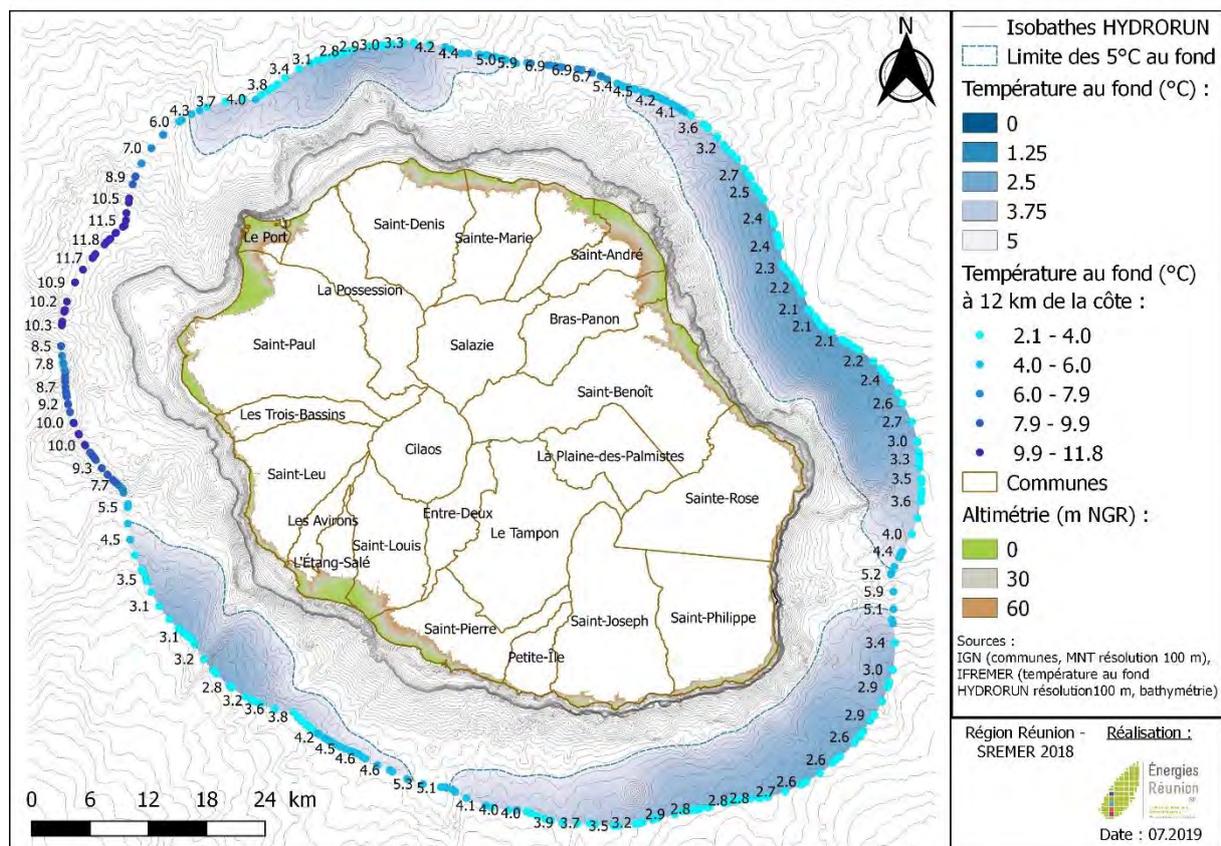


Figure 120 : carte des zones propices à l'énergie thermique des mers à la Réunion

Avec des seuils plus souples sur ces 2 conditions (température et distance à la côte de la masse d'eau) et en les combinant, on obtient une hiérarchisation spatiale du potentiel valorisable d'énergie thermique des mers autour de la Réunion (voir page suivante).

Cette carte a été obtenue par un travail d'analyse spatiale en logique floue sur SIG, dont la méthodologie détaillée et le principe sont décrits en Annexe 1. Elle combine deux conditions sur la partie maritime :

- la température, comprise en 3°C et 10°C avec un optimum à 5°C et une dégressivité linéaire de part et d'autre de cet optimum,
- la distance à la côte (linéaire de conduite à poser), avec une dégressivité linéaire de la côte jusqu'à la limite maximum imposée de 12 km.

Le résultat de cette combinaison est un chiffre compris entre 0 et 1, où 1 est la solution optimale (ici elle n'est pas atteinte puisqu'elle correspond à une température de 5°C à 0 km des côtes).

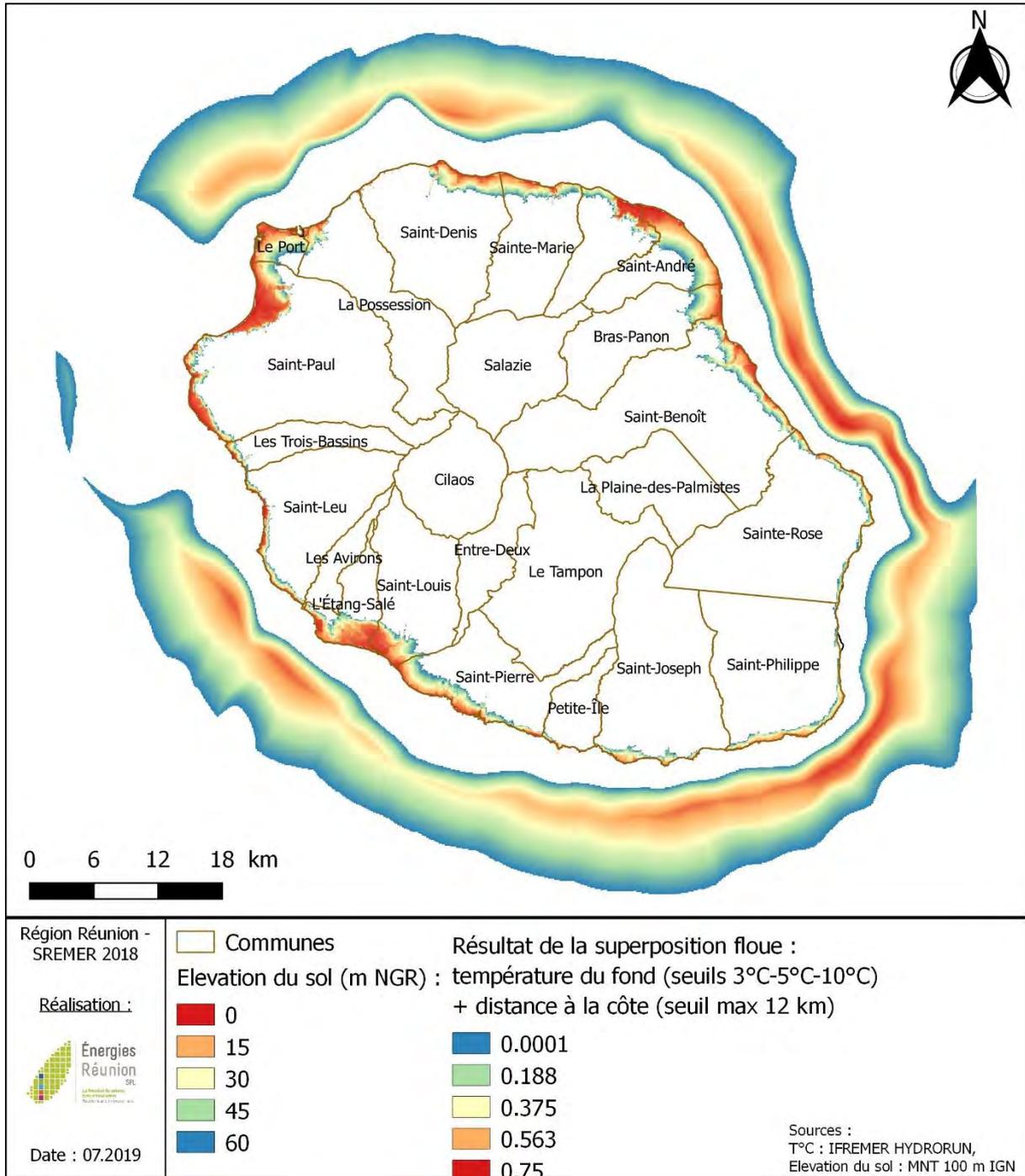


Figure 121 : hiérarchisation spatiale du potentiel valorisable d'énergie thermique des mers autour de la Réunion

### Synthèse - zones propices énergie thermique des mers

Presque toutes les communes littorales de l'île se situent à proximité accessible de la ressource que constitue l'eau de mer profonde. Ce sont les caractéristiques terrestres de chaque zone qui définiront les usages les plus adaptés de cette eau (production électrique, climatisation et production de froid, activités économiques). Parmi les critères en jeu : foncier disponible, pente des terrains, densité des besoins en froid, facilités d'atterrage.

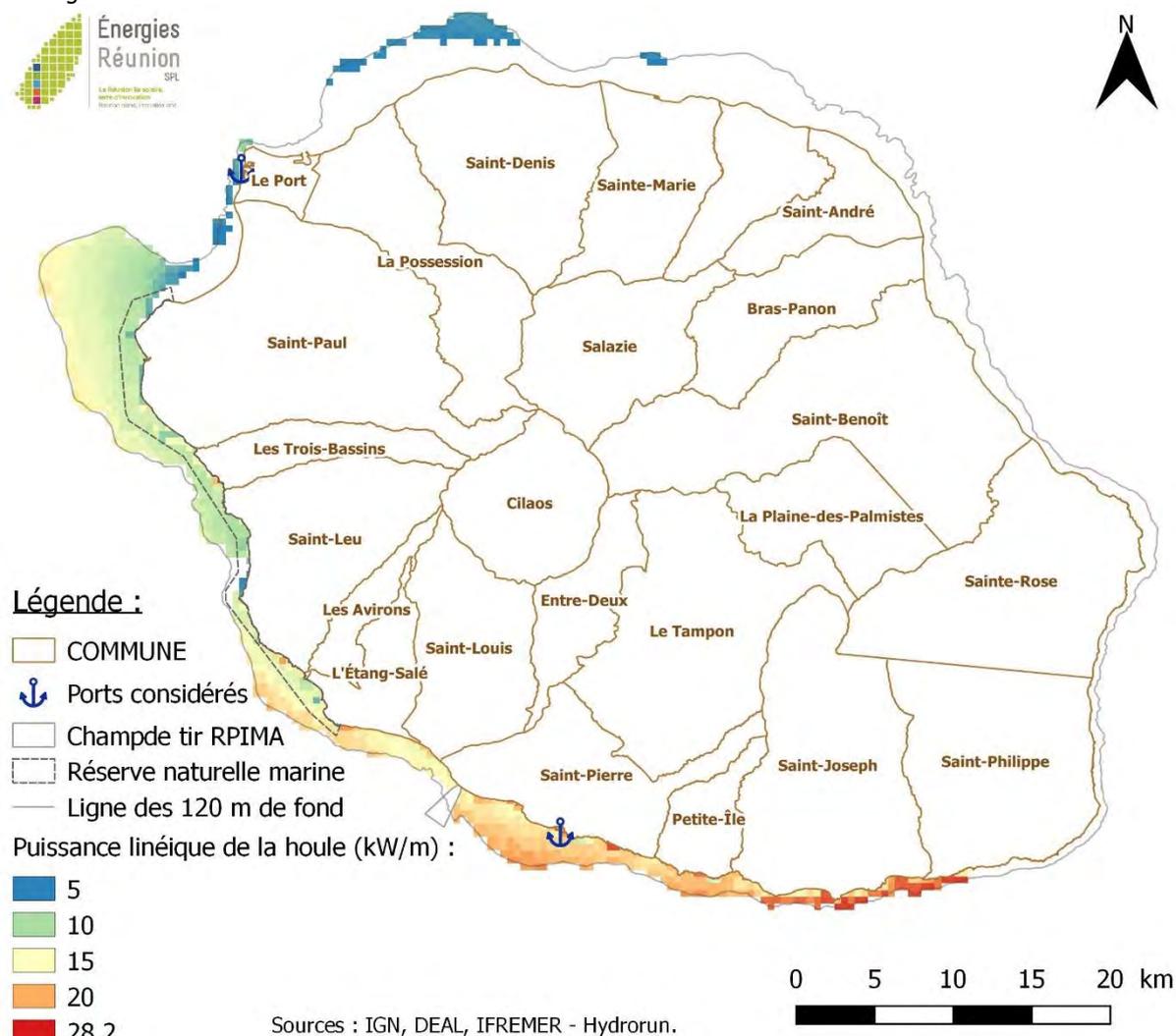
### 2.1.3. Energie de la houle

En dessous de 5 kW/ml, le potentiel énergétique de la houle est généralement considéré insuffisant pour être valorisée (Mørk et al, 2010). Les seuils d'exploitation peuvent varier entre 5-10-15-20 kW/ml selon l'échelle spatiale de l'analyse, l'échelle temporelle considérée (à long terme, on considère que la filière sera plus compétitive), et les possibilités de mutualisation de coût avec d'autres équipements.

Il existe une grande diversité de systèmes houlomoteurs, adaptés à différents contextes. Les critères et contraintes d'implantation peuvent donc beaucoup varier d'une technologie à l'autre. Par ailleurs, il s'agit ici d'une analyse régionale avec une résolution de 100 m sur les données de houle. Nous avons donc choisi des seuils volontairement bas, afin de ne pas éliminer trop de zones et afin de conserver ainsi des cartes visuellement parlantes. Par conséquent, il faut garder à l'esprit que ces cartes ont une visée indicative : les critères et zonages sont à affiner au cas par cas, en fonction du site et de la technologie.

#### a) Zones propices aux systèmes houlomoteurs implantés en pleine mer

Pour les machines installées en pleine mer, la cartographie des zones propices suivantes a pris en compte les critères suivants : une profondeur maximale de 120 m, une distance maximale des ports de 25 km et aucune limite sur le gisement de houle.



Cofinancé par le fonds européen pour les affaires maritimes et la pêche de l'Union européenne



Figure 122 : carte des zones propices à l'exploitation de la houle en pleine mer

Avec des seuils plus souples sur ces conditions (profondeur d'eau, distance aux ports et gisement énergétique) et en les combinant, on obtient une hiérarchisation spatiale des zones potentielles pour l'exploitation de l'énergie de la houle autour de la Réunion.

Cette carte a été obtenue par un travail d'analyse spatiale en logique floue sur SIG, dont la méthodologie détaillée et le principe sont décrits en Annexe 1.

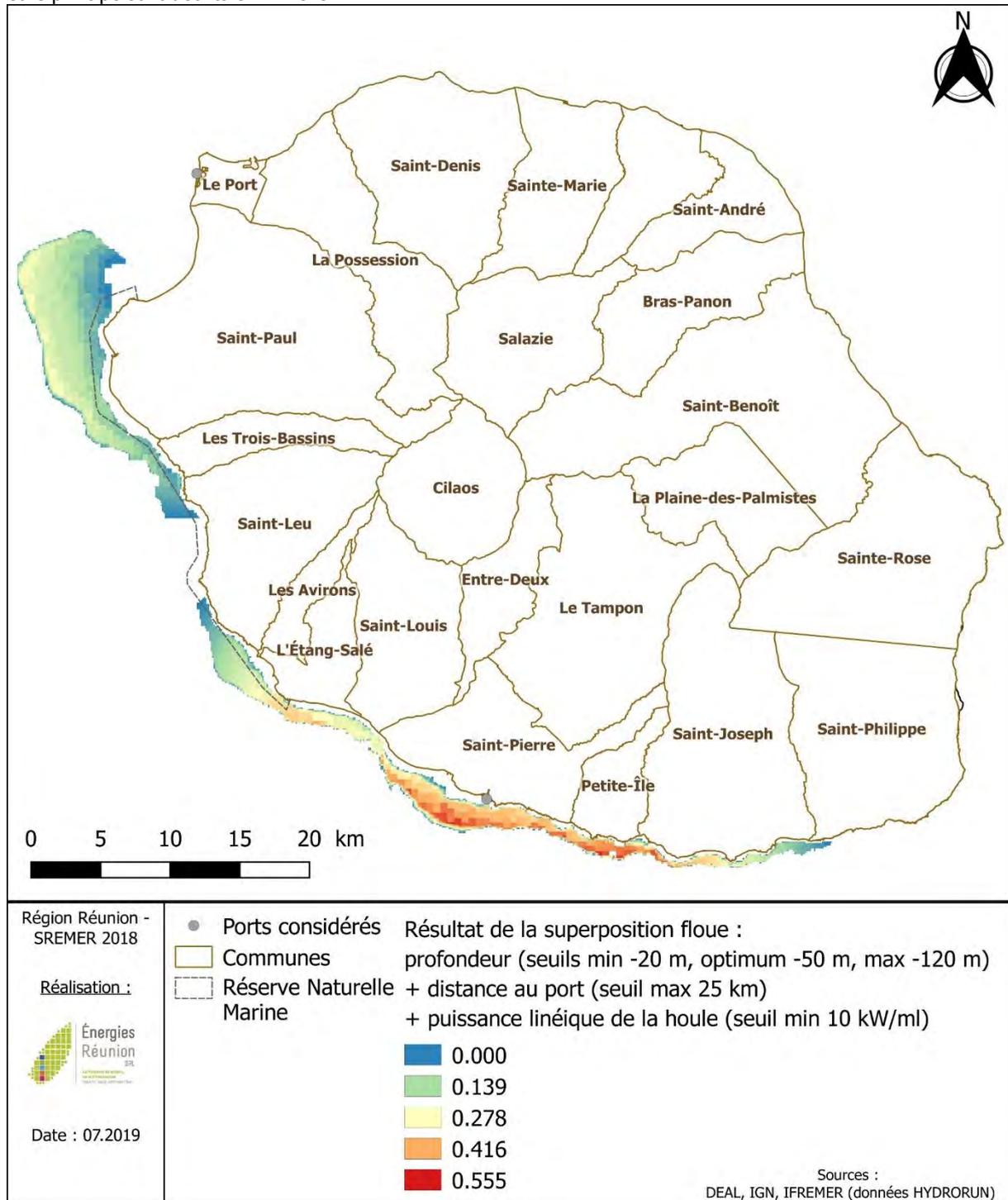


Figure 123 : hiérarchisation spatiale des zones potentielles pour l'exploitation de l'énergie de la houle autour de la Réunion

## b) Zones propices aux systèmes houlomoteurs implantés sur le trait de côte

Pour les machines installées sur le trait de côte, le nombre de sites potentiels est limité car le littoral est soit protégé, soit déjà urbanisé. Compte-tenu des enjeux paysagers et du volume généralement important des machines houlomotrices, l'implantation à terre sur des côtes rocheuses basses n'a pas été retenue dans ce zonage. Par conséquent, seules les zones du littoral déjà aménagées par des quais, digues, enrochements ou autres ouvrages côtiers ont été identifiées sur la carte ci-dessous. Le linéaire de digues de la route du littoral actuelle n'a pas été inclus car ces ouvrages seront abandonnés, et donc plus entretenus, une fois la Nouvelle Route du Littoral mise en service. En revanche les digues de la NRL sont incluses.

La réserve naturelle marine est indiquée à titre indicatif, elle ne constitue pas selon nous une contrainte rédhibitoire pour une implantation côtière sur des ouvrages portuaires existants.

Aucun seuil minimum de puissance n'a été imposé. En effet, il existe des réalisations de systèmes houlomoteurs intégrés sur des ouvrages côtiers dans des zones de potentiel inférieur ou égal à 5 kW/ml : Ecowavepower à Gibraltar, OBREC à Naples, REWEC3 à Rome, Wavestar au Danemark<sup>31</sup> (voir annexe 4).

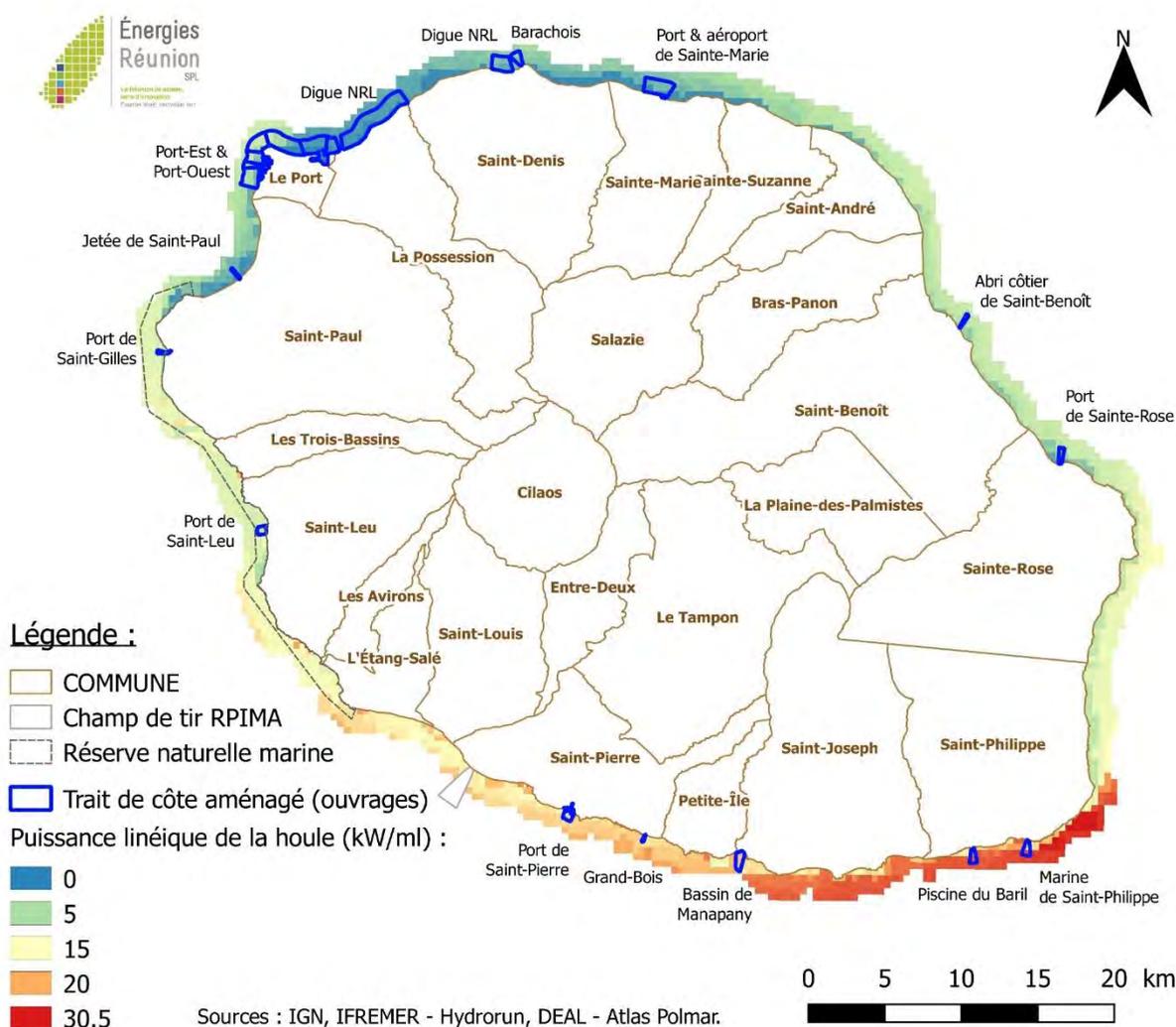


Figure 124 : carte des zones propices à l'exploitation de la houle à terre : sites d'implantation potentiels (en bleu) et gisement énergétique (affichage de la couche restreint autour de la bande côtière)

Le travail proposé ici est une 1<sup>ère</sup> approche sur le gisement qu'il conviendra d'affiner au cas par cas. La résolution des données et la nature des contraintes d'implantation nécessitent une analyse à une échelle plus fine.

<sup>31</sup> Sources : Cascajo et al, 2019 – Agencia Andaluza de la Energia 2009.

### c) Synthèse - zones propices énergie de la houle

Les zones propices pour l'implantation de machines houlomotrices implantées sur le trait de côte, dans des digues, ne peuvent pas être hiérarchisées à ce stade d'analyse. En effet ce type de valorisation nécessite des études au cas par cas avec des données plus approfondies.

Pour des machines situées en pleine mer, le croisement des conditions sur le gisement et les contraintes d'implantation dessinent une zone propice au niveau de Saint-Pierre / Petite-Ile, et dans une moindre mesure Etang-Salé. La localisation des projets houlomoteurs avortés PELAMIS et CETO confirme cette tendance. Le gisement se situe toutefois sur toute la moitié Sud de l'île, et il faut garder à l'esprit que les conclusions présentées ici dépendent d'un parti pris d'analyse.

## 2.2.Stratégie de développement

Au regard des critères balayés précédemment, à savoir :

- le gisement d'énergies marines disponibles à la Réunion,
- les zones propices accessibles identifiées,
- l'état de maturité technologique et commercial de la filière,
- le contexte spécifique de l'île,

le présent chapitre se propose d'identifier les axes de développement des énergies marines à la Réunion.

### 2.2.1. Analyse Forces/Faiblesses/Opportunités/Freins ou menaces

Dans cette analyse de type SWOT<sup>32</sup>, les points forts et les points faibles des énergies marines sont synthétisés dans une matrice en distinguant :

- ce qui relève de la filière des énergies marines (« facteurs internes ») ,
- et ce qui relève du contexte français et réunionnais (« facteurs externes »).

L'objectif étant d'identifier les limites de développement, les obstacles et les leviers possibles.

La matrice d'analyse SWOT est présentée page suivante, et sa synthèse figure ci-dessous :

### Synthèse des forces/faiblesses/opportunités/menaces

Les énergies marines présentent un intérêt élevé pour la Réunion en tant qu'énergies renouvelables, locales et plus prévisibles ou plus constantes que la pluie, le soleil ou le vent à terre. Ce sont également des leviers de développement économique potentiels. Les différents types d'énergies marines sont inégalement développés, et n'ont pas encore atteint un stade commercial et industriel mature.

Bien que la météo puisse beaucoup solliciter les équipements en mer, que le contexte environnemental soit parfois contraignant et que les politiques de l'énergies soient peu favorables aux énergies marines, ces éléments ne sont pas insurmontables.

Le gisement d'énergies marines à la Réunion a déjà attiré des industriels internationaux. Malgré sa petite taille, l'île possède une petite expérience en travaux maritimes y compris sur des projets d'énergies marines. De plus, des possibilités de synergies entre énergies marines et autres projets existent.

<sup>32</sup> SWOT : acronyme pour Strength (Forces) Weakness (Faiblesses) Opportunities (Opportunités) Threats (Menaces).

	+ Forces	- Faiblesses
<p><b>Facteurs internes aux énergies marines</b></p>	<p><u>Intérêt pour la production électrique de l'île :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Diversification du mix énergétique, avec un potentiel important de l'éolien en mer du fait de la ressource élevée et des puissances importantes,</li> <li>Contribution à l'indépendance énergétique,</li> <li>Réduction des consommations (climatisation et refroidissement avec l'énergie thermique des mers).</li> </ul> <p><u>Energies renouvelables :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Energie de base (énergie thermique des mers),</li> <li>Energie intermittente mais prévisible (houle &amp; vent).</li> </ul> <p><u>Industrie déjà développée (éolien en mer)</u></p> <p><u>Levier potentiel de développement économique des territoires</u>, à travers la construction et la maintenance industrielle, les activités supports maritimes, le rayonnement scientifique, les activités autour de l'eau froide profonde, le tourisme.</p>	<p><u>Machines pas toujours adaptées au contexte réunionnais</u>, en termes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>de transport et manutention sur site (moyens nautiques et portuaires limités en local),</li> <li>de résistance aux conditions de mer (houles australes et cyclones tropicaux).</li> </ul> <p><u>Fragilité économique des développeurs houlomoteurs</u> : profil de petites entreprises mono spécialisées, à faible durée de vie, aux concepts propres (peu de partage ou transmission).</p> <p><u>Éparpillement de la connaissance acquise après échec des projets</u> : pas de valorisation ultérieure possible pour la collectivité.</p> <p><u>Coût de l'énergie non compétitif</u>, notamment pour l'énergie thermique des mers en production électrique et pour l'énergie de la houle.</p>
<p><b>Facteurs externes aux énergies marines : spécificités Réunion &amp; France</b></p>	<p><u>Existence de projets ou ouvrages sur l'île offrant des possibilités de co-développement :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Energie thermique des mers et eau profonde,</li> <li>Ouvrages littoraux et systèmes houlomoteurs.</li> </ul> <p><u>Gisement d'énergies marines disponible :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Potentiel houlomoteur intéressant notamment sur la moitié Sud de l'île.</li> <li>Bathymétrie très favorable à l'énergie thermique des mers.</li> <li>Zones au large pour l'éolien en mer flottant.</li> </ul> <p><u>Territoire déjà connu de certains industriels à l'international.</u></p> <p><u>Expérience du territoire en grands travaux maritimes</u> avec le chantier de la Nouvelle Route du Littoral.</p>	<p><u>Conditions de mer</u> : cyclones tropicaux en été et houles australes en hiver.</p> <p><u>Eloignement insulaire</u> : délai et coût d'acheminement du matériel.</p> <p><u>Equipements portuaires et moyens nautiques restreints.</u></p> <p><u>Contraintes environnementales fortes</u> : Espaces Remarquables du Littoral, Réserve Naturelle Marine, espèces protégées, etc.</p> <p><u>Conditions tarifaires défavorables pour la revente d'électricité :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tarif d'achat trop faible (15 c€/kWh) pour l'électricité produite par la houle et texte inadapté (pensé pour l'hydraulique).</li> <li>Aucun tarif de rachat prévu pour l'énergie thermique des mers ou l'éolien en mer (principe des appels à projets ou appels d'offre). Conséquences : manque de visibilité pour les investisseurs et frein calendaire.</li> <li>Les Outre-Mer et leurs particularités ne sont pas ou peu pris en compte.</li> </ul>
	+ Opportunités	- Menaces / freins

### 2.2.3. Discussions thématiques et approfondissement

#### a) Synergies de développement avec d'autres projets

Certaines mutualisations de moyens ou d'ouvrages entre un projet d'énergie marine et un autre secteur d'activité sont envisageables, permettant ainsi de diminuer les coûts d'investissement ou d'exploitation. Par exemple :



#### *Mutualisation des moyens de mesure et de suivi*

Au-delà du partage des données déjà acquises de manière unilatérale, certaines campagnes en mer pour les énergies marines pourraient être partagées avec d'autres projets de recherche (océanographie, météorologie, écologie) lorsque les zones d'étude ou les thématiques se recoupent.

#### *Mutualisation d'ouvrages côtiers*

Pour le houlomoteur, en fonction de l'exposition du site et des caractéristiques de l'ouvrage, plusieurs solutions techniques existent :

- Sur **les nouveaux ouvrages à construire**, la palette de dispositifs houlomoteurs intégrables est plus grande. Plusieurs projets d'aménagement littoral mériteraient d'étudier cette option : la création d'une digue de protection pour la cale de mise à l'eau de Saint-Philippe porté par la CIVIS, la création d'un nouveau quai à Terre-Sainte pour le port de Saint-Pierre, le bassin de baignade du projet de réaménagement du Barachois de la CINOR.



Figure 125 : projet de bassin de baignade au Barachois (CINOR) et modèle de digue en caisson avec valorisation énergétique mise en place au port de Rome (wavenergy.it)

- Sur les **dignes de protection existantes à carapace en blocs** de hauteur conséquente (> 4 m), comme celles des digues en tétrapodes de la NRL, des digues en BCR du port de Sainte-Marie et de l'aéroport Rolland Garros, des digues du port de Saint-Pierre, il est possible de rajouter un système houlomoteur à déversement, comme cela a été fait sur une digue du port de Naples (voir photo ci-dessous et Annexe 4). D'autres solutions sont aussi envisageables (flotteur sur bras oscillant).



Figure 126 : digues en Blocs Cubiques Rainurés du port de Sainte-Marie (Conservatoire du Littoral) et système houlomoteur ajouté sur la digue du port de Naples (Contestabile et al. 2016)

- Sur les **digues en enrochement** plus petites comme celles des ports de Saint-Gilles-les-bains et de Saint-Leu, il faudra privilégier des systèmes plus compacts et qui n'impactent pas les zones coralliennes devant les digues. Les systèmes à flotteurs avec dispositif de conversion à terre s'y prêtent bien (cf ci-dessous).



Figure 127 : système coréen InWave (Source : Ingine) port de Saint-Leu (Source : Clicano), système brésilien Coppe Subsea Technology (Source : O Globo).

- Au sein des ports, les **quais, pontons ou jetées existants** peuvent aussi être équipés de dispositifs houlomoteurs modulaires :



Figure 128 : dispositifs houlomoteurs Drakoo, Wave Star et Sinn Power.

- Les 4 sites dans l'Ouest envisagés par la Région pour la création ou l'extension de **bassins de baignade** (Cap La Houssaye, Souris Chaude, Souris Blanche, Grande Anse) ne se prêtent pas à la valorisation de l'énergie de la houle. Les bassins sont positionnés dans des zones relativement abritées, au sein d'anfractuosités et de barrières rocheuses naturelles qui seraient renforcées par des ouvrages maçonnés (comme la piscine de Boucan Canot) ou par des enrochements libres de faible hauteur (comme le bassin de Manapany). L'exposition à la houle, les niveaux d'eau ainsi que la nécessité de ne pas impacter le paysage préservé de ces sites sont autant de facteurs réhibitoires.
- La même conclusion s'applique pour les bassins de baignade existants de Manapany, Grande-Anse, et du Baril.

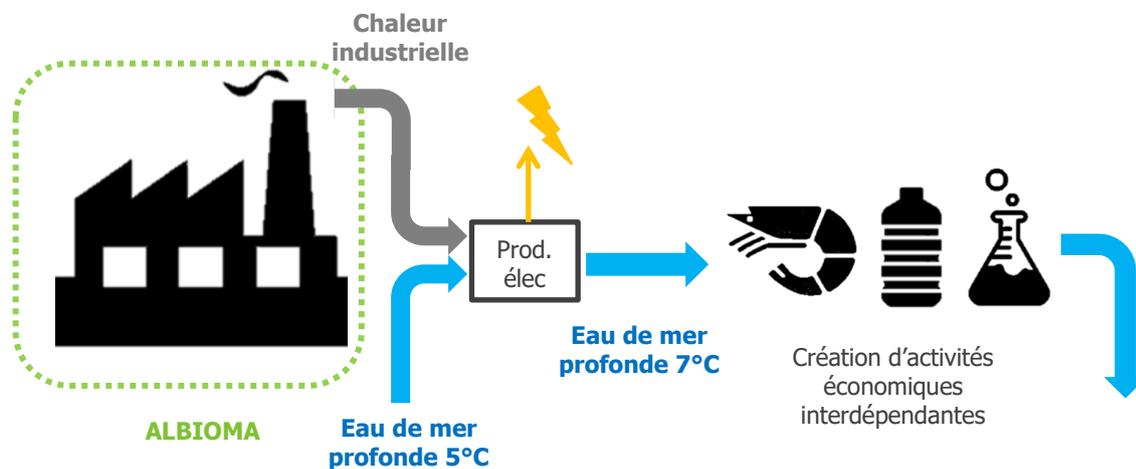
Les ouvrages littoraux existants sur lesquels on pourrait conduire ce type de réflexion sont localisés sur la Figure 124 page 147.

L'autre mutualisation possible est celle d'une **conduite de pompage d'eau profonde** intégrée dans le corps d'une digue portuaire par exemple, réduisant ainsi le coût d'enfouissement de la conduite à proximité du rivage. Cela a été envisagé pour le projet d'énergie thermique de Bois-Rouge mais le phasage du projet ne le permettait pas.

### Mutualisation de procédés

C'est la création de **sybioses industrielles** autour de l'énergie thermique des mers, avec des échanges d'eau de mer, d'eau de procédés, de résidus solides de désalinisation, de chaleur et de froid entre différentes activités en lien avec l'eau de mer profonde.

C'est par exemple le cas du projet Bois-Rouge à Saint-André, où il est envisagé de produire de l'électricité à partir d'une part, d'une source froide marine (eau profonde à 5°C), et d'autre part, d'une source chaude industrielle : la chaleur dégagée par les procédés de la centrale thermique Albioma de Bois-Rouge. Cette synergie permet d'avoir une source chaude de température plus élevée que celle utilisée habituellement dans le procédé de valorisation de l'énergie thermique des mers, où c'est l'eau de mer de surface qui est utilisée en source chaude (soit environ 25°C). L'eau de mer profonde peut ensuite être réutilisée en sortie de procédé, par exemple pour refroidir des bassins d'aquaculture, puis être désalinisée pour la production d'eau minérale haut de gamme. Les concentrés issus de la désalinisation peuvent à leur tour être valorisés dans l'industrie cosmétique ou pharmaceutique.



### Synthèse des synergies possibles

Plusieurs types de mutualisation peuvent réduire les coûts d'investissement ou d'exploitation d'une installation d'énergie marine. Au stade d'études préalables ou de suivis d'exploitation, les campagnes de terrain et les moyens de mesures en mer peuvent être mutualisés avec d'autres projets. L'infrastructure côtière ou maritime de l'équipement d'énergie marine (conduite, plateforme, bouée, digue, atterrage, etc.) peut être partagé avec d'autres usages : protection côtière, aquaculture, pêche, recherche, loisirs, etc. Enfin, certaines parties de procédés ou de sources d'énergies marines et non marines peuvent être combinées afin d'optimiser l'efficacité de certaines opérations.

## b) Acteurs

Les acteurs potentiels de la filière des énergies marines à la Réunion sont décrits ci-après. Sont distingués :

- Les financeurs directs de projets, ou leurs opérateurs de gestion,
- Les facilitateurs de projets et partenaires techniques ou scientifiques,
- Les Maîtres d'Ouvrage potentiels.

### Les financeurs

D'un côté, les organismes publics financent la filière dans un objectif de transition écologique et de développement économique d'un secteur industriel. Parmi eux : l'Union Européenne, l'Etat, les Régions, mais aussi les organismes de coopération internationale (Commission de l'Océan Indien par exemple).

### Financements de l'Union Européenne

Au niveau de l'**Union Européenne**, on peut citer :

- En financement direct par appels à proposition de la Commission Européenne : le programme **Horizon 2020**, les dispositifs **ERA-NET** Cofund (European Research Area Network), les **JPI** (Joint Programming Initiative) et enfin le programme **Life+** sur les volets biodiversité et climat.
- En financement indirect via des autorités de gestion nationales ou régionales : les Fonds Européens Structurels d'Investissement (FESI) et leurs déclinaisons thématiques comme le **FEDER**. Le FEDER alimente également les programmes de coopération territoriale européenne comme l'**Interreg V Océan Indien**.

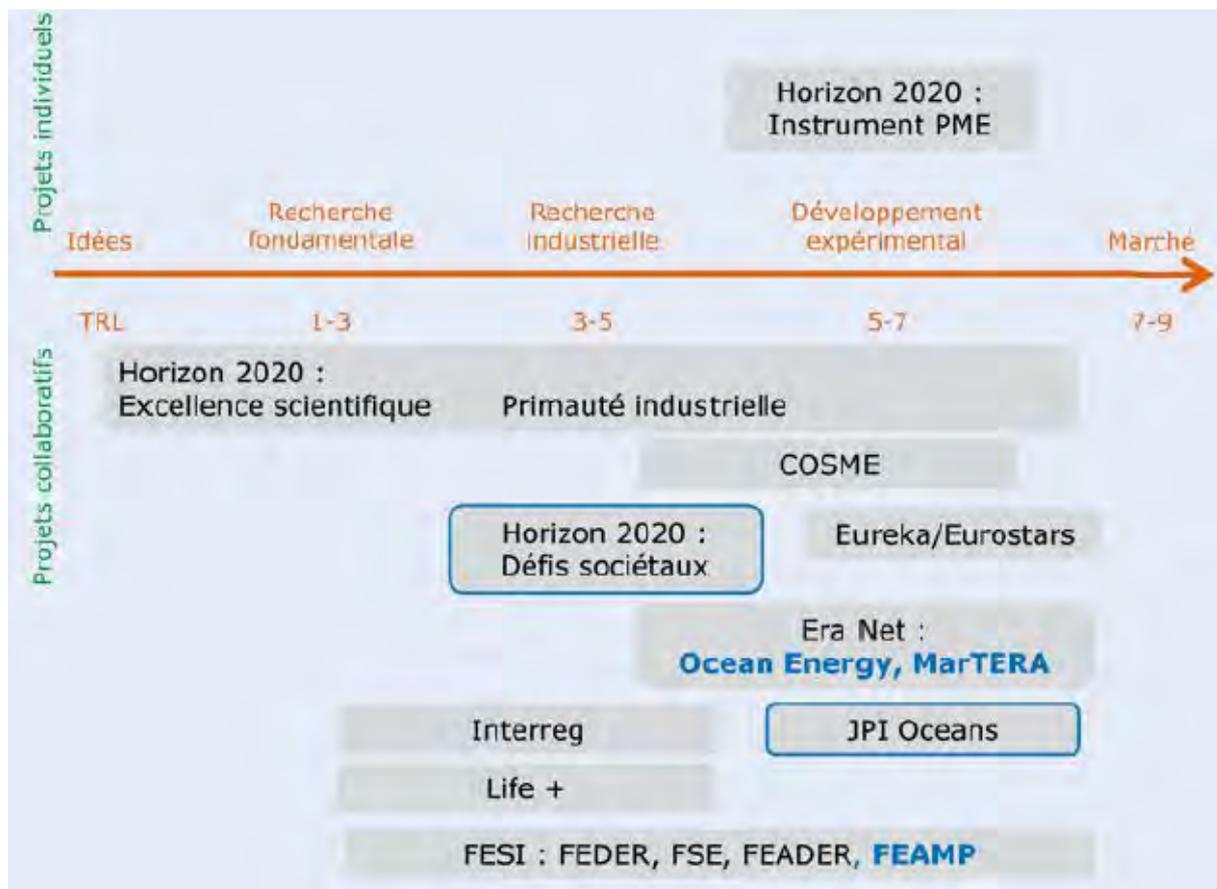


Figure 129 : principaux financements européens mobilisables pour les projets innovants dans l'économie maritime. Source : CESER de l'Atlantique 2016-2017.

Le programme « **MarTERA** » (Maritime and Marine Technologies for a new Era) du dispositif de recherche **ERA-NET**, vise les technologies spécifiques au milieu maritime. Cinq domaines prioritaires transversaux sont ciblés par le programme d'appel à projets :

- Priorité 1 (PA 1) : Développement de technologies maritimes respectueuses de l'environnement,
- Priorité 2 (PA 2) : Développement de structures et matériaux nouveaux,
- Priorité 3 (PA3) : Capteurs, automatisation, surveillance et observations,
- Priorité 4 (PA4) : Techniques avancées de fabrication et production,
- Priorité 5 (PA5) : Sécurité et sécurité.

L'appel 2019 se déroule en 2 étapes :

- Dépôt des propositions préliminaires : du 01/12/2018 au 29/03/2019,
- Dépôt des propositions complètes : du 01/06/2019 au 06/09/2019.

Le programme « **Ocean Energy** » du dispositif ERA-NET, avait pour but de coordonner et financer les actions de recherche et d'innovation européennes dans le domaine des énergies marines. Il s'est déroulé sur 4 ans de 2014 à 2018.

**JPI Oceans** (« Joint Programming Initiative » : programmation d'action conjointe) est une plateforme de coordination sous le statut d'association belge internationale à but non lucratif. Elle s'adresse aux pays membres de l'Union Européenne et aux pays associés. Elle a pour but d'optimiser les budgets de recherche nationaux en faisant converger ou coopérer les actions de recherche menées par les pays membres. La France y est représentée par l'IFREMER et l'Agence Nationale de la Recherche.

Le programme **NER 300** (New Entrant Reserve) était axé sur le financement de démonstrateurs pour le captage et le stockage du carbone ou les technologies innovantes d'énergies renouvelables. Le fonds a été créé grâce à la monétisation des 300 millions de crédits d'émission provenant de la réserve destinée aux nouveaux entrants dans le cadre du système européen d'échange de quotas d'émission. Le programme s'est déroulé de 2009 à 2017 et a permis par exemple de financer le projet NEMO de DCNS (centrale électrique flottante d'énergie thermique des mers).

#### *Financements de l'Etat*

Au niveau de l'**Etat**, on peut citer :

- En financement direct : les **appels d'offres nationaux** comme ceux lancés à partir de 2011 pour la réalisation et l'exploitation de parcs éolien en mer. Ce mode de financement est soumis aux aléas de la vie politique et a montré ses limites notamment sur la filière hydrolienne.
- En financement indirect : le **Programme Investissement d'Avenir** (PIA) est une aide qui finance les appels à projets ou appels à manifestation d'intérêt lancés par les structures de l'Etat comme l'Agence Nationale de la Recherche, l'ADEME, Bpifrance (banque publique d'investissement).

**Bpifrance** est l'un des opérateurs du PIA, ainsi que des fonds de la Banque Européenne d'Investissement. Banque Publique d'Investissement, son rôle consiste à soutenir le financement de l'économie française. Le soutien à l'innovation est l'un de ses métiers. Elle intervient en faveur de projets ayant des niveaux de maturité technologique allant de la validation technologique en laboratoire aux systèmes opérationnels. Les différents soutiens financiers proposés sont apportés sous forme de subvention, d'avance remboursable, de prêt à taux zéro, de prêt participatif, de prise de participation et de garantie sur intervention bancaire en fonction du risque et de l'avancement du projet.

Des dispositifs fiscaux viennent compléter ce panorama des dispositifs de soutien financier à l'innovation. Le **crédit d'impôt recherche** (CIR) et le **crédit d'impôt innovation** (CII) sont des aides publiques qui permettent de soutenir l'effort des entreprises en matière de R&D (recherche fondamentale, recherche appliquée, développement expérimental) et en matière d'innovation (dépenses de réalisation de prototypes ou installations pilotes de nouveaux produits).

#### Exemple :

L'ADEME a lancé en 2018 un Appel à projets Energies Renouvelables dans le cadre du Programme Investissements d'Avenir. Il portait sur toutes les énergies renouvelables ainsi que leurs combinaisons entre elles. Deux objectifs étaient visés : la baisse du coût de production de l'énergie et la réduction de l'empreinte environnementale des systèmes. Pour cela, deux axes étaient imposés :

- Axe 1 : Développement de briques technologiques innovantes
- Axe 2 : Systèmes de démonstration

**Exemples :**

Quelques volets du programme Horizon 2020 déclinables aux énergies marines sont présentés dans le tableau ci-dessous. D'autres financements européens mobilisables pour les énergies marines sont présentés page suivante à titre d'exemple.

Tableau 24 : dispositifs de financement du programme Horizon 2020

Programme H2020	Action	Intitulé	Filière en lien	Période	Budget par projet
<b>9. Sécurité alimentaire, agriculture et foresterie durable, bio-économie et milieux aquatiques terrestres et marins</b>	LC-BG-03-2018	Exploitation durable des ressources biologiques marines dans la zone mesopélagique (200 à 1000 m de fond)	Produits dérivés de l'eau froide profonde notamment agro-alimentaire	Terminé	12 millions d'euros
	DT-BG-04-2019	Exploitation durable de l'aquaculture européenne et innovation	Aquaculture & eau froide profonde	<b>2019</b> Ouverture : 16/10/2018 Clôture : 23/01/2019	6 millions d'euros
	BG-05-2019	Usages combinés des espaces marins : démonstrateurs pilotes	Toutes les énergies marines	<b>2019</b> Ouverture : 16/10/2018 Clôture : 23/01/2019	18 millions d'euros
	BG-11-2020	Pilotes & innovation maritime	Toutes les énergies marines ?	<b>2020</b>	Non précisé
<b>10. Energie sûre, propre et efficace</b>	LC-SC3-RES-8-2019	Combinaison de deux énergies renouvelables ou plus pour le chauffage ou la climatisation urbaine	Energie thermique des mers (non directement cité mais applicable)	<b>2019</b> Ouverture : 05/09/2018 Clôture : 11/12/2018	15 millions d'euros
	LC-SC3-RES-14-2019	Optimisation de la fabrication et de l'exploitation des systèmes. a) systèmes de suivis pour les énergies marines	Toutes les énergies marines (instrumentation)	<b>2019</b> Ouverture : 01/08/2018 Clôture étape 1 : 16/10/2018 Clôture étape 2 : 25/04/2019	20 millions d'euros
	LC-SC3-JA-3-2019	Programme européen d'achats pré-commerciaux pour la recherche et le développement de l'énergie des vagues	Energie de la houle	<b>2019</b> Ouverture : 14/11/2018 Clôture étape 1 : 27/08/2019	20 millions d'euros
	LC-SC3-EE-7-2020	Améliorer l'efficacité énergétique des petits data centers	SWAC / projet Bois-Rouge ?	<b>2020</b>	Non précisé
	LC-SC3-EE-12-2020	Marchés publics innovants pour l'efficacité énergétique	SWAC ?	<b>2020</b>	Non précisé
	LC-SC3-RES-19-2020	Parcs éolien en mer flottant : démonstrateurs	Eolien en mer	<b>2020</b>	Non précisé
	LC-SC3-ES-3-2018-2020	Systèmes énergétiques insulaires intégrés	Energies renouvelables	<b>2018-2020</b>	26,3 millions d'euros

Programme H2020	Action	Intitulé	Filière en lien	Période	Budget par projet
	Prix « RESponsible Island »	Energies renouvelables en contexte insulaire	Energies renouvelables	2 années de concours : Ouvertures 1 <sup>er</sup> trimestre <b>2019</b> et 1 <sup>er</sup> trimestre <b>2020</b>	0,85 millions d'euros par an pour les 3 premières places.

### *Les financements privés*

Les industriels et développeurs sont des financeurs potentiels qui investissent dans des démonstrateurs ou des projets pilotes dans l'espoir de susciter l'intérêt des Etats pour ces technologies.

Néanmoins, faute de signal positif en retour, les investissements finissent par être stoppés. C'est ce qui s'est passé pour la filière hydrolienne en France avec la fermeture de l'usine OpenHydro de Cherbourg un mois après son inauguration, faute d'annonce gouvernementale comme espéré.

Malgré un contexte politique national peu favorable aux énergies marines, la Réunion pourrait représenter un territoire d'intérêt pour les industriels, en leur permettant de valider leurs technologies dans un contexte bien spécifique : tropical, insulaire et cyclonique, caractéristiques clés de marchés potentiels internationaux stratégiques. La Réunion se trouve toutefois en concurrence avec d'autres îles mieux équipées : les Canaries, qui possède une plateforme de test des énergies marines (le PLOCAN), Hawaii, qui dispose également de sites de test dédiés aux énergies marines, l'île de Jeju en Corée du Sud ou encore la Chine et le Japon qui disposent d'une riche expérience en la matière. L'appartenance à l'Union Européenne et la possibilité de mobiliser ces fonds pourrait éventuellement compenser les faiblesses de la Réunion pour les industriels européens.

### *Les partenaires techniques et scientifiques*

---

Parmi les partenaires techniques et scientifiques mobilisables en local et national, citons de manière non exhaustive :

- L'IFREMER : possède une importante base de données locale, et en métropole, est partenaire des projets d'énergies marines en cours en France.
- France Energie Marine : développe principalement la R&D. La Région Réunion en est membre, et souhaite, à travers ce partenariat : disposer d'une assistance sur les programmes de financements existants, ainsi que d'une expertise technique sur l'instrumentation en mer (projet Région).
- Le CETMEF (Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales) qui gère notamment le réseau national de houlographes CANDHIS.
- L'Université de la Réunion.
- Le Grand Port Maritime de la Réunion : à associer en amont pour tout projet sur les questions de livraison maritime des équipements, construction sur site, déploiement et mise à l'eau, maintenance et réparation navale. Des zones dédiées aux activités liées aux énergies marines sont prévues dans l'enceinte du port, aussi il conviendra d'informer le Grand Port si un projet nécessite des surfaces d'activités terrestres.
- La Direction de la Mer Sud Océan Indien : pour toutes les questions de balisage maritime et sécurité de la navigation.
- La Préfecture de la Réunion : pour la gestion des usages des espaces maritimes.
- La Région Pays de La Loire, avec laquelle la Région Réunion a initié en 2019 un partenariat sur la Transition Écologique Bleue.

### *Les Maîtres d'Ouvrage potentiels*

---

#### *Eolien en mer flottant*

Dans cette filière, tous les cas de figure semblent se rencontrer :

- Certains projets sont portés exclusivement par des **producteurs privés d'énergie renouvelable**. Ceux-ci développent le projet, choisissent et achètent les équipements auprès des concepteurs - fournisseurs, puis exploitent le parc éolien.
- D'autres sont portés par le(s) **concepteur(s) de l'éolienne flottante**. Il s'agit toutefois d'un cas singulier car la plupart des concepteurs se limitent à la fourniture d'équipements.
- Enfin les projets peuvent aussi être développés par la **puissance publique**, en partenariat avec des privés. Au Japon par exemple, le Ministère de l'Économie est le financeur du projet d'éolien flottant de Fukushima, appuyé sur le plan technique par l'Université de Tokyo. Deux sociétés privées s'occupent de la conduite de projet et des autorisations. En Corée du Sud, le projet d'éolien flottant est porté par l'État, la ville d'Ulsan et l'entreprise publique Korea National Oil Corporation, laquelle s'est associée avec un pétrolier norvégien.

Quelques exemples d'acteurs sont listés en Annexe 8. A la Réunion, tous ces cas de figure paraissent envisageables.

### *Houlomoteur*

Dans ce domaine, la filière n'est pas encore industrialisée et elle est dominée par des petites sociétés spécialisées ou par des universités. Pour cette raison, la plupart des réalisations existantes ont bénéficié d'une commande publique, exception faite de quelques projets visant l'approvisionnement en énergie de plateformes pétrolières.

A la Réunion comme ailleurs, un projet houlomoteur nécessitera un soutien public. Celui-ci peut prendre plusieurs formes : subvention, aide aux études préalables, prise en charge des campagnes d'acquisition de données, dérisquage réglementaire, appui à l'obtention de tarifs de rachat...

La Région Réunion être prête à soutenir la filière, se tient à la disposition des porteurs de projets pour les accompagner dans leurs démarches.

Les maîtres d'ouvrages potentiels et les projets d'aménagement littoral prévus sont listés page suivante.

### *Energie thermique des mers*

Plusieurs types de montages de projets ont été mis en œuvre sur cette filière :

- En Corée du Sud et à Taïwan, la plupart des sites de pompage d'eau profonde sont le fruit d'investissements privés réalisés par des industriels des secteurs de l'agro-alimentaire et de la chimie.
- A Hawaï, et dans une partie des sites japonais, la puissance publique porte le projet, finance les équipements de pompage et de distribution, puis met à disposition des parcelles et vend l'eau profonde aux sociétés qui s'installent sur son site. Dans ce type de montage, l'eau profonde est exploitée à la fois commercialement par les sociétés privées, et à la fois par la puissance publique via des activités de recherche, voire de tourisme.
- Cas intermédiaire, les secteurs publics et privés s'associent dans une société de projet. L'investissement initial des équipements de pompage et de distribution ainsi que leur exploitation sont partagés entre les porteurs de projet en fonction de leurs parts respectives.

Dans le contexte réunionnais, l'énergie thermique des mers constitue un projet de développement territorial qui dépasse la production énergétique. Cette filière nécessite donc de la part de la puissance publique une vision d'aménagement globale qui permette aux porteurs de projets privés de venir s'y greffer.

### **Synthèse des acteurs potentiels**

Les acteurs potentiels comprennent d'abord les financeurs, en particulier l'Union Européenne, via ses programmes divers, et l'Etat via des appels d'offres nationaux ciblés, des programmes d'investissement pour la recherche ou l'innovation, des dispositifs fiscaux, et les mécanismes de tarification de l'énergie. L'implication des acteurs privés à la Réunion dépend fortement de l'orientation des politiques publiques de l'énergie, mais aussi de stratégies commerciales dans lesquelles la Réunion pourrait tirer son épingle du jeu.

Pour y arriver, le territoire dispose de nombreux partenaires techniques, scientifiques et institutionnels sur lesquels s'appuyer et qu'il convient de mobiliser. Le profil des maîtres d'ouvrages potentiels varie selon la filière d'énergie marine considérée, mais dans tous les cas, l'implication de la puissance publique sera nécessaire à la réussite du projet.

Tableau 25 : Maîtres d'ouvrage potentiels pour des projets houlomoteurs intégrés sur ouvrages côtiers

Site potentiel houlomoteur intégré	Commune	Linéaire de digues existant en longitudinal	Gestionnaire de l'ouvrage	Projets d'aménagement	Linéaire projeté	Echéances
<b>Digues de l'aéroport Roland-Garros</b>	Sainte-Marie	1300 ml	<b>Aéroport de la Réunion Roland Garros</b>	Extension des digues de protection sur 1700 ml, carapace en Blocs Cubiques Rainurés (BCR).	1700 ml	5 mois de travaux / an pendant 5 ans dès 2018
<b>Port de Sainte-Marie</b>	Sainte-Marie	400 ml	<b>CINOR</b>	Agrandissement de la darse, création de nouveaux quais, prolongement d'une digue de protection en BCR sur 90 m.	90 ml	Travaux dès 2019
<b>Barachois</b>	Saint-Denis	0 ml	<b>commune</b>	Réaménagement du front de mer : digue de protection littorale + bassin de baignade	1200 ml	Livraison prévue : 2023
<b>Possession</b>	La Possession	50 ml	<b>commune</b>	Aménagement littoral du front de mer - abri côtier - bassin de baignade	100 ml	Travaux prévus pour 2019-2020
<b>Port-Est</b>	Le Port	800 ml	<b>Grand Port Maritime de la Réunion</b>	/	/	/
<b>Pointe des Galets - SRPP</b>	Le Port	600 ml	<b>?</b>	/	/	/
<b>Port-Ouest</b>	Le Port	0 ml	<b>Grand Port Maritime de la Réunion</b>	/	/	/
<b>Port de Saint-Gilles-les-bains</b>	Saint-Paul	100 ml	<b>TCO</b>	/	/	/
<b>Port de Saint-Leu</b>	Saint-Leu	90 ml	<b>TCO</b>	Agrandissement de la darse & extension de la digue de protection en enrochements sur environ 100 m.	100 ml	Travaux prévus pour 2019-2020
<b>Port de Saint-Pierre</b>	Saint-Pierre	300 ml	<b>commune</b>	Projet de quai pour croisiéristes à Terre-Sainte	?	Livraison prévue : 2020
<b>Cale de mise à l'eau de Saint-Philippe</b>	Saint-Philippe	0 ml	<b>CASUD</b>	Projet d'ouvrage côtier de sécurisation	60 ml	Etudes lancées en 2018
<b>Port de Sainte-Rose</b>	Sainte-Rose	200 ml	<b>commune</b>	/	/	/

### c) Procédures de sélection de partenaires et de financement

Selon le degré de maturité du projet, plusieurs solutions s'offrent à la collectivité qui souhaiterait soutenir un projet d'énergie marine sur son territoire :

#### *L'appel à manifestation d'intérêt*

L'appel à manifestation d'intérêt est un mode de présélection de candidats :

- Soit pour l'attribution d'une subvention :
  - Il peut servir à faire émerger des problématiques en vue d'un futur appel à projets, ou à assurer, à travers la pré-sélection, la cohérence des actions menées sur une zone géographique ou selon une thématique donnée.
  - L'AMI est souvent peu directif, il vient simplement indiquer le contexte global auquel les projets doivent se rattacher.
  - L'AMI n'a pas de réelle définition juridique et permet donc une certaine souplesse. Comme l'appel à projets, ce n'est pas une procédure définie par le Code des Marchés Publics.
- Soit pour la soumission à de futures procédures de passation de marchés publics (appels d'offres restreints ou procédure concurrentielle avec négociation).
  - En lançant un Appel à Manifestation d'Intérêt, l'acheteur invite les candidats à manifester leur intérêt pour le marché identifié dans un avis de pré-information valant avis de publicité.
  - Une fois l'acheteur prêt à engager la procédure de sélection, il demande aux candidats ayant manifesté leur intérêt de le confirmer par la remise d'une candidature, étant entendu que seuls les candidats ayant manifesté leur intérêt dans les conditions requises par l'avis de pré-information peuvent participer à la procédure de passation du marché considéré.

Dans le contexte actuel réunionnais, l'AMI « subvention » pourrait servir :

→ En phase pré-projet, à identifier les besoins des porteurs de projets potentiels sur la caractérisation de sites, l'acquisition de données, l'instrumentation en mer, etc. Notamment pour l'énergie de la houle et l'éolien en mer.

→ A identifier les sites à privilégier, en fonction des solutions techniques proposées par les candidats, notamment pour l'éolien en mer et l'énergie de la houle.

→ Dans le cas où un site serait déjà choisi par un Maître d'Ouvrage public, à vérifier l'existence de solutions techniques ou à identifier les acteurs intéressés par un partenariat pour l'implantation d'un démonstrateur, par exemple sur du houlomoteur.

→ A identifier des acteurs potentiels ou des secteurs d'activités, dans le cas de la valorisation de l'eau de mer profonde et de l'énergie thermique des mers.

#### *L'appel à projets*

L'appel à projets vise à sélectionner des projets préalablement à la conclusion d'une convention de subventionnement et donc à l'attribution d'une aide publique.

Elle intervient lorsque le besoin est plus précis que dans l'appel à manifestation d'intérêt. La collectivité a identifié une problématique et des objectifs généraux, mais laisse les candidats proposer des solutions. L'initiative du projet appartient toujours au candidat. Il n'entre donc pas dans le champ de la commande publique.

L'appel à projets n'est pas encadré juridiquement. Il peut toutefois se voir requalifier en marché public si la personne publique est à l'initiative du projet et si la subvention correspond à un prix versé en contrepartie de la satisfaction d'un besoin propre de la personne publique. Notamment, le dossier de l'appel à projets ne doit pas contenir de véritable cahier des charges propre à faire regarder le contrat ou l'acte envisagé comme relevant de la commande publique.

Dans le contexte actuel réunionnais, l'appel à projets pourrait servir :

→ A sélectionner des porteurs de projets privés que la collectivité subventionnerait, par exemple en phase d'études préalables ou de test en mer, pour soutenir le développement de la filière à la Réunion.

#### *L'appel d'offres*

L'appel d'offres, ouvert ou restreint, est la procédure par laquelle l'acheteur public choisit l'offre économiquement la plus avantageuse, sans négociation, sur la base de critères objectifs préalablement portés à la connaissance des candidats.

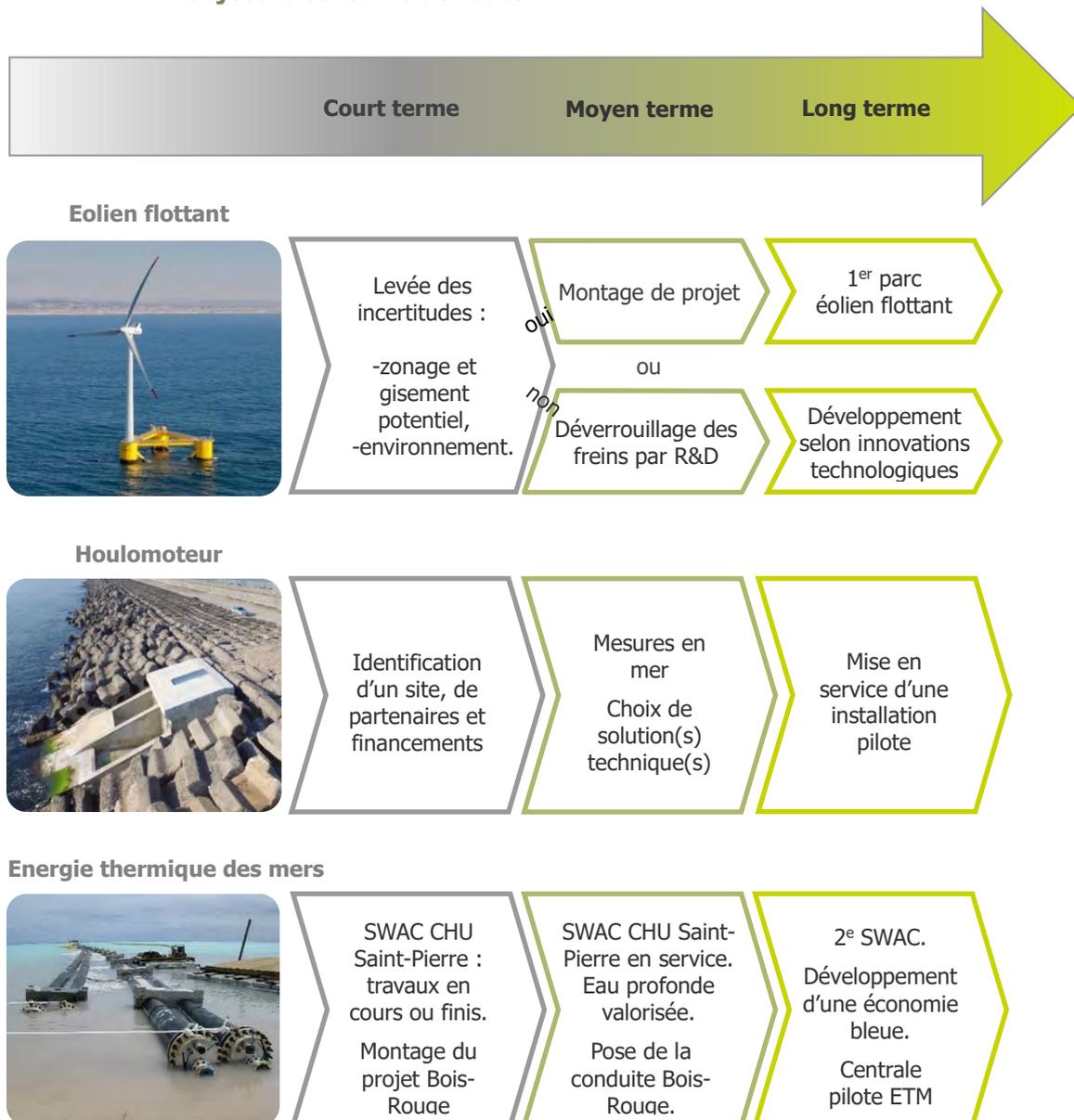
Cette procédure nécessite donc que le besoin soit précisément défini, quantifié et chiffré.

→ pour l'éolien en mer, l'appel d'offres nécessite d'avoir identifié les zones d'implantation et anticipé un certain nombre de points techniques avec les services de l'Etat (usage de la mer, conflits d'usage, raccordement, etc.)  
→ pour l'énergie thermique des mers, l'appel d'offres porte sur la fourniture et pose de la conduite d'eau profonde.  
→ pour le houlomoteur, l'appel d'offres est à envisager dans le cas d'un système intégré sur un ouvrage côtier, où les contraintes d'implantation seront suffisamment précises pour définir un cahier des charges.

#### **Synthèse des procédures opérationnelles**

Plusieurs outils opérationnels pour soutenir financièrement ou lancer un projet d'énergie marine peuvent être mis en place. En fonction de la phase d'avancement du projet, du niveau de connaissance des sites, du degré de précision du besoin, et du nombre de solutions techniques adaptées, la collectivité pourra recourir à un appel à manifestation d'intérêt, un appel à projet ou à un appel d'offres.

## 2.2.4. Objectifs et feuille de route



En matière d'éolien en mer flottant, il s'agit dans un premier temps de consolider les connaissances sur le gisement en vent et sur l'aspect biodiversité (notamment avifaune marine, mais aussi cétacés, pêcheries, etc.). Une fois ces éléments en mains, les projets pourront se monter avec les acteurs industriels, qui mèneront alors les études techniques détaillées permettant de quantifier le potentiel exploitable. Le financement et la procédure de projet à lancer seront des sujets à négocier avec l'Etat et la Région.

En matière d'énergie de la houle, il faudra d'abord identifier une zone et un maître d'ouvrage prêt à porter le projet. Un appel à manifestation d'intérêt pourra être lancé afin de choisir le concept le plus adapté à la configuration des lieux. Des mesures en mer devront être réalisées pour caractériser le potentiel du site, puis dimensionner les machines houlomotrices, voire même pour sélectionner les équipements. L'objectif visé sera d'abord de mettre en service une installation pilote, puis éventuellement d'augmenter la capacité sur le site.

En matière d'énergie thermique des mers, l'objectif à court-terme (2023) est la mise en service de la climatisation marine de l'hôpital de Saint-Pierre (SWAC du CHU). A moyen-terme, l'eau profonde pompée et rejetée par le procédé de climatisation pourrait être valorisée commercialement à travers des applications agro-alimentaires, cosmétiques ou pharmaceutiques. L'exploitation de cette ressource disponible à Saint-Pierre pourrait éventuellement constituer la 1<sup>ère</sup> étape test pour les entreprises, avant un déploiement à plus grande échelle à Bois-Rouge. A long-terme, l'objectif est d'avoir développé une économie bleue dans la plaine de Bois-Rouge, avec une valorisation énergétique et économique de l'eau de mer profonde.

En termes de puissance installée, on peut estimer des potentiels bruts et proposer les objectifs quantifiés suivants:

Tableau 26 : potentiel et objectifs proposés pour la Réunion par filière d'énergie marine

Filière	Potentiel brut total du territoire		Objectifs
Eolien en mer flottant	Zone Nord : 3,4 GW à 5,6 GW Zone Sud : 1,8 à 3,2 GW.	5 à 8 GW	40 à 200 MW d'ici 2030
Houle	4 à 10 sites côtiers 1 à 4 sites au large 200 kW à 1 MW / site	1 à 5 MW	200 kW à 1 MW d'ici 2030
Energie thermique des mers	5-6 sites environ <u>Production de froid :</u> Minimum 1,5 MWf / site SWAC du CHU Saint-Pierre : 7 MW	7 à 20 MWf	7 MWf d'ici 2022 14 MWf d'ici 2030  300 kW à 5 MW d'ici 2030
	<u>Production d'électricité :</u> Potentiel non quantifiable(*)		

(\*) Equilibre technico-économique dépendant de multiples facteurs : avancées technologiques sur le procédé, coût de la conduite, possibilité de valorisation combinée de l'eau ou non, tarif d'achat de l'électricité, subventions, etc.

### Synthèse des objectifs

Pour l'éolien en mer, l'objectif est de réaliser un parc flottant d'au moins 40 MW d'ici 2030.

Pour l'énergie thermique des mers, l'objectif est de mettre en service le SWAC du CHU de Saint-Pierre d'ici 2022, puis valoriser l'eau profonde pompée au CHU et enfin réaliser un autre projet énergie thermique des mers (Bois-Rouge, Ecocité, aéroport de Saint-Denis...).

Pour l'énergie de la houle, l'objectif est de lancer au moins un projet sur un site pilote, puis si possible, de le multiplier (ajout d'unités sur le site, ou réplique sur un autre site).

### 2.2.5. Orientations et propositions d'actions

Le tableau suivant présente, en fonction des enjeux pour les énergies marines à la Réunion identifiés dans l'analyse SWOT (atouts, faiblesses, opportunités, freins), des orientations stratégiques et des propositions d'actions.

Les actions proposées sont ensuite détaillées dans des fiches-actions.

Enjeux des énergies marines à la Réunion		Réponses / Orientations	Proposition d'actions
<b>Facteurs internes aux énergies marines</b>	<b>Atouts</b>	<b>Des atouts à faire (re)connaître</b>	Veille, planification, réseau, lobbying, communication, études, projets.
	At1 <u>Intérêt pour la production électrique de l'île :</u> • Diversification du mix énergétique, avec un potentiel important de l'éolien en mer du fait de la ressource élevée et des puissances importantes, • Contribution à l'indépendance énergétique, • Réduction des consommations (climatisation et refroidissement avec l'énergie thermique des mers).	O1 Faire reconnaître les atouts des EMR pour la production électrique en contexte insulaire.	PLA 1 • Fixer des objectifs pour les EMR dans la PPE, VEI 1 • Suivre les travaux sur les EMR en contexte insulaire (Canaries, Hawaii, Corée du Sud, Chine), VEI 2 • Suivre/soutenir les travaux du laboratoire PIMENT sur la flexibilité de l'électricité produite par ETM,
	At2 <u>Energies renouvelables :</u> • Energie de base (énergie thermique des mers), • Energie intermittente mais prévisible (houle & vent).	O2 Faire reconnaître les atouts des EMR en tant qu'EnR.	LOB 1 • Lobbying auprès des instances nationales (Etat, Assemblée Nationale, etc.) & actions conjointes avec d'autres régions axées EMR (Pays de la Loire, Bretagne, Normandie, Occitanie).
	At3 <u>Industrie déjà développée (éolien en mer)</u>	O3 Attirer la filière à la Réunion.	COM 2 • Constituer un dossier de présentation de la Réunion à l'attention des porteurs de projets / industriels. RES 1 • Nouer des relations avec les développeurs et porteurs de projets potentiels.
	At4 <u>Levier potentiel de développement économique des territoires, à travers les activités maritimes, l'industrie de construction et maintenance, l'agro-alimentaire, le tourisme, etc.</u>	O4 Faire reconnaître les atouts des EMR auprès des décideurs publics et favoriser ainsi leur intégration dans les projets structurants.	COM 1 • Diffuser le SREMER en local pour faire connaître le potentiel de l'île.
	<b>Faiblesses</b>	<b>Des technologies à adapter</b>	
	Fb1 <u>Machines pas toujours adaptées au contexte réunionnais, en termes :</u> • de transport et manutention sur site (moyens nautiques et portuaires limités en local), • de résistance aux conditions de mer (houles australes et cyclones tropicaux).	O5 Vérifier l'adéquation des technologies retenues au territoire ou adapter la conception des machines.	ETU 1 • Poursuivre/soutenir les programmes de recherche de l'Université de la Réunion permettant de caractériser les états de mer et donc les critères dimensionnants des machines. COM 2 • Diffuser les données de contexte local auprès des développeurs (dossier de présentation Réunion). VEI 1 • Suivre/soutenir les travaux sur l'adaptation des EMR en contexte cyclonique. PRO 3 • Création d'un centre de recherche, formation et innovation dédié aux EMR.
	Fb2 <u>Fragilité économique des développeurs houlomoteurs :</u> profil de petites entreprises mono spécialisées, à faible durée de vie, aux concepts propres (peu de partage ou transmission).	O6 Sécuriser le retour sur investissement public dans les projets d'EMR.	COM 3 • Identifier un organisme référent qui suit les projets en local, compile, archive et partage les données pour garantir la valorisation des expériences sur le long terme.
	Fb3 <u>Eparpillement de la connaissance</u> acquise après échec des projets : pas de valorisation ultérieure possible pour la collectivité.		COM 4 • Prévoir pour chaque projet subventionné ou aidé des modalités de passation / transfert de savoir vers la collectivité en cas de faillite de la société ou échec du projet.
	Fb4 Coût de l'énergie non compétitif (houle, ETM).	O7 Diminuer les coûts de production	/ • Rôle des institutions publiques : accompagner le développement des filières jusqu'à leur phase commerciale via le soutien à la R&D, la subvention de démonstrateurs, l'appui technique, etc.
<b>Facteurs externes aux énergies marines : spécificités Réunion</b>	<b>Opportunités</b>	<b>Un potentiel à exploiter</b>	
	Op1 <u>Existence de projets ou ouvrages sur l'île offrant des possibilités de co-développement :</u> • Energie thermique des mers et eau profonde, • Ouvrages littoraux et systèmes houlomoteurs.	O8 Identifier et promouvoir les synergies d'aménagements existantes et futures avec les EMR.	/ • Suivre et accompagner les projets à potentiel de co-développement : SWAC du CHU de Saint-Pierre, projet Bois-Rouge, bassins de baignade, aménagements portuaires, filets anti-requin, etc. COM 1 • Diffuser le SREMER en local pour faire connaître le potentiel de l'île et les technologies disponibles. PLA 2 • Intégrer la possibilité de réaliser des EMR côtières intégrées aux documents de planification (SMVM).
	Op2 <u>Gisement d'énergies marines disponible :</u> • Potentiel houlomoteur intéressant notamment sur la moitié Sud de l'île. • Bathymétrie très favorable à l'énergie thermique des mers. • Zones au large pour l'éolien en mer flottant.	O9 Lancer ou accompagner le développement de projets concrets dans ces 3 filières.	PRO 4 • Lancer un AMI pour l'exploitation d'un démonstrateur pilote houlomoteur à la Réunion. / • Accompagner les 2 projets d'énergie thermique des mers en cours, dont la réussite est primordiale pour le développement de la filière. PRO 1 • Etudier la possibilité de valoriser l'eau profonde du SWAC du CHU de Saint-Pierre. RES 1 • Accompagner les porteurs de projets éolien en mer à la Réunion (cf O3).
	Op3 Territoire déjà connu de certains industriels à l'international.	O3 Attirer la filière à la Réunion.	/ Cf actions de l'Orientation n°3
	Op4 Expérience en travaux maritimes grâce à la NRL.	O10 Partager les données et expériences acquises lors du chantier NRL vers les applications EMR.	/ • Exploiter les mesures de suivi continu météo-océanique pour améliorer les modèles locaux de prévision météo-océaniques développés par l'Université de la Réunion.
	<b>Menaces / freins</b>	<b>Un travail de préparation à anticiper</b>	
	Fr1 Etats de mers spécifiques : conditions cycloniques et fortes houles australes.	O5 Vérifier l'adéquation des technologies retenues au territoire ou adapter la conception des machines.	/ Cf actions de l'Orientation n°5.
	Fr2 Eloignement insulaire (impact sur l'approvisionnement).		
	Fr3 Equipements portuaires & moyens nautiques restreints.	O11 Développer les infrastructures portuaires en cohérence avec le potentiel et les objectifs EMR.	PLA 4 • Accompagner le Grand Port Maritime sur son nouveau projet stratégique 2019-2022. VEI 2 • Suivre les projets de développement portuaire à proximité de zones propices aux EMR (port de Saint-Pierre notamment).
	Fr4 <u>Contraintes environnementales fortes</u> (ENRL, RNM, espèces protégées, formations coralliennes).	O12 Anticiper les questions environnementales posées par les EMR.	/ • Intégrer en tant que territoire pilote ou à minima suivre les résultats du programme de l'UICN « énergies marines et environnement ».

Enjeux des énergies marines à la Réunion		Réponses / Orientations	Proposition d'actions
			ETU 3 • Initier l'étude sur les oiseaux marins et l'éolien en mer. PRO 2 • Accompagner le projet de la CIVIS de créer un espace d'accueil et de sensibilisation biodiversité / énergies marines sur le terrain du Conservatoire du Littoral devant le CHU Saint-Pierre.
		O13 Intégrer les EMR dans la planification spatiale maritime (gestion des conflits d'usages).	PLA 2 • Intégrer les EMR et les conclusions du SREMER à la révision du SAR/SMVM. PLA 3 • Intégrer les EMR dans le Document Stratégique de Bassin Maritime. ETU 4 • Caractériser les zones de pêche (notamment au large pour l'éolien en mer)
Fr5	Connaissance du potentiel insuffisante.	O14 Améliorer la connaissance.	ETU 2 • Caractériser plus finement le potentiel (houlomoteur, éolien en mer, courant). ETU 1 • Continuer à soutenir les programmes locaux de recherche en lien avec l'océanographie, la météo et le littoral. COM 1 • Fédérer les acteurs locaux autour des EMR (à travers l'Institut Bleu, le projet Océan Métiss, etc.). RES 3 • Valoriser davantage le statut de membre de France Energies Marines par la Région
Fr6	Manque de visibilité en matière de <u>tarification</u> - financement pour les porteurs de projets.	O15 Améliorer la prise en compte des spécificités des Outre-Mers dans les politiques en matière d'EMR.	LOB 1 • Porter la voix des EMR en Outre-Mer au niveau national auprès de la CRE, de l'Assemblée Nationale, de FEM, etc. pour mieux en compte les EMR dans les ZNI au travers des Appels à projets, travaux de recherche, politiques tarifaires de l'énergie, etc.
Fr7	Capacité d'accueil du réseau électrique sur certains secteurs.	O16 Travailler en partenariat avec le gestionnaire du réseau.	PLA 1 • Intégrer les sites / projets identifiés au SREMER au Schéma de Raccordement électrique des EnR de la Réunion, • Associer/informer EDF SEI de l'évolution de la filière EMR à la Réunion.

### 2.2.6. Détail des actions

Les actions ont été séparées en 6 grandes catégories :

	PLA	Les actions de planification	PLA 01 : PPE PLA 02 : SAR/SMVM PLA 03 : DSBM PLA 04 : Infrastructures portuaires
	COM	Les actions de communication	COM 01 : Conférences COM 02 : Outils de communication COM 03 : Centralisation et diffusion des données COM 04 : Contrepartie à aide publique
	LOB / RES	Les actions de lobbying et de mise en réseau	LOB 01 : Lobbyisme à l'échelle nationale RES 01 : Partenariat scientifique avec d'autres régions RES 02 : Démarchage des concepteurs et porteurs de projets
	VEI	Les actions de veille	VEI 01 : Veille scientifique et technique VEI 02 : Veille des projets en local
	ETU	Les actions d'étude	ETU 01 : Poursuite des programmes en cours ETU 02 : Affiner la connaissance du gisement ETU 03 : Avifaune et éolien en mer ETU 04 : Caractériser les zones de pêche
	PRO	Le lancement de projets	PRO 01 : valorisation eau profonde SWAC CHU PRO 02 : espace de sensibilisation EMR & biodiv PRO 03 : Centre de recherche, formation, innovation dédié aux EMR PRO 04 : AMI houlomoteur.

Elles sont détaillées dans les fiches-actions ci-après.

#### a) Actions de planification

	Planification	N° action
	PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Energie)	<b>PLA 01</b>
<b>Objectif</b>	Intégrer les objectifs du SREMER dans la révision de la PPE 2019-2023.	
<b>Résultats attendus</b>	Répondre aux attentes des porteurs de projets qui souhaitent une prise de position officielle des décideurs publics sur les énergies marines.	
<b>Action à faire</b>	Soumettre les propositions lors de la consultation publique de la PPE courant 2019.	
<b>Acteurs</b>	Région Réunion, Industriels & porteurs de projets, Syndicats professionnels.	
<b>Phasage</b>	2 <sup>e</sup> semestre 2019.	
<b>Priorité</b>	Haute	

	<b>Planification</b> SAR/SMVM (Schéma d'Aménagement Régional / de Mise en Valeur de la Mer)	<b>N° action</b> <b>PLA 02</b>
<b>Objectif</b>	Intégrer les objectifs du SREMER dans la révision du SAR/SMVM.	
<b>Résultats attendus</b>	Autoriser les projets d'énergie marine sur les zones propices identifiées par le SREMER dans les documents réglementaires d'urbanisme	
<b>Action à faire</b>	Participer à l'élaboration du SAR/SMVM.	
<b>Acteurs</b>	Région Réunion, notamment via le travail de planification spatiale initié par Océan Métiss	
<b>Phasage</b>	2019-2020	
<b>Priorité</b>	Haute	

	<b>Planification</b> DSBM (Document Stratégique de Bassin Maritime)	<b>N° action</b> <b>PLA 03</b>
<b>Objectif</b>	Prendre en compte les énergies marines dans les orientations retenues par le DSBM en matière de développement des activités maritimes et d'utilisation des espaces marins.	
<b>Résultats attendus</b>	Eviter les conflits d'usage.	
<b>Action à faire</b>	Participer à l'élaboration du DSBM.	
<b>Acteurs</b>	Région Réunion (membre du Conseil Maritime Ultramarin de bassin Sud Océan Indien)	
<b>Phasage</b>	2019	
<b>Priorité</b>	Basse (le document n'est pas opposable et il est modifiable relativement simplement).	

	<b>Planification</b> Infrastructures portuaires	<b>N° action</b> <b>PLA 04</b>
<b>Objectif</b>	Préparer l'accueil d'activités liées aux énergies marines.	
<b>Résultats attendus</b>	Disposer d'infrastructures portuaires adaptées aux équipements déployés pour la livraison, la construction et la mise à l'eau des énergies marines.	
<b>Action à faire</b>	La filière énergies marines est déjà intégrée au projet de développement du Grand Port Maritime de la Réunion pour la période 2019-2023. Il s'agit donc plutôt d'accompagner, d'un côté le Grand Port sur la connaissance des besoins de la filière, de l'autre, les porteurs de projets pour qu'ils se mettent en contact avec les autorités portuaires dès les phases amont de leurs projets.	
<b>Acteurs</b>	Grand Port Maritime de la Réunion, Région Réunion.	
<b>Phasage</b>	Au fil de l'eau.	
<b>Priorité</b>	Haute	

**b) Actions de communication**

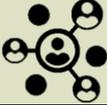
	<p><b>Communication</b></p> <p>Organisation ou participation à des conférences</p>	<p><b>N° action</b></p> <p><b>COM 01</b></p>
<p><b>Objectif</b></p>	<p>Faire connaître le potentiel de la Réunion en matière d'énergies marines aux acteurs locaux, métropolitains et étrangers.</p>	
<p><b>Résultats attendus</b></p>	<p>Développement de projets d'énergies marines sur le territoire.</p>	
<p><b>Action</b></p>	<p><b>En local</b> : organiser des réunions publiques de présentation du SREMER à l'intention des collectivités, des entreprises, des institutions publiques, des organismes de recherche.</p> <p><b>En national</b> : participation à une conférence nationale, par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Assises nationales des énergies marines, organisé annuellement par le Syndicat des Energies Renouvelables.</li> <li>• Journées nationales Génie Côtier - Génie Civil, organisé tous les deux ans par le Centre Français du Littoral, avec un thème « Energie et ressources marines ». Prochaine édition en 2020.</li> <li>• Seanergy. Tous les ans à Dunkerque.</li> </ul> <p><b>A l'international</b> : participation à une conférence internationale, par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• « Floating Offshore Wind Turbines » (FOWT). Tous les ans en France.</li> <li>• « European Wave and Tidal Energy Conference » (EWTEC). Tous les 2 ans en Europe.</li> <li>• « International OTEC Symposium ». Tous les ans.</li> <li>• « Oceans » (océanographie et techniques offshore). Deux fois par an.</li> <li>• « International Conference on Ocean Energy » (ICOE). Tous les 2 ans.</li> <li>• « Asian Wave and Tidal Energy Conference » (AWTEC). Tous les 2 ans.</li> <li>• « International Conference on Ocean, Offshore &amp; Arctic Engineering ». Tous les ans.</li> </ul>	
<p><b>Acteurs</b></p>	<p>SPL Horizon Réunion / Région Réunion</p>	
<p><b>Phasage</b></p>	<p><b>En local</b> : réalisation dans l'année 2019.</p> <p><b>En national ou international</b> : en 2019 ou 2020 selon les calendriers et thématiques retenues par les conférences, et aussi en fonction des projets qui se dessinent sur l'île.</p>	
<p><b>Priorité</b></p>	<p>Haute</p>	

	<p><b>Communication</b></p> <p>Création d'outils de communication</p>	<p><b>N° action</b></p> <p><b>COM 02</b></p>
<p><b>Objectif</b></p>	<p>Faire connaître le potentiel de la Réunion en matière d'énergies marines aux acteurs locaux, métropolitains et étrangers.</p>	
<p><b>Résultats attendus</b></p>	<p>Développement de projets d'énergies marines sur le territoire.</p>	
<p><b>Action</b></p>	<p><b>En local &amp; national :</b> le SREMER et son support de présentation (diapositives illustrées) seront mis en en ligne en libre téléchargement, et les acteurs ciblés seront informés de sa mise à disposition.</p> <p><b>A l'international :</b> un guide / dossier sur la Réunion sera rédigé en anglais à l'attention des porteurs de projets étrangers. Ce guide rassemblera les éléments de contexte, les informations essentielles sur le territoire et son potentiel, ainsi qu'un carnet d'adresses des contacts locaux et des organismes ressources en matière de données. Il s'agit une version courte et adaptée du SREMER. Ce guide sera mis en en ligne en libre téléchargement, et les acteurs ciblés seront informés de sa mise à disposition.</p>	
<p><b>Acteurs</b></p>	<p>SPL Horizon Réunion, en collaboration avec le Grand Port Maritime de la Réunion.</p>	
<p><b>Phasage</b></p>	<p>Réalisation : année 2019-2020.</p>	
<p><b>Priorité</b></p>	<p>Haute</p>	

	<p><b>Communication</b></p> <p>Centralisation et diffusion des données</p>	<p><b>N° action</b></p> <p><b>COM 03</b></p>
<p><b>Objectif</b></p>	<p>Eviter les pertes dans le temps et l'éparpillement de l'information entre les acteurs.</p>	
<p><b>Résultats attendus</b></p>	<p>Accès clair et facilité à l'information pour les porteurs de projets. Sauvegarde des données sur le long terme.</p>	
<p><b>Action</b></p>	<p>Définir un référent sur les énergies marines à la Réunion, identifié et connu, qui puisse servir de point d'entrée pour les porteurs de projets, et de canal de synthèse à la Région. Son rôle sera :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Centralisation des données</u> : le référent suit et recense les travaux effectués en local en lien avec les énergies marines, que ce soit sur la caractérisation du milieu, sur la gestion et les usages des espaces maritimes ou sur des projets en cours. Il compile et archive les données diffusées, les liens vers les serveurs en ligne et les contacts référents pour les données non partagées.</li> <li>• <u>Diffusion des données</u> : le référent informe les porteurs de projet, diffuse les liens vers les serveurs en ligne, transmet sur demande les données en sa possession qui ne sont pas en ligne, et dirige les demandeurs vers les personnes ressources pour les données non partagées.</li> </ul> <p>Un catalogue des ressources disponibles sera effectué pour faciliter ce travail.</p> <p><u>En particulier</u> : suivre le projet de climatisation marine du CHU de la Réunion à Saint-Pierre, en participant par exemple au comité de pilotage.</p>	
<p><b>Acteurs</b></p>	<p>SPL Horizon Réunion.</p>	
<p><b>Phasage</b></p>	<p>Réalisation : année 2019-2020.</p>	
<p><b>Priorité</b></p>	<p>Haute</p>	

	<p><b>Communication</b></p> <p>Obligation de partage des données en cas d'aide publique</p>	<p><b>N° action</b></p> <p><b>COM 04</b></p>
<p><b>Objectif</b></p>	<p>Valoriser toutes les expériences même celles qui n'aboutissent pas.</p>	
<p><b>Résultats attendus</b></p>	<p>Enrichissement de la connaissance et du retour d'expérience au profit des projets ultérieurs.</p>	
<p><b>Action</b></p>	<p>Tout projet bénéficiant d'une aide financière des collectivités de la Réunion devra en contrepartie s'engager rendre publiques les données produites dans le cadre du projet :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>En cas d'abandon du projet</u>, les données seront transmises dans le mois qui suit la décision officielle d'abandon. La définition de l'abandon du projet devra être précisée lors du montage du projet.</li> <li>• <u>Lorsque le projet est conduit à son terme</u>, les données seront dues passé un délai à négocier entre le porteur de projet et la collectivité.</li> </ul> <p>Les données concernées sont celles relatives à la connaissance du milieu, à la conduite de projet, et aux travaux. Elles ne concernent pas les données propres à la technologie déployée ou aux détails de conception qui relèvent du secret industriel. Elles incluent ainsi : les données brutes d'investigations, de mesures, de suivi, les dossiers réglementaires déposés et les comptes-rendus d'intervention. Un rapport de synthèse du projet sera également fourni à titre de bilan.</p> <p>Les données seront transmises à la collectivité financeur ainsi qu'à l'organisme de référence décrit à la fiche action n° COM 03, qui se chargera de les diffuser.</p>	
<p><b>Acteurs</b></p>	<p>Région Réunion, EPCI, communes, Etat, Université.</p>	
<p><b>Phasage</b></p>	<p>Au fil des projets</p>	
<p><b>Priorité</b></p>	<p>Haute</p>	

**c) Actions de lobbysime et de réseau**

	<p><b>Lobbyisme et réseau</b></p> <p>Lobbyisme à l'échelle nationale</p>	<p><b>N° action</b></p> <p><b>LOB 01</b></p>
<p><b>Objectif</b></p>	<p>Faire entendre la voix de la Réunion dans les discussions nationales sur les énergies marines, et faire reconnaître les besoins spécifiques des Outre-Mers.</p>	
<p><b>Résultats attendus</b></p>	<p>Prise en compte de la Réunion (et des Outre-Mers en général) dans la feuille de route de l'Etat sur les appels d'offres nationaux (éolien flottant notamment), les appels à projet.</p> <p>Adaptation des mécanismes de rémunération de l'énergie produite par les énergies marines au contexte de la filière (distinguer l'hydraulique fluviale du houlomoteur) et au contexte des ZNI (prise en compte des ZNI dans les textes, prise en compte du SWAC, de l'ETM).</p>	
<p><b>Action</b></p>	<p>Intervention de la Région Réunion auprès des Ministères (de la transition écologique et solidaire, des Outre-Mers, de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation), auprès de la CRE.</p> <p>Intervention à l'Assemblée nationale.</p>	
<p><b>Acteurs</b></p>	<p>Région Réunion, Députés.</p>	
<p><b>Phasage</b></p>	<p>/</p>	
<p><b>Priorité</b></p>	<p>Haute</p>	

	<p><b>Lobbyisme et réseau</b></p> <p>Collaboration scientifique &amp; institutionnelle (nationale et internationale)</p>	<p><b>N° action</b></p> <p><b>RES 01</b></p>
<p><b>Objectif</b></p>	<p>Mutualiser les moyens et partager les compétences et les expériences.</p>	
<p><b>Résultats attendus</b></p>	<p>Réduire le temps de maturation et de développement des projets.</p>	
<p><b>Action</b></p>	<p>Travailler avec d'autres territoires sur des problématiques communes, à l'image de la collaboration établie entre les archipels d'Hawaii aux Etats Unis et d'Okinawa au Japon. Celle-ci porte sur plusieurs échelons d'acteurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gouvernemental, entre le Département de l'Energie des USA (DOE) et le Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie japonais,</li> <li>• Organismes publics nationaux : entre le laboratoire national des énergies renouvelables aux Etats Unis (NREL) et l'organisme de développement des énergies nouvelles et de l'industrie au Japon (NEDO),</li> <li>• Régionaux : Etat d'Hawaii et Préfecture d'Okinawa,</li> <li>• Universitaire,</li> <li>• Sociétés privées : entre la Compagnie Electrique Hawaïenne (HECO) et la Compagnie Electrique d'Okinawa (OKIDEN).</li> </ul> <p>Elle porte sur plusieurs thèmes : l'ETM et la valorisation économique des produits de l'eau profonde, l'efficacité énergétique en contexte tropical, les micro-grids en contexte insulaire, etc.</p> <p>Pour la Réunion, les thèmes à cibler et les régions partenaires potentielles sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energies marines &amp; autonomie énergétique en contexte insulaire : travaux menés par les îles Canaries, l'Ecosse, la Corée du Sud, la Chine, le Japon. Toutes ces zones disposent de centres de test d'énergies marines avec des prototypes avancés en mer, et mènent des expériences de réseaux d'énergie renouvelables isolés (île d'El Hierro aux Canaries, île de Eigg en Ecosse, île de Jeju en Corée du Sud, île de Shengshan en Chine, île Miyako à Okinawa).</li> <li>• Impact environnemental des énergies marines en contexte tropical : les archipels d'Hawaii ou des Canaries présentent des contextes très similaires.</li> <li>• Développement économique autour de l'eau profonde : Japon, Corée du Sud, Taiwan., Hawaii.</li> <li>• Innovation, recherche scientifique et développement économique : avec la Région Pays de la Loire par exemple.</li> <li>• Système houlomoteur intégré sur digue : avec le KRISO en Corée du Sud, ou l'île de Jeju qui dispose de 3 démonstrateurs en mer de 3 technologies distinctes.</li> </ul>	
<p><b>Acteurs</b></p>	<p>Région Réunion, Etat, Université de la Réunion, EDF.</p>	
<p><b>Phasage</b></p>	<p>A définir</p>	
<p><b>Priorité</b></p>	<p>Modérée</p>	

	<p><b>Lobbyisme et réseau</b></p> <p>Démarchage des concepteurs et porteurs de projets</p>	<p><b>N° action</b></p> <p><b>RES 02</b></p>
<p><b>Objectif</b></p>	<p>Faire connaître le potentiel de la Réunion en matière d'énergies marines aux concepteurs des technologies identifiées comme adaptées au territoire, accompagner les porteurs de projets intéressés.</p>	
<p><b>Résultats attendus</b></p>	<p>Développement de projets d'énergies marines sur le territoire.</p>	
<p><b>Action</b></p>	<p>Démarcher les concepteurs de technologies d'intérêt pour la Réunion et les porteurs de projets potentiels, les accompagner dans leur démarche de prospection (diffusion d'information, aiguillage vers les organismes ou personnes ressources).</p> <p>Sont notamment ciblés :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les développeurs et porteurs de projets d'éolien en mer flottant,</li> <li>• L'énergie thermique des mers et l'ensemble de ses applications,</li> <li>• Certaines technologies houlomotrices (voir SREMER).</li> </ul>	
<p><b>Acteurs</b></p>	<p>SPL Horizon Réunion</p>	
<p><b>Phasage</b></p>	<p>2019-2020</p>	
<p><b>Priorité</b></p>	<p>Modérée</p>	

**d) Actions de veille**

	<b>Veille</b> Veille scientifique et technique	<b>N° action</b> <b>VEI 01</b>
<b>Objectif</b>	Disposer de références actualisées.	
<b>Résultats attendus</b>	Connaître les technologies disponibles adaptées à l'île, les méthodes utilisées de par le monde et reproductibles en local.	
<b>Action</b>	Prolonger et maintenir la veille sur les sujets d'intérêt pour la Réunion : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energies marines en contexte insulaire,</li> <li>• Energies marines en contexte cyclonique,</li> <li>• Energies marines et environnement tropical : oiseaux marins, cétacés, etc,</li> <li>• Technologies : éolien flottant, ETM, houle, co-développement d'activités,</li> <li>• Travaux de R&amp;D de l'Université de la Réunion : flexibilité de l'électricité produite par ETM (labo PIMENT), océanographie et prévisions météorologiques, impact des événements extrêmes (Observatoire de l'Univers), biodiversité marine (labo ENTROPIE).</li> </ul>	
<b>Acteurs</b>	SPL Horizon Réunion	
<b>Priorité</b>	Faible	

	<b>Veille</b> Veille des projets en local	<b>N° action</b> <b>VEI 02</b>
<b>Objectif</b>	Identifier les projets qui peuvent présenter un potentiel de co-développement avec les énergies marines.	
<b>Résultats attendus</b>	Mutualiser le coût des équipements d'énergies marines avec d'autres usages.	
<b>Action</b>	Surveiller les projets en lien avec : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les ouvrages côtiers : digues, jetées, pontons, quais, fronts de mer urbains, bassins de baignades, protections littorales, etc.</li> <li>• Les aménagements portuaires,</li> <li>• Les réseaux et ouvrages de production de froid conséquents : entrepôts frigorifiques, établissements hospitaliers ou hôteliers, centres urbains, centrales thermiques, serveurs informatiques, etc.</li> <li>• L'aquaculture</li> </ul>	
<b>Acteurs</b>	SPL Horizon Réunion – Région Réunion	
<b>Priorité</b>	Faible	

**e) Actions d'étude**

	<b>Etudes</b> Soutien aux programmes de recherche océanographique à la Réunion	<b>N° action</b> <b>ETU 01</b>
<b>Objectif</b>	Amélioration de la connaissance	
<b>Résultats attendus</b>	Disposer de modèles locaux et de mesures pour simuler les climats de houle, les caractéristiques des masses d'eau, leur circulation, les événements extrêmes, et les enjeux de biodiversité marine liés aux énergies marines.	
<b>Action</b>	<p>Soutenir les programmes de recherche ou de suivi menés à la Réunion en lien avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• l'acquisition de mesures océanographiques (houle, courant, température de surface et de fond, vent au large), en privilégiant les mesures de long terme (1 an au moins),</li> <li>• le développement de modèles numériques océanographiques ou côtiers,</li> <li>• la connaissance des événements extrêmes,</li> <li>• la prévision météorologique en mer,</li> <li>• les enjeux biodiversité notamment cétacés, tortues, oiseaux marins,</li> <li>• la connaissance des usages du milieu marin, les pêcheries.</li> </ul> <p>Notamment, poursuivre les programmes de recherche locaux <b>CALHYCO</b> et <b>RENOVRISK</b>, qui s'intéressent aux interactions océan-atmosphère et aux interactions terre-mer. Leurs résultats sont des données exploitables pour les projets d'énergies marines.</p>	
<b>Acteurs</b>	Université de la Réunion	
<b>Priorité</b>	Haute	

	<b>Etudes</b> Affiner la connaissance du gisement d'énergies marines	<b>N° action</b> <b>ETU 02</b>
<b>Objectif</b>	Affiner la connaissance du gisement d'énergies marines.	
<b>Résultats attendus</b>	Disposer de données de mesures certifiées pour quantifier le gisement d'énergie sur les zones à potentiel identifiées au SREMER (les estimations effectuées à ce jour étant principalement basées sur des résultats de modèles). Identifier les sites exploitables pour y lancer des projets.	
<b>Action</b>	<p>Déploiement d'instrumentation en mer :</p> <p>Mise à l'eau de bouée(s) de mesure en mer sur une ou plusieurs zones d'intérêt, dans le cadre d'un suivi météo-océanique de longue durée permettant de caractériser le potentiel et les contraintes des zones identifiées.</p> <p>Une phase amont facilitatrice consistera à obtenir sur un site opportun l'ensemble des autorisations permettant par la suite la mise à l'eau rapide des instrumentations.</p>	
<b>Acteurs</b>	Région Réunion, France Energies Marines, Témergie. Partenaires : Commission de l'Océan Indien (projet de planification spatiale maritime 'Ocean Metiss' dont la Région Réunion est membre), Région Pays De La Loire, IFREMER, Université de la Réunion, Institut Bleu.	
<b>Phasage</b>	Consultation : 2020 Début des mesures : 2021, durée 2 ou 3 ans de mesures.	
<b>Priorité</b>	Données de vent : Haute Données de houle : Haute Faune pélagique (via mutualisation éventuelle avec d'autres projets) : Modérée Données courants marins : Faible Données température de l'eau : Faible	

	<b>Etudes</b> Etude éolien en mer et avifaune marine	<b>N° action</b> <b>ETU 03</b>
<b>Objectif</b>	Evaluer l'impact potentiel d'un parc éolien en mer sur les pétrels et puffins de la Réunion.	
<b>Résultats attendus</b>	Disposer d'éléments pour 1) analyser l'acceptabilité environnementale d'un projet d'éolien en mer, et dans l'hypothèse d'un projet, pour 2) adapter la conception du parc et son exploitation selon la démarche éviter/réduire/compenser. Les résultats seront intégrés aux travaux de planification spatiale marine.	
<b>Action</b>	Lancer une étude afin de mieux connaître les comportements de vol des pétrels et puffins de la Réunion, notamment les hauteurs de vol en haute mer et à l'approche du littoral, afin d'évaluer l'impact potentiel d'un parc éolien sur ces espèces.	
<b>Acteurs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encadrement de l'étude : Société d'Etudes Ornithologique de la Réunion, laboratoire Entropie,</li> <li>• Accompagnement technique : France Energies Marines, SPL Horizon Réunion, industriel de l'éolien ?</li> <li>• Financeurs potentiels : Grand Port Maritime de la Réunion, Région Réunion.</li> </ul>	
<b>Phasage</b>	Préparation : 2019 Réalisation : 2020-2021.	
<b>Priorité</b>	Haute	

	<b>Etudes</b> Etude éolien en mer et pêche	<b>N° action</b> <b>ETU 04</b>
<b>Objectif</b>	Evaluer l'impact potentiel d'un parc éolien en mer sur les pêcheries de la Réunion.	
<b>Résultats attendus</b>	Disposer d'éléments pour 1) analyser l'acceptabilité sociale d'un projet d'éolien en mer, et dans l'hypothèse d'un projet, pour 2) adapter la conception du parc et son exploitation selon la démarche éviter/réduire/compenser.	
<b>Action</b>	Effectuer une analyse socio-économique de la filière pêche dans les zones propices à l'éolien en mer. Cette étude devra : <ul style="list-style-type: none"> <li>• décrire les pratiques de pêche professionnelle existant sur les zones d'étude,</li> <li>• analyser la fréquentation des navires sur les zones étudiées,</li> <li>• estimer et analyser la production issue des zones étudiées,</li> <li>• évaluer la dépendance économique des navires aux zones.</li> </ul>	
<b>Acteurs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partenaires : IFREMER, CRPMEM, INSEE, Région Réunion, France Energies Marines, etc.</li> <li>• Financier potentiel : porteur du projet éolien.</li> </ul>	
<b>Phasage</b>	En fonction des projets éolien en mer proposés.	
<b>Priorité</b>	Haute	

**f) Projets à lancer**

	<b>Projets</b> Valorisation de l'eau profonde du SWAC du CHU de Saint-Pierre	<b>N° action</b> <b>PRO 01</b>
<b>Objectif</b>	Valoriser une ressource à haute valeur ajoutée et rendue disponible grâce au SWAC.	
<b>Résultats attendus</b>	Création d'emplois, diversification économique.	
<b>Action</b>	Etudier l'opportunité et la faisabilité de valorisation de l'eau de mer profonde pompée pour le SWAC. L'étude pourra par exemple : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réfléchir à l'articulation avec :               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) le projet de SWAC porté par le CHU,</li> <li>2) le projet de valorisation sur Bois-Rouge, de manière à ce que ces trois projets ne soient pas en compétition les uns avec les autres ou ne se freinent entre eux. L'eau disponible à Saint-Pierre pourrait notamment constituer une première étape test ou tremplin avant un déploiement de plus grande envergure à Bois-Rouge.</li> <li>3) le projet de centre de recherche, innovation et formation dédié aux énergies marines (PEMER – voir fiche PRO 04).</li> </ol> </li> <li>• Identifier les conditions technico-économiques de mise à disposition de l'eau : applications envisageables, espace disponible, mode de livraison de l'eau, tarif de vente, etc.</li> <li>• Identifier et approcher des porteurs de projet.</li> </ul>	
<b>Acteurs</b>	CHU, Région, Université, SPL Horizon Réunion	
<b>Phasage</b>	Une fois le SWAC mis en service : à partir de 2022.	
<b>Priorité</b>	Modérée	

	<b>Projets</b> Espace d'accueil et de sensibilisation énergies marines et biodiversité	<b>N° action</b> <b>PRO 02</b>
<b>Objectif</b>	Aménager les terrains littoraux face au CHU de Saint-Pierre.	
<b>Résultats attendus</b>	Sensibilisation pédagogique	
<b>Action</b>	Sur le terrain appartenant au Conservatoire du Littoral (voir Figure 130 ci après), créer un espace d'accueil et de sensibilisation autour : <ul style="list-style-type: none"> <li>• De la biodiversité, dans la continuité de ce qui est réalisé par le Conservatoire du Littoral,</li> <li>• Des énergies marines, avec un focus sur le SWAC du CHU, le prototype à terre ETM de l'IUT de Saint-Pierre et l'énergie thermique des mers en général.</li> </ul> Cette action pourrait constituer une mesure compensatoire du projet.	
<b>Acteurs</b>	Conservatoire du Littoral (propriétaire foncier), CIVIS (gestionnaire du site), CHU, Région.	
<b>Phasage</b>	En fonction du calendrier du projet de SWAC (mise en service prévue en 2022).	
<b>Priorité</b>	Basse	

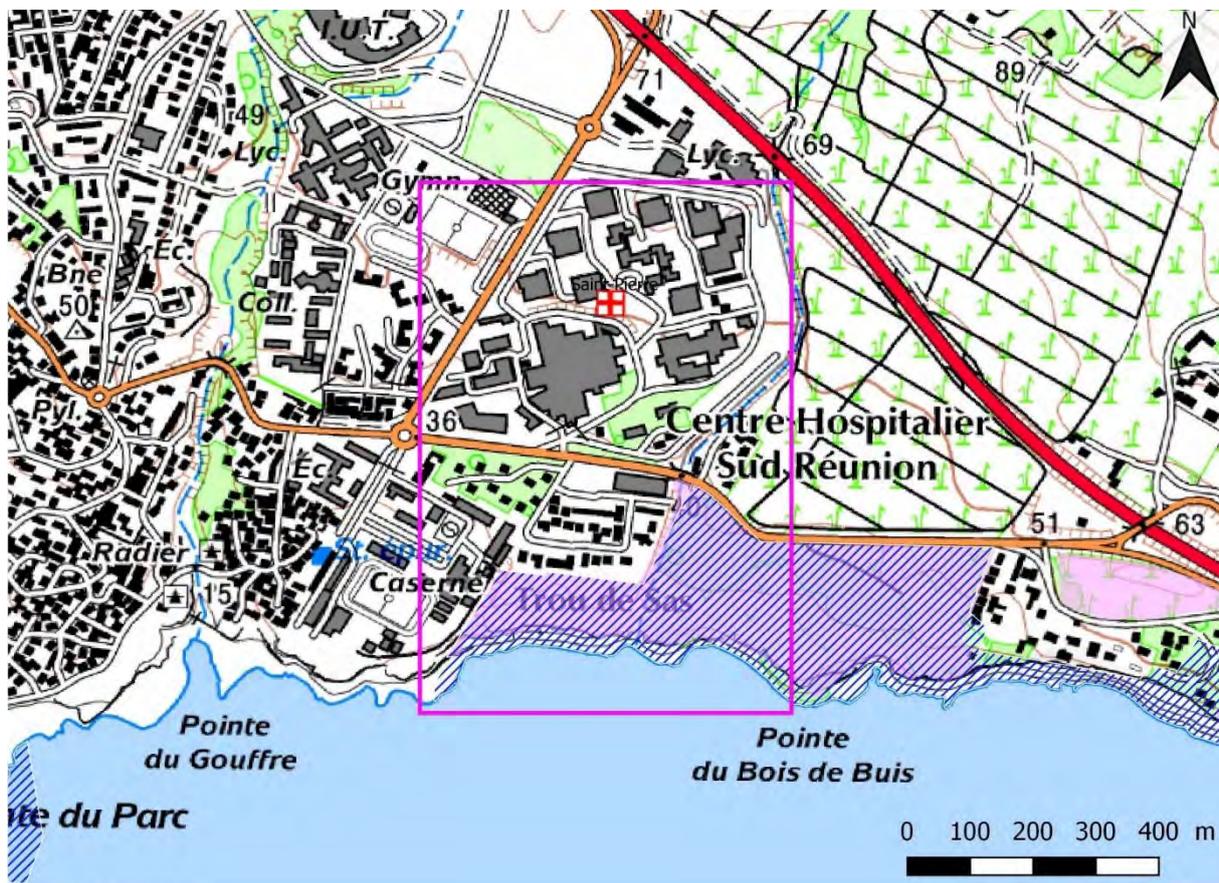


Figure 130 : parcelles du Conservatoire du Littoral à proximité du CHU de Saint-Pierre

	<p><b>Projets</b></p> <p>Centre de recherche, formation et innovation dédié aux EMR (PEMER)</p>	<p><b>N° action</b></p> <p><b>PRO 03</b></p>
<p><b>Objectif</b></p>	<p>Développer des solutions techniques adaptées au territoire réunionnais, disposer de compétences locales.</p>	
<p><b>Résultats attendus</b></p>	<p>Création ou implantation à la Réunion d'acteurs économiques spécialisés Mise en place d'activités de recherche-développement et de formation</p>	
<p><b>Action</b></p>	<p>Création d'un centre de recherche, formation et innovation dédié aux EMR à destination des acteurs publics et privés, situé en bord de mer, dans la zone de l'Ecocité. Les thématiques visées sont : l'éolien en mer, l'énergie thermique des mers et les modes de valorisation durable de l'eau profonde, la thalasso/hydromarée thermie, le houlomoteur, les métiers de la mer.</p>	
<p><b>Acteurs</b></p>	<p>GIP Ecocité, Région Réunion, Université.</p>	
<p><b>Phasage</b></p>	<p>Projet inscrit au Contrat de Transition Ecologique Ecocité. Etude de définition prévue en 2019/2020</p>	
<p><b>Priorité</b></p>	<p>Haute</p>	

	<p><b>Projets</b></p> <p>Appel à manifestation d'intérêt pour un dispositif houlomoteur</p>	<p><b>N° action</b></p> <p><b>PRO 04</b></p>
<p><b>Objectif</b></p>	<p>Réaliser une production d'énergie marine de petite envergure, réalisable à court terme.</p>	
<p><b>Résultats attendus</b></p>	<p>Déploiement d'un démonstrateur raccordé au réseau.</p>	
<p><b>Action</b></p>	<p>Lancer un appel à manifestation d'intérêt international, sur un ou plusieurs sites identifiés, en visant des technologies déjà éprouvées par ailleurs (reproductibilité du projet).</p>	
<p><b>Acteurs</b></p>	<p>Région.</p>	
<p><b>Phasage</b></p>	<p>D'ici 2025</p>	
<p><b>Priorité</b></p>	<p>Modérée</p>	

## 2.3. Conclusion partie 2 : les défis à relever

Avec un potentiel en énergies marines situé :

- Pour l'éolien en mer, sur deux zones, au Nord et au Sud de l'île,
- Pour l'énergie thermique des mers, plus ou moins sur tout le littoral,
- Pour l'énergie de la houle, dans la partie Sud de l'île pour des parcs en mer, plus éventuellement sur le reste de l'île avec des projets intégrés à des aménagements côtiers.

la Réunion dispose d'une ressource en énergie renouvelable et locale qui pourrait contribuer aux objectifs de transition énergétique de l'île. De plus, la filière énergies marines peut également constituer un levier de développement (économie bleue).

Encore peu répandues, ces technologies sont coûteuses, du moins dans un premier temps. Néanmoins, des pistes d'optimisations existent. Première piste, certains équipements (conduite, plateforme, bouée, digue) peuvent être partagés avec d'autres projets ou pour d'autres usages (recherche, aquaculture, aménagement côtier). Deuxième piste, les investisseurs privés pourraient voir l'île comme un site stratégique pour valider des technologies adaptées aux marchés insulaire tropical et cyclonique.

Pour se positionner comme tel, le territoire dispose de nombreux partenaires techniques, scientifiques et institutionnels sur lesquels s'appuyer et qu'il convient de mobiliser. Le profil des maîtres d'ouvrages potentiels varie selon la filière d'énergie marine considérée, mais dans tous les cas, l'implication de la puissance publique sera nécessaire à la réussite du projet.

Pour faire naître de tels projets, l'implantation des énergies marines à la Réunion doit être anticipée et accompagnée. Tout d'abord, la planification spatiale à l'échelle terrestre et maritime devra déverrouiller les freins réglementaires, anticiper les conflits d'usages et préparer l'installation d'activités et d'ouvrages structurants pour le territoire. Ensuite, la communication devra attirer les porteurs de projets, mettre en réseau les acteurs, et créer des synergies. En parallèle, il faudra, par un travail de lobbysime, obtenir des conditions législatives, réglementaires et financières plus incitatives envers les énergies marines, à la hauteur des enjeux auxquels font face les territoires insulaires. Le travail de veille et la poursuite des actions de R&D en local apporteront des réponses techniques aux défis d'ordre opérationnels. Enfin, concrétiser certains projets en cours ou naissants (SWAC du CHU, Bois-Rouge, PEMER) permettra de sécuriser la filière et d'ouvrir la voie à un plus ample développement.

## Conclusion et perspectives

	Eolien en mer flottant	Energie thermique des mers	Energie de la houle
<b>Intérêt</b>	Machines de fortes puissance : ressource significative à l'échelle des besoins de l'île	Energie renouvelable disponible 7j/7 24h/24	Energie renouvelable et prévisible (gestion du réseau électrique plus facile que le photovoltaïque)
<b>Technologies</b>	Opérationnelles Appel d'offre national attribué en métropole	Pour la climatisation : opérationnel mais encore peu répandu sous les tropiques  Pour l'électricité : stade R&D – prototypes	Produits très nombreux et très diversifiés à choisir au cas par cas selon le site
<b>Potentiel brut de l'île</b>	Localisé en 2 zones au Nord et Sud de l'île Puissance : ≈100 MW à plusieurs GW	Potentiel autour de la quasi-totalité du littoral de l'île Puissance froid : 7 à 20 MW	Potentiel plus élevés sur la moitié Sud de l'île. Puissance : 1 à 5 MW (10 à 100 kW unitaire)
<b>Objectifs visés d'ici 2030</b>	Au moins 1 parc de plusieurs unités alimentant le réseau.	Valoriser la ressource disponible : mise en service du SWAC du CHU (2022), puis réalisation d'autres SWAC (Ecocité ? Aéroport Roland Garros ?)  Améliorer la rentabilité des projets énergétiques grâce à l'exploitation commerciale de l'eau profonde : Bois-Rouge, CHU Saint-Pierre.	Au moins une centrale pilote reliée au réseau (parc en mer ou centrale intégrée sur le trait de côte)
<b>Actions à mener par filière</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planification spatiale marine,</li> <li>Préparation du Grand Port Maritime de la Réunion,</li> <li>Mesures en mer,</li> <li>Etudes environnementales,</li> <li>Démarchage de partenaires et accompagnement des acteurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planification spatiale (activités, besoin en froid),</li> <li>Soutien aux projets : CHU Saint-Pierre, Bois-Rouge...</li> <li>Démarchage de partenaires et accompagnement des acteurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Appel à manifestation d'intérêt,</li> <li>Etude de site – mesures,</li> <li>Recherche de partenaires,</li> <li>Veille technologique.</li> </ul>
<b>Actions transversales à mener</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lobbying auprès des instances nationales pour une visibilité sur la filière (tarifs de rachat &amp; mécanismes de soutien, calendrier d'appels d'offres, etc.) et la prise en compte des spécificités des outre-mers,</li> <li>Centre de recherche, formation, innovation dédié aux EMR,</li> <li>Communication, mise en réseau, partenariat &amp; coopération.</li> </ul>		

## Remerciements

Ce document n'aurait pu voir le jour sans l'implication de Rémy Durand et Laurent Bridier (Région Réunion).

La SPL Energies Réunion remercie chaleureusement l'ensemble des organismes ayant participé à la consultation. Ont notamment contribué à ce document, en prenant le temps d'échanger avec nous :

- Magali Duval – IFREMER,
- Jean-Frédéric Laurent et Priscille Labarrère - Grand Port Maritime de la Réunion,
- Benoît Herlemont, Préfecture de la Réunion,
- Esteban Payet - Aéroport Roland Garros la Réunion,
- Emmanuel Rivière- Centre Hospitalier Sud Réunion,
- Bastien Lumet- Direction de la Mer Sud Océan Indien, Phares et balises,
- Laurent Fontaine - commune de Saint-Philippe,
- Pascal Hoarau et Sébastien Hermann – CIVIS,
- Laetitia Hoarau – commune de Petite-Ile,
- Anne Zimmerman – commune de la Possession,
- Olivier Parmentier – TCO,
- Anne-Lise Vernichon – SPLA Maraina,
- Frédéric Albaret et Camille Ramaye – CINOR,
- Grégory Pavady – commune de Saint-André,
- Abdelhak Ait Si – EDF,
- Pauline Teillac-Deschamps – UICN,
- Yann Hervé de Roeck & Jean-François Filipot - France Energies Marines,
- Thomas Imbard - Naval Energies,
- Gaël Vallée – Quadran,
- Franck-Antoine Peretti – Nérée,
- Daehyun Kim & Jong Youn Kim – INGINE,
- François-Xavier Couzi - SEOR,
- Laurent Mouysset, Julie Martin & Violaine Dulau – Association GLOBICE,
- Université de la Réunion :
  - Jean Castaing-Lasvignottes, Directeur adjoint UMR PIMENT & responsable de l'équipe de recherche « énergies durables ».
  - Alexandre Refait, responsable des essais sur le prototype à terre ETM.
  - Emmanuel Cordier, Observatoire des Sciences de l'Univers de la Réunion.
  - Mathieu Le Corre, Directeur adjoint UMR ENTROPIE.
  - Olivier Bousquet, Directeur adjoint UMR LACY & responsable de l'équipe de recherche « cyclones ».
- Pierre Magnin - Association Nérée,

Enfin, un remerciement au Dr Erwann Lagabriele de l'Université de la Réunion, qui a été à l'initiative de l'analyse spatiale en logique floue pour la cartographie des zones potentielles. Et bien sûr, merci à Audrey Picaudou, stagiaire Master 2 RNET de l'Université de la Réunion, qui a réalisé avec rigueur et abnégation l'ensemble du travail SIG en logique floue.

# Bibliographie

## *Sites de test et centres de recherche sur les énergies marines*

European Marine Energy Center (EMEC). Adresse URL : <http://www.emec.org.uk/>

Plataforma Oceánica de Canarias (PLOCAN). Adresse URL : <http://www.plocan.eu>

Biscay Marine Energy Platform (BIMEP). Adresse URL : <http://bimep.com>

FabTest site. Adresse URL : <http://www.fabtest.com/>

Wave Hub Test site. Adresse URL : <https://www.wavehub.co.uk>

University of Exeter. Renewable Energy Research. Test Facilities and capabilities. Adresse URL : <http://emps.exeter.ac.uk/renewable-energy/research/research-interests/offshore/reliability/facilities/>

Galway Bay 1/4 scale wave test site. Marine Institute of Ireland. Adresse URL : <https://www.marine.ie/Home/site-area/infrastructure-facilities/ocean-energy/galway-bay-test-site-0>

Site d'Expérimentation en Mer SEM-REV. Ecole Centrale de Nantes. Adresse URL : <https://sem-rev.ec-nantes.fr>

Site d'expérimentation hydrolien de Bordeaux : <http://seeneoh.com/index.html>

Lysekil Wave energy Research Center. Uppsala University (Suède). Adresse URL : <http://www.teknik.uu.se/electricity/research-areas/wave-power/lysekil/>

Danish Wave Energy Center (DanWEC). Adresse URL : <http://www.danwec.com/>

Fundy Ocean Research Center for Energy (FORCE), Canada. Adresse URL : <http://fundyforce.ca/>

Northwest National Marine Renewable Energy Center (NNMREC). Oregon State University. Adresse URL : <http://nnmrec.oregonstate.edu/testing>

NAVFAC Wave Energy Test Site (WETS). Hawaii National Marine Renewable Energy Center. Adresse URL : <http://hinmrec.hnei.hawaii.edu/nmrec-test-sites/wave-energy-test-site/>

Institute of Ocean Energy, Saga University (IOES), Japon. Adresse URL : <http://www.ioes.saga-u.ac.jp/en/>

School of Marine Science and Technology, Tianjin University (Chine). Adresse URL : [http://www.tju.edu.cn/marine/en/kxyj/kvid/201505/t20150515\\_255811.html](http://www.tju.edu.cn/marine/en/kxyj/kvid/201505/t20150515_255811.html)

Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Science. Adresse URL : <http://english.giec.cas.cn>

National Institute of Ocean Technology (NIOT), Inde. Adresse URL : <https://www.niot.res.in/>

## *Données générales énergies marines renouvelables*

Base de données SIG sur les EMR de l'Ocean Energy Systems. Consulté le 20 mars 2018. Adresse URL : <https://www.ocean-energy-systems.org/ocean-energy-in-the-world/gis-map/>

Observatoire des Energies Renouvelables (2018). *Le Baromètre 2017 des énergies renouvelables électriques en France*. Filière énergies marines renouvelables, p 84-94.

Conseils Economiques, Sociaux et Environnementaux de l'Atlantique (2017). *Innovation et économie maritime : un océan d'opportunités pour les régions de la façade atlantique française*. Juin 2017, 80 pages.

Ocean Energy System (2017). *Annual report 2016*, 188 p.

Ocean Energy System (2015). *International levelised cost of energy for ocean energy technologies*. Final version, 28th May 2015, 48 p.

Observatoire des énergies de la mer (2017). *Les énergies de la mer : une réalité industrielle, une dynamique collective*. Rapport #1 mars 2017, 67 p.

CAQUOT E., CLEMENT P., de LA COCHETIERE L., BOYE, H., NATAF J-M., SERGENT P. (2013). *Rapport de la mission d'étude sur les énergies marines renouvelables*. Rapport au ministre du redressement productif, à la ministre de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, au ministre délégué auprès de la ministre de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, chargé des transports, de la mer et de la pêche. 104 p.

S. Wang, P. Yuan, D. Li, Y. Jiao (2011). *An overview of ocean renewable energy in China*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15. P 91–111. Doi:10.1016/j.rser.2010.09.040

Q. Guodong, L. Ping, W. Xianglian (2013). *Development of Ocean Energy Technologies: A Case Study of China*. Advances in Mechanical Engineering Volume 2013, Article ID 941781, 6 pages. Doi : 10.1155/2013/941781

Y-L. Zhang, Z. Lin, Q-L Liu (2014). *Marine renewable energy in China : current status and perspectives*. Water Science and Engineering, 7(3) : 288-305. Doi : 10.3882/j.issn. 1674-2370.2014.03.005

### Houlomoteur

Base de donnée en ligne de l'EMEC, qui cartographie les projets houlomoteurs et hydroliens passés, en cours et en projet en Grande Bretagne, consulté en janvier 2018, adresse URL : <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-and-tidal-projects/>

A. Babarit (2016). *Introduction à la récupération de l'énergie des vagues*. Présentation. Laboratoire d'Hydrodynamique, d'Énergétique et d'Environnement Atmosphérique (LHEEA), CNRS UMR 6598, Ecole Centrale de Nantes. Octobre 2016, 84 diapositives.

A. F.O. Falcão, J. C.C. Henriques (2016). *Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review*. Renewable Energy Journal, Volume 85, January 2016, Pages 1391-1424. Editions Elsevier. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.086>

J.R. Joubert, J.L. Van Niekerk, J. Reinecke, I. Meyer (2013). *Wave Energy Converters (WECs)*. Center for Renewable and Sustainable Energy Studies (South Africa). 95 p.

FB Van Cleve FB., Judd C., Radil A., Ahmann J., Geerlofs SH. (2013). *Geospatial analysis of technical and economic suitability for renewable ocean energy development on Washington's outer coast*. Prepared for the U.S. Department of Energy under contract DE-AC05-76RL01830. Reference n°PNNL-22554. June 2013, 71 p.

M. L. Spaulding, A. Grilli, C. Damon, and G. Fugate (2010). *Application of technology development index and principal component analysis and cluster methods to ocean renewable energy facility siting for the Rhode Island Ocean Special Area Management Plan 2010*. Technical Report #16. Feb 2010, 36 p.

Mørk G et al (2010). *Assessing the global wave energy potential*. In Proceedings of OMAE2010 (ASME), 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Shanghai, China. 8 p.

### Hydrolien

Base de donnée en ligne de l'EMEC, qui cartographie les projets houlomoteurs et hydroliens passés, en cours et en projet en Grande Bretagne, consulté en janvier 2018, adresse URL : <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-and-tidal-projects/>

Energies de la Lune (2017). Etude de marché de l'hydrolien. Synthèse partielle - version française. 17 p. Disponible à l'adresse URL : [http://seeneoh.com/brochures/etude\\_marche\\_hydrolien\\_2017.pdf](http://seeneoh.com/brochures/etude_marche_hydrolien_2017.pdf)

Quankun Xu, Wei Li, Yonggang Lin, Hongwei Liu, Yajing Gu (2016). Investigation of the performance of a stand-alone horizontal axis tidal current turbine based on in situ experiment. Ocean Engineering, Volume 113, 1 February 2016, Pages 111-120. Adresse URL : <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.12.051>

## Energie thermique des mers

Site de l' « Institute of Ocean Energy » de l'Université de Saga au Japon (IOES). Adresse URL :

[https://www.ioes.saga-u.ac.jp/en/facilities/ioes\\_facilities](https://www.ioes.saga-u.ac.jp/en/facilities/ioes_facilities)  
[http://www.ioes.saga-u.ac.jp/english/about\\_lab\\_02.html#s\\_02](http://www.ioes.saga-u.ac.jp/english/about_lab_02.html#s_02)

Site de la société hawaïenne Makai Ocean Engineering, consulté en janvier 2018. Adresse URL :

<https://www.makai.com>

Site du « Hawaii National Marine Renewable Energy Center », consulté en janvier 2018. Adresse URL :

<http://hinmrec.hnei.hawaii.edu/nmrec-test-sites/nelha-site/>

Site du « Natural Energy Laboratory Of Hawaii Authority » (NELHA), consulté en février 2018. Adresse URL :

<http://nelha.hawaii.gov/>

Site de la « Deep Ocean Water Application Society » (DOWAS), consulté en février 2018. Adresse URL :

<http://www.dowas.net/english/index.html>

### Energie thermique des mers :

P. Marchand (1984). « Energie Thermique des Mers - Evaluation pour la Commission des Communautés Européennes », préparé pour la CCE, Direction Générale de l'Energie, réf EUR 9895 FR, mai 1984.

M. Porcher (2014). *EMR en Polynésie française : Le système de climatisation de l'Hôtel « Intercontinental Bora Bora Resort and Thalasso Spa »*. IFRECOR. Séminaire UICN : Energies Marines Renouvelables et Biodiversité en Outre-Mer, 27 octobre 2014 – Guadeloupe. 24 diapositives.

CREOCEAN (2012). *Créocéan et l'énergie thermique marine : Sea Water Air Contionning*. Rencontres « Clean Tuesday », La Rochelle, 7 Février 2012. 18 diapositives.

Y. Ikegami (2015). *OTEC Potential and Activity for Islands in the Asia & Pacific*. Institute of Ocean Energy of Saga University, Japan. Conférence « Island energy transitions: pathways for accelerated uptake of renewables », Martinique, 22-24 June 2015, 59 diapositives.

Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (2017). *OTEC Power, research and implementation by the Korean Government : Case study of a 1 MW power plant for the Republic of Kiribati*. 37 diapositives. Disponible sur :

[https://ifm.org.uk/wp-content/uploads/2017/05/Mark-Day-KRISO\\_OTEC\\_Presentation\\_April\\_2017-1.pdf](https://ifm.org.uk/wp-content/uploads/2017/05/Mark-Day-KRISO_OTEC_Presentation_April_2017-1.pdf)

Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority (2016). *2017 Annual Report*. 48 p.

US Department of Energy. Building Catalog: Case Studies of High Performance Buildings, Hawaii Gateway Energy Center, adresse URL : <https://buildingdata.energy.gov/project/hawaii-gateway-energy-center>

### Valorisation de l'eau froide profonde :

Site de l'association japonaise de valorisation de l'eau profonde (Deep Ocean Water Association), consulté en mars 2018. Adresse URL : <http://dowas.net/english/>

Site du centre de recherche sur l'eau profonde de la Préfecture d'Okinawa (Japon), consulté en mars 2018.

Adresse URL: <http://otecokinawa.com>

Muroto Deep Sea Water Aqua Farm, consulté en mars 2018. Adresse URL :

<https://www.japanhoppers.com/en/shikoku/muroto/kanko/532/>

Site du centre de valorisation de l'eau profonde de la Préfecture de Toyama (Japon), consulté en mars 2018.

Adresse URL: <http://t-deepsea.jp/en>

Clients du parc d'entreprise du NELHA, consulté en mars 2018. Adresse URL : <http://nelha.hawaii.gov/our-clients/>

University of Hawaii Economic Research Organisation (2015). *Economic impact of the Natural Energy Laboratory Of Hawaii Authority tenants on the State of Hawaii*. 12 p.

Y. Ikegami, K. Furugen (2013). *100 kW CC-OTEC Plant and Deep Ocean water Applications in Kumejima, Okinawa, Japan*. Institute of Ocean Energy of Saga University & Department of Commerce, Industry and Labor of Okinawa Prefectural Government. Asia Pacific Clean Energy Summit & Expo, Hawai'i Convention Center Honolulu, HAWAII, USA, September 10, 2013, 19 diapositives.

K. Yamada (2017). *DOW Use Promotion Committee 2017, Hokkaido Convention Report*. Dowas News 2017 Vol.20 No.2, p 3-6.

K. Washiashi (2017). *Oyster cultivation method utilizing deep ocean water, Patent acquisition*. Dowas News 2017 Vol.20 No.2, p 1-2.

M. Takahashi (2017). *On participation in the 4th Korean international DOW symposium*. Dowas News 2017 Vol.20 No.2, p 10-13.

T. Nakasone, S. Akeda (2001). *The application of deep-sea water in Japan*. UJNR Technical Report No. 28, December 2000, p 69-75.

T. Yamaguchi, et all. (2003). *Deep-sea water suction technology*. 75-80.

K. Kamikawa et all. (2007). *Research on current state of use of deep sea water and its effectiveness in hygiene-managed fishing port*. Proceedings of civil engineering in the ocean, Volume 23, Pages 961-966. DOI : <https://doi.org/10.2208/prooe.23.961>

O. Ryui et al. (2013). *New goods produced by using deep sea water in Toyama Bay - An Example of University Laboratory*. Deep Ocean Water Research Vol. 14 No.2. Contents 17th Annual Meeting in Hualien of TAIWAN, pp 59.

J-Y. Li (2017). *Recent Development of Deep Ocean Water in Taiwan*. Consulté en mars 2018 à l'adresse URL : [http://www.dowas.net/paper/pdf/18-2/04\\_p59.pdf](http://www.dowas.net/paper/pdf/18-2/04_p59.pdf)

Taipei Times (2012). *Hualien deep sea water park opens*. 13 février 2012. Consulté en mars 2018 à l'adresse URL : <http://www.taipetimes.com/News/taiwan/archives/2012/02/13/2003525369>

Oscar Chung (2013). *Thriving on Nature*. Taiwan Today, 1<sup>er</sup> juin 2013. Consulté en mars 2018 à l'adresse URL : <https://taiwantoday.tw/news.php?unit=12&post=23721>

#### **Thalassohermie / pompe à chaleur sur eau de mer / hydromaréthermie :**

Site de la transition énergétique de la principauté de Monaco, consulté le 28/02/2018. Adresse URL : [http://transition-energetique.gouv.mc/Les-energies-renouvelables-a-Monaco#eztoc4884343\\_2](http://transition-energetique.gouv.mc/Les-energies-renouvelables-a-Monaco#eztoc4884343_2)

M-J. SADER (2012). *De l'eau de mer pour chauffer des habitations*. Actu-Environnement, 27 décembre 2012, en ligne. Consulté le 28/02/2018. Adresse URL : <https://www.actu-environnement.com/ae/news/pompe-chaleur-eau-mer-immeuble-collectif-17408.php4>

P. NUNES (2010). *Pompe à chaleur sur eau de mer pour 54000 m<sup>2</sup> à la Seyne/Mer*. Société XPAIR. 01/02/2010. En ligne, consulté le 28/02/2018. Adresse URL : [https://conseils.xpair.com/actualite\\_experts/pompe\\_chaleur\\_eau\\_mer.htm](https://conseils.xpair.com/actualite_experts/pompe_chaleur_eau_mer.htm)

EDF Solutions Énergétiques (2017). *Massileo, le réseau d'énergies renouvelables intelligent*. Plaquette de présentation. Adresse URL : <http://www.massileo.fr/massileo/ressources/documents/1/4942dad-4899-Plaquette-Massileo-octobre-2017.pdf>

Engie (2016). *Thassalia : inauguration de la première centrale française de géothermie marine*. Article en ligne du 18/10/2016. Adresse URL : <https://www.engie.com/journalistes/communiqués-de-presse/thassalia/>

ADEME Corse (2015). *Pompes à chaleur sur eau de mer pour 9 villas BBC du village vacances U Livanti à Propriano (2A)*. Plaquette « les exemples à suivre à Corse ». 2 p.

The Government of the Hong-Kong Special Administrative Zone. The Electrical and Mechanical Department. Energy efficiency and conservation. Water-Cooled Air Conditioning systems. Adresse URL : [https://www.emsd.gov.hk/en/energy\\_efficiency/water\\_cooled\\_air\\_conditioning\\_system/index.html](https://www.emsd.gov.hk/en/energy_efficiency/water_cooled_air_conditioning_system/index.html)

CEREMA Ouest. *Système de climatisation et réseaux de froid*. 6 p.

## Eolien en mer

Global Offshore Wind Farms Database. Consulté le 15 février 2018. Adresse URL : <http://www.4coffshore.com/offshorewind/>

European Wind Energy Association (2013). *Deep Water, The next step for offshore wind energy*. ISBN: 978-2-930670-04-1. 51 p. Disponible sur : [www.ewea.org/report/deep-water](http://www.ewea.org/report/deep-water)

Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer (2016). *Note technique du 11/07/16 relative aux mesures de sécurité maritime applicables à la planification d'un champ éolien en mer*. BO du MEEM n° 2016/15 du 25 août 2016.

National Renewable Energy Laboratory (2016). *Floating offshore wind in Hawaii: potential for jobs and economic impacts from two future scenarios*. Strategic Partnership Project Report NREL/TP-5000-65481. April 2016, 28 p.

National Renewable Energy Laboratory (2016). *2016 Offshore Wind Energy Resource Assessment for the United States*. Technical Report NREL/TP-5000-66599. September 2016, 88 p.

Vergnet Eolien. *Fiche technique GEV MP C 200 kW - 225 kW - 250 kW - 275 kW*. 8 p.

Jan Dodd (2016). *Weathering the storms*. Wind Power Monthly, 30/11/2016. Consulté le 15 mars 2018. Adresse URL : <https://www.windpowermonthly.com/article/1416807/weathering-storms>

Site du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Politiques publiques, Eolien en mer. Article du 1<sup>er</sup> février 2017, consulté le 10/04/2018 à l'adresse URL : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/eolien-en-mer#e4>

C. Britz (2018). *Eolien offshore : Le gouvernement veut revoir les appels d'offres attribués*. Mer et Marine, Publié le 12/03/2018, consulté en ligne le 10/04/2018 à l'adresse URL : <https://www.meretmarine.com/fr/content/eolien-offshore-le-gouvernement-veut-revoir-les-appels-doffres-attribues>

J-C Féraud (2018). *Macron remet du vent dans les pales de l'éolien en mer*. Libération, publié le 20 juin 2018, disponible en ligne à l'adresse URL : [http://www.liberation.fr/france/2018/06/20/macron-remet-du-vent-dans-les-pales-de-l-eolien-en-mer\\_1660710](http://www.liberation.fr/france/2018/06/20/macron-remet-du-vent-dans-les-pales-de-l-eolien-en-mer_1660710)

Schwartz, M., D. Heimiller, S. Haymes, W. Musial, W. 2010. *Assessment of Offshore Wind Energy Resources for the United States (Technical Report)*. NREL-TP-500-45889. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (US). Adresse URL : <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/45889.pdf>

Lu, X.; McElroy, M.; Kiviluouma, J. (2009). *Global potential for wind-generated electricity*. Harvard University. Proceedings of the National Academy of Science of the USA, July 7, 2009 106 (27) 10933-10938. DOI : <https://doi.org/10.1073/pnas.0904101106>

Réseau d'Informations et de Conseil en Économie des Pêches (2018). *Projet de parc éolien en mer au large de Dieppe et Le Tréport. Dossier spécial : étude socio-économique sur la pêche professionnelle locale*. Mars 2018, 32 pages.

## Osmose inverse

REDStack (2014). *Blue Energy Developments on Afsluitdijk Test facility for RED*. Dutch Power Meeting - Session Blue Energy, march 2014, 42 diapositives.

S. Patel (2014). *Statkraft Shelves Osmotic Power Project*. PowerMag. 03/01/2014. Adresse URL : <http://www.powermag.com/statkraft-shelves-osmotic-power-project/?printmode=1>

Power Technology. *Statkraft osmotic power plant, the first osmotic power or salinity gradient power generation plant*. Adresse URL : <https://www.power-technology.com/projects/statkraft-osmotic/>

M. Tedesco, C. Scalici, D. Vaccari, A. Cipollina, A. Tamburini, G. Micale, (2016). "Performance of the first Reverse Electrodialysis pilot plant for power production from saline waters and concentrated brines", J. Membrane Science 500, p 33–45.



## STEP marine

Le Vif (2014). *L'atoll énergétique en Mer du Nord pour 2019*. 17/11/14. Consulté le 28/03/2018 à l'adresse URL : <http://www.levif.be/actualite/belgique/l-atoll-energetique-en-mer-du-nord-pour-2019/article-normal-351315.html>

Ecorem (2013). *Het Energieatol – Energieopslag in de Noordzee*. Waterbouwdag (Journée de l'ingénierie hydraulique) 26 novembre 2013. 39 diapositives.

M. Geuss (2017). *German institute successfully tests underwater energy storage sphere*. ARS Technica, 3/7/2017. Consulté le 28/03/2018 à l'adresse URL : <https://arstechnica.com/science/2017/03/german-institute-successfully-tests-underwater-energy-storage-sphere/>

Site du développeur MGH Energy. Consulté fin mars 2018. Adresse URL : <http://www.mgh-energy.com>

Site du développeur Hydrostor. Consulté fin mars 2018. Adresse URL : <https://hydrostor.ca>

## Etat des lieux Réunion – données générales

ARER (2009). *Schéma Régional des Énergies de la Mer de la Réunion (SREMER)*, 68 p.

Artelia, Enerdata, Ordecys (2018). *Vers l'autonomie énergétique en zone non interconnectée à l'horizon 2030*. Rapport final d'étude pour l'île de La Réunion. Pour le compte de l'ADEME. Mars 2018. 251 p.

Artelia, iXSurvey (2016). *Rapport annuel 2015 : Période septembre 2014 – décembre 2015*. Marché de Contrôles extérieurs des travaux et suivis environnementaux du chantier de la Nouvelle Route du Littoral. CES 5. Référence CES5-DDI43-11900\_RA\_V3A\_2016-07-20\_PROV. 173 p.

B. Gineste (2016). *Étude de la biologie et de la vulnérabilité au développement anthropique des oiseaux marins nocturnes à La Réunion*. Biologie animale. Université de la Réunion Thèse soutenue publiquement le 13 Septembre 2016. 340 p. <NNT : 2016LARE0015>. <tel-01391936>

Commission de Régulation de l'Énergie (2015). *Rapport sur la mission de la CRE à Mayotte et à la Réunion*. Juillet 2015, 56 p.

Commission de Régulation de l'Énergie (2017). *Délibération de la Commission de régulation de l'énergie du 22 juin 2017 portant avis sur le projet d'arrêté fixant les conditions du tarif d'achat de l'électricité produite par les installations flottantes utilisant l'énergie mécanique du vent en mer telles que visées au 7° de l'article D. 314-15 du code de l'énergie, de 4 aérogénérateurs au maximum*. Délibération N°2017-154 du 22 juin, 3 p.

Décret n°2017-530 du 12 avril 2017 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie de La Réunion.

EDF Systèmes Énergétiques Insulaires (2017). *Bilan prévisionnel de l'équilibre offre / demande d'électricité*. Réunion. 14 p.

EDF. *Schéma de raccordement au réseau des énergies renouvelables de la Réunion*. Version projet non publiée, septembre 2017. 26 p.

Grand Port Maritime de la Réunion (2017). *Rapport annuel 2016*. 11 p.

IEDOM (2017). *L'économie bleue à La Réunion - Des potentiels variés et des atouts à exploiter*. Note expresse N° 467 – Septembre 2017. 4 p.

IFREMER (2018). *Activité des navires de pêche 2017. Quartier maritime : Saint-Denis de la Réunion*. 20 p, juillet 2018.

Ropert M., Duval M., Maurel L. Vermetot C., Mouquet P., Nicet J.B., Talec P. et Le Goff R. (2012). *Projet "Bon Etat II : actualisation de l'état des lieux du SDAGE, volet eaux côtières réunionnaises*. Rapport Final Volume 1, IFREMER, 228 p. RST-DOI/2012-4, adresse URL : <http://wwz.ifremer.fr/lareunion>

E. Sisavath (2011). *Processus de transfert des éléments volcanodétritiques dans les plaines abyssales autour de l'île de la Réunion (océan Indien): exemple du système turbiditique de Cilaos*. Sciences de la Terre. Université de la Réunion, 269 p. Français. <NNT: 2011LARE0028>. <tel-00844754>



## Ressources web :

Observatoire des Sciences de l'Univers de la Réunion, adresse URL : <http://osur.univ-reunion.fr>

Infrastructure de données de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de la Réunion (OSU-Réunion), adresse URL : <https://geosur.univ-reunion.fr/web/>

Sextant Océan Indien, Infrastructure de données géographiques marines et littorales des territoires français de l'Océan indien, adresse URL : [http://sextant.ifremer.fr/fr/web/ocean\\_indien/accueil](http://sextant.ifremer.fr/fr/web/ocean_indien/accueil)

Plateforme de modélisation HYDRORUN, adresse URL : <http://wwz.ifremer.fr/lareunion/Les-projets/HYDRORUN>

Service National d'Observation DYNALIT pour l'étude de la dynamique du littoral et du trait de côte, zone d'étude de l'Ermitage, adresse URL : <https://www.dynalit.fr/La-carte-des-sites/Ermitage#/map>

Laboratoire PIMENT, Université de la Réunion, adresse URL : <http://piment.univ-reunion.fr/>

Laboratoire ENTROPIE, Unité Mixte de Recherche Université de la Réunion / IRD / CNRS, adresse URL : <http://umr-entropie.ird.nc/index.php/home>

## Energie thermique des mers à la Réunion

ARER (2008). *Note d'opportunités pour l'utilisation de l'énergie thermique des mers et la valorisation de l'eau froide profonde au Port*, 114 p.

ARER (2009). *Note d'opportunités pour l'utilisation de l'énergie thermique des mers et la valorisation de l'eau froide profonde à Sainte-Rose*, 83 p.

ARER (2010). *Infos sur les sites potentiels ETM onshore à la Réunion*, 17 p.

ARER (2010). *Etude sur l'énergie thermique des mers à Mayotte*. Note d'opportunité de développement de l'ETM et des produits dérivés de l'eau froide profonde à Mayotte, 143 p.

ARER (2010). *Dossier d'acceptabilité ETM*. Projet de Centrale Pilote Energie Thermique des Mers à la Réunion, 57 p.

ARER (2011). *Analyse du marché pour une filière ETM dans l'Ouest de l'Océan Indien*, 100 p.

SPL Energies Réunion (2013). *Note d'opportunité d'un couplage SWAC/ETM onshore à Saint-Pierre – la Réunion*. Production d'électricité et de climatisation, 12 p.

L. Collet (2017). Rapport de stage de fin d'études ENSTA Paris-Tech / SPL Energies Réunion. Projets de développement énergétique raisonné sur l'île de la Réunion. Identification d'activités annexes à la production d'électricité à partir de l'ETM, à forte valeur ajoutée. P29-49.

## Hydrolien à la Réunion

ARER (2010). *Note d'opportunités sur l'exploitation des courants marins en baie de Saint-Paul*, 45 p.

## Houlomoteur à la Réunion

BCEOM (2007). *Modélisation numérique de l'énergie des vagues à l'île de la Réunion*. Rapport final Phase 1: Identification des sites potentiels d'exploitation de l'énergie de la houle. Référence n° MAR 50550 A. 88 p.

EGIS Eau (2010). *Extension du port de Saint-Leu - AVP*. Notice technique annexe n°1 : Etude d'agitation, modélisation numérique. Référence n° MGC 96202L. Avril 2010. 73 p.

EGIS Eau / DHI (2007). *Etude pour la réalisation de la Nouvelle Liaison Saint-Denis Ouest*.

ARER (2010). *Note d'opportunités sur l'exploitation de la houle onshore à la Réunion, et en particulier à Saint-Philippe*. 42 p.

BIOTOPE, PARETO, GLOBICE (2012). Projet Houlomoteur Pierrefonds – Commune de Saint-Pierre. *Dossier de demande de renouvellement d'Autorisation d'Occupation Temporaire du Domaine Public Maritime*, Maître d'Ouvrage : EDF EN, 18 p.

EDF EN (2014). *Compte-rendu de Projet HOULES AUSTRALES*. Construction d'un prototype de démonstrateur énergie de la houle à la Réunion. 11 p.

David Hernandez-Torres, Laurent Bridier, Mathieu David, Philippe Lauret, Thomas Ardiale. (2015). *Technico-economical analysis of a hybrid wave power-air compression storage system*. *Renewable Energy*, Elsevier, 2015, 74, pp.708-717. DOI : <10.1016/j.renene.2014.08.070>. <hal-01066899>

### *Energie osmotique à la Réunion*

ARER (2009). *Note d'opportunités sur l'énergie osmotique avec utilisation du rejet d'eau de la centrale hydroélectrique de Sainte Rose*, 22 p.

### *Eolien offshore à la Réunion*

SPL Energies Réunion (2015). *Opportunités de l'éolien en mer flottant à la Réunion. Identification de sites potentiels*, 50 p.

# Annexes

ANNEXE 1 - METHODOLOGIE DE L'ETUDE

ANNEXE 2 - SITES DE TEST DES ENERGIES MARINES DANS LE MONDE

ANNEXE 3 - HISTORIQUE DE L'ETM

ANNEXE 4 - FICHES TECHNOLOGIES HOULOMOTRICES

ANNEXE 5 - FICHES DES PROJETS EMR ETUDIES A LA REUNION

ANNEXE 6 - LISTE DE CONSULTATION

ANNEXE 7 - DESCRIPTIF DU MODELE AROME METEO FRANCE (DONNEES VENT)

ANNEXE 8 - LISTE D'ACTEURS EOLIEN OFFSHORE FLOTTANT