

# SCHEMA REGIONAL DES ENERGIES DE LA MER DE LA REUNION

## SREMER

- FIL Energies de la mer : Schéma Régional
- Rédacteur : [matthieu.hoarau@arer.org](mailto:matthieu.hoarau@arer.org)
- Référent : [laurent.gautret@arer.org](mailto:laurent.gautret@arer.org)
- Secrétariat : [line.riviere@arer.org](mailto:line.riviere@arer.org)
- Date : Novembre 2008- Aout 2009
- Diffusion : ARER

ARER – EIE Espaces Informations et Conseils - [www.arer.org](http://www.arer.org) - [arer@arer.org](mailto:arer@arer.org) – [www.island-news.org](http://www.island-news.org)

**«Promouvoir la maîtrise de l'énergies et l'utilisation rationnelle des énergies renouvelables, et préserver les ressources naturelles locale dans une perspective de développement durable et d'adaptation aux changements climatiques »**

**Prenez contact avec notre équipe – Tél. 02 62 257 257**

### **ARER - Agence Régionale Energie Réunion - Association loi 1901 à but non lucratif –Organisme de formation agréé**

Siège social : 40 avenue de Soweto \* BP 226 \* 97456 St-Pierre Cedex  
Tel : 0262 38 39 38 \* Fax : 0262 96 86 91 \* n° siret : 43928091800020

### **Membres de Droits 2009 de l'ARER**



### **Membre associé 2009**

Les communes de Cilaos, Mamoudzou, Sainte-Marie, Petite-Ile, Saint-Denis, des Avirons, le SIDELEC, la SAPHIR, la Chambre Des Métiers et de l'Artisanat, SIDR, le Conservatoire Botanique des Mascariens, Sciences Réunion, EPSMR

### **Partenaire associé**

ADEME



# RESUME

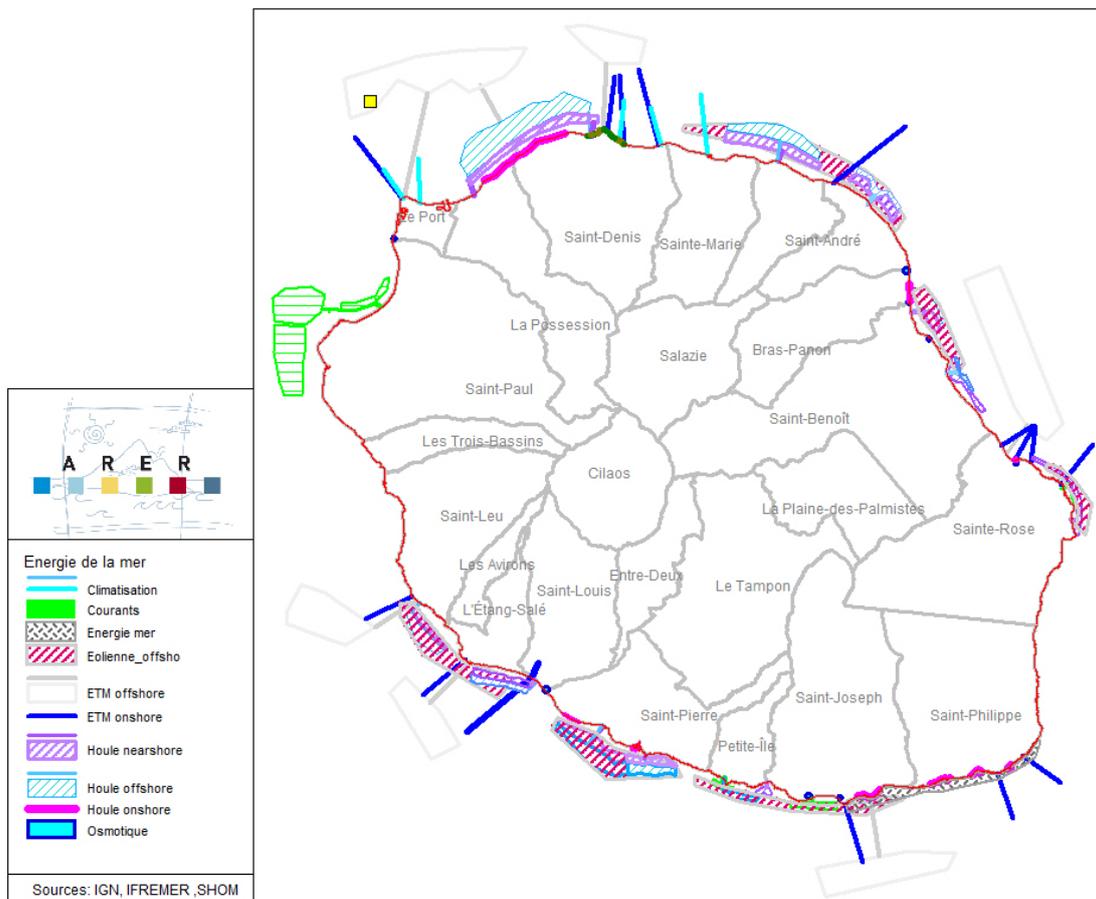


Figure 1 : Le Schéma Régional des Energies de la Mer de la Réunion (SREMER)

Depuis 1999, La Réunion s'est fixé pour objectif de devenir autosuffisant en énergie électrique en 2025-2030 grâce à l'utilisation des énergies renouvelables. Pour atteindre cet objectif ambitieux, le PRERURE (Plan Régional des Energies renouvelables et de l'Utilisation de Rationnelle de l'Energie) fut lancé en 1999 et l'ARER (Agence Régionale de l'Energie de la Réunion) a été créée en 2002.

Depuis peu, ce plan a été soutenu par l'Etat Français à travers la mise en place du plan GERRI (Green Energy Revolution in Réunion Island ou Grenelle de l'Environnement à la Réunion, Réussir l'Innovation). Il a pour objectif d'expérimenter à La Réunion, sur un territoire insulaire d'environ 1 Millions d'habitants, les nouvelles technologies des énergies renouvelables et leur intégration environnementale, économique et sociale au niveau local.

En 2025, les énergies de la mer représenteront une part importante du mix énergétique 100% renouvelable de la Réunion. Afin de permettre le développement de ces Energies Renouvelables Marines (ERM), le Schéma Régional des Energies de la Mer à La Réunion a été réalisée dans le cadre d'une action du PRERURE pour que ce document soit annexé au SAR (Schéma d'Aménagement Régional).

Le SREMER a donc identifié les sites potentiels (sans que cette liste ne soit exhaustive) pour l'implantation des technologies de récupération de l'énergie des vagues, des courants marins, de la pression osmotique, des vents marins et du gradient thermique des mers via la climatisation par eau froide sous marine et l'Energie Thermique des Mers (ETM).



## ABSTRACT

Reunion Island (France, Indian Ocean) targets the electric self-sufficiency by the horizon 2030, via an energy mix made of renewable including ocean energies. Since 2002, Reunion island Regional council, launched the plan, PRERURE (Regional Plan for Renewable Energy Utilisation in Réunion) and created the Regional Energy Agency (ARER) to reach the electric energy self-sufficiency.

This objective was supported by the French Estate with the launching of an ambitious national experimental plan called “Plan Reunion 2030” or “GERRI” (Green Energy Revolution, Reunion Island), meaning to experiment on a closed territory of approximately 1 million inhabitants new energy technologies and their environmental, economical and social impacts.

In 2025, ocean energies could represent an important part of the 100% renewable energetic mix in 2025. To allow the development of these ocean energies, the Reunion island Ocean Energy Regional Scheme (SREMER) was realized to be annexed to the Regional Development Scheme (SAR).

These SREMER identified the potential sites for the development of wave, current, osmotic, offshore and offshore wind energies and thermal energy through SWAC (Sea Water Air Conditioning) and OTEC (Ocean thermal Energy Conversion).



## TABLE DES MATIERES

<b>RESUME</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>4</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>8</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>8</b>
<b>I - LES ENERGIES RENOUVELABLES MARINES</b> .....	<b>8</b>
I - 1 Energie des courants marins .....	8
I-1.1 Description.....	8
a) La ressource en courant.....	8
b) Caractérisation des courants.....	9
Les courants de surface .....	9
Les courants de profondeur .....	9
Les courants de marée .....	9
c) La récupération d'énergie des courants marins .....	9
I-1.2 Contraintes d'implantation des technologies de récupération de l'énergie des courants.....	10
I-1.3 Veille technologique et réalisations existantes .....	11
a) Technologies commercialisées .....	11
b) Technologies expérimentées et industrialisables.....	12
c) Technologies en expérimentation et à fort potentiel.....	13
I - 2 Energie de la houle .....	16
I-2.1 Description.....	16
a) La ressource en houle .....	16
b) Caractérisation de la houle.....	16
c) La récupération de l'énergie de la houle .....	16
I-2.2 Contraintes d'implantation des technologies de récupération de l'énergie des vagues.....	17
I-2.3 Veille technologique et réalisations existantes .....	18
a) Technologies commercialisées .....	18
b) Technologies expérimentées et industrialisables.....	19
c) Technologies en expérimentation et à fort potentiel.....	20
I - 3 Energie Thermique des mers.....	22
I-3.1 Description.....	22
a) La ressource en énergie thermique.....	22
b) Caractérisation et récupération de la ressource en énergie thermique .....	22
I-3.2 Contraintes d'implantation .....	23
I-3.3 Veille technologique et réalisations existantes .....	24
I - 4 Climatisation par eau froide sous-marine.....	27
I-4.1 Description.....	27
I-4.2 Contraintes d'implantation .....	28
I-4.3 Veille technologique et réalisations existantes .....	29
I - 5 Energie osmotique .....	30
I-5.1 Description.....	30
I-5.2 Contraintes d'implantation .....	31
I-5.3 Veille technologique et réalisations existantes .....	31
I - 6 Biomasse marine .....	31
I-6.1 Description.....	31
I-6.2 Contraintes d'implantation .....	33
I-6.3 Veille technologique et réalisations existantes .....	33
I - 7 Eolien offshore.....	33
I-7.1 Description.....	33
I-7.2 Contraintes d'implantation .....	34
I-7.3 Veille technologique et réalisations existantes .....	35
Le parc éolien offshore de Nysted.....	35
Eolienne Hywind :.....	36
<b>II - RECUEIL DES DONNES LOCALES</b> .....	<b>37</b>
II - 1 Compilation des données existantes .....	37
II - 2 Compilation d'informations.....	38



a) Informations sur les courants marins .....	38
b) Informations sur le réseau électrique réunionnais et le raccordement au réseau .....	38
II - 3 Publications pour la Conférence Internationale sur les Energies des Océans (ICOE).....	40
<b>III - DEVELOPPEMENT DES ERM A LA REUNION .....</b>	<b>41</b>
III - 1 Localisation des sites potentiels.....	41
a) Energie des courants.....	41
Sites identifiés de la Baie de Saint Paul et du platier de Saint Gilles : .....	41
Sites potentiels du Platier en face de Saint Gilles (SEC) : .....	42
Sites potentiels dans de Langevin et Grand Anse : .....	42
Platier de Piton Sainte Rose : .....	43
Autres sites potentiels : .....	43
b) Energie des vagues.....	45
Platiers de Saint Pierre : .....	46
Platiers de l'Etang Salé et des Avirons : .....	47
Houle on-shore dans le « Sud Sauvage »:.....	48
Houle on-shore au port de Sainte Rose .....	49
Platiers de Saint Benoit : .....	49
Platiers de Sainte Suzanne et de Saint André : .....	50
Platiers et houle on shore de la route du littoral : .....	51
c) La climatisation par eau froide sous marine, SWAC en anglais .....	55
d) Energie Thermique des Mers .....	56
Sites potentiels pour l'ETM on-shore : .....	57
Sites potentiels pour l'ETM offshore : .....	59
e) Energie osmotique.....	62
f) Biomasse marine.....	63
g) Eolienne offshore.....	65
Potentiel éolien réunionnais : .....	65
Sites potentiels pour le développement des éoliennes offshore à La Réunion : .....	66
<b>Conclusion .....</b>	<b>67</b>
<b>Références .....</b>	<b>67</b>
<b>Annexe I - Acronymes utilisés et mot clés .....</b>	<b>68</b>

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des études et données relatives au milieu marin réunionnais et utiles au développement des énergies marines. ....	37
Tableau 2 : Raccordement électrique au réseau public de distribution .....	38
Tableau 3 : Caractéristiques des sites potentiels en énergie des courants marins .....	44
Tableau 4 : Caractéristiques des sites potentiels en houle on-shore à La Réunion .....	52
Tableau 5 : Caractéristiques des sites potentiels en houle near-shore (-20 à -50m) .....	53
Tableau 6 : Caractéristiques des sites potentiels en houle off-shore (-50 à -150m de profondeur) .....	54
Tableau 7 : Caractéristiques des sites potentiels pour la climatisation par eau froide sous marine (SWAC) à La Réunion .....	55
Tableau 8 : Caractéristiques des sites potentiels pour l'implantation de l'ETM on-shore.....	59
Tableau 9 : Caractéristiques des sites potentiels pour le développement de l'ETM Offshore à La Réunion .....	60
Tableau 10 : Caractéristiques des différents sites potentiels pour le développement de l'énergie osmotique .....	62
Tableau 11 : Caractéristiques des sites potentiels pour le développement des éoliennes offshore .....	66

Figure 1 : Le Schéma Régional des Energies de la Mer de la Réunion (SREMER) .....	1
Figure 2 : Photo et image de la technologie Seagen (source : Seagen) .....	11
<b>Figure 3 : Photo et image de la technologie Open Hydro (source : Open Hydro) .....</b>	<b>11</b>
<b>Figure 4 : Photo de Sabella et image du projet Marénergie (source : Hydrohelix).....</b>	<b>12</b>
<b>Figure 5 : Photo du système pilote testée en Bretagne .....</b>	<b>12</b>



Figure 6 : Image de la technologie Bio Stream (Source : Biopower Systems) .....	13
Figure 7 : Représentation de l'hydrolienne de Lunar Energy (Source : Lunar Energy) .....	13
Figure 8 : Représentation et photo de l'hydrolienne à axe vertical, HARVEST .....	14
Figure 9 : L'unité Rochester Venturi de 60 kW testé dans le nord de l'Angleterre .....	14
Figure 10 : Photo de la technologie TIDEL (Source : SMD hydrovision) .....	14
Figure 11 : Photo de la technologie développé par FHPL .....	15
Figure 12 : Photo du Limpet installé en Ecosse .....	18
Figure 13 : Photo du Pelamis sur son site d'essai en Ecosse .....	18
Figure 14 : Représentation de la technologie Energtech .....	19
Figure 15 : Photo de l'Aquabuoy .....	19
Figure 16 : Photo et représentation du Wave Dragon .....	19
Figure 17 : Principe et photo de l'AWS .....	20
Figure 18 : Schéma de fonctionnement du SEAREV .....	20
Figure 19 : Représentation du système Bio Wave .....	21
Figure 20 : Représentation du fonctionnement de la technologie CETO .....	21
Figure 21 : Thermocline typique en milieu intertropical .....	22
Figure 22 : Usine ETM flottante " La Tunisie, réalisation de G. Claude pour la vente de glace, Brésil 1935 .....	24
Figure 23 : Illustration du démonstrateur ETM implanté au large de La Réunion .....	25
Figure 24 : Représentation du site d'implantation éventuel pour le démonstrateur ETM à La Réunion .....	26
Figure 25 : Principe de fonctionnement de la climatisation sous-marine .....	27
Figure 26 : Photos extérieure et intérieure de la station d'échange de l'Université de Cornell .....	27
Figure 27 : Photo de l'hôtel Intercontinental de Bora- Bora utilisant un système de climatisation par eau froide sous marine .....	29
Figure 28 : Principe de l'osmose .....	30
Figure 29 : Schéma de principe d'une centrale à énergie osmotique .....	30
Figure 30 : Rendements de production en biomasse de différents végétaux (source IFREMER) .....	32
Figure 31 : Potentiel éolien de La Réunion (Source : Schéma régional éolien) .....	34
Figure 32 : Parc éolien de Nysted (Danemark) .....	36
Figure 33 : Photo et image de synthèse de l'éolienne offshore flottante Hywind .....	36
Figure 34 : Réseau électrique haute tension de La Réunion .....	39
Figure 35 : Carte des sites de productions d'énergie réunionnais en 2007 .....	39
Figure 36 : Représentation des sites potentiels en énergie des courants en Baie de Saint Paul et en face de Saint Gilles .....	42
Figure 37 : Représentation des sites potentiels de Langevin et Grand Anse (où des courants de surface semblent présents) .....	43
Figure 38 : Représentation du site potentiel de Piton Sainte Rose (où des courants de surface semblent présents) .....	43
Figure 39 : Caractéristiques des houles autour de La Réunion (Source [7]) .....	45
Figure 40 : Zone de l'étude de faisabilité pour l'implantation de PELAMIS à Saint Pierre (Source : Projet SEAWATT) .....	46
Figure 41 : Représentation des sites potentiels en énergie de la houle à Saint Pierre .....	47
Figure 42 : Représentation des sites potentiels en énergie de la houle à l'Etang-Salé et des Avirons .....	48
Figure 43 : Représentation des sites potentiels en énergie de la houle on-shore entre Saint Joseph et Saint Philippe .....	48
Figure 44 : Photographie de la Marine à Saint Philippe, où sera aménager une cale de halage .....	49
Figure 45 : Représentation du site potentiel en énergie de la houle on-shore du port de Sainte Rose .....	49
Figure 46 : Représentation des sites potentiels en énergie de la houle à Saint Benoît .....	50
Figure 47 : Photo du littoral au niveau du phare de Sainte Suzanne où des mesures de houle ont été effectuées pour la mise en place de la station d'épuration .....	50
Figure 48 : Représentation des sites potentiels en énergie de la houle au Nord de l'île Sainte Suzanne/Saint André .....	51
Figure 49 : Représentation des sites potentiels en houle au large et sur la route du littoral .....	52
Figure 50 : Représentation des sites potentiels pour la climatisation par eau froide sous marine à La Réunion .....	56
Figure 51 : Extraction et représentation des profils de température du programme NOAA/NODC/Coriolis .....	57
Figure 52 : Représentation des sites potentiels pour l'implantation de centrales ETM on shore .....	58
Figure 53 : Représentation des sites potentiels pour l'ETM offshore .....	61

Figure 54 : Photographie de pêcheurs et des canaux de pêche aux bichiques de la Rivière des Roches ..... 63

Figure 55 : Représentation des sites potentiels pour le développement de l'énergie osmotique à La Réunion ..... 63

Figure 56 : Représentation des sites potentiels pour le développement de la culture de la biomasse marine (ou de l'aquaculture) dans l'ensemble des domaines : énergétique, alimentaire, cosmétique, pharmaceutique, ... ..... 64

Figure 57 : Potentiel éolien de La Réunion (Source : Schéma régional éolien) ..... 65

Figure 58 : Représentation des sites potentiels pour l'implantation d'éoliennes offshore en milieu cyclonique..... 66



## INTRODUCTION

Consciente des grands enjeux énergétiques de notre siècle et tributaire d'une position insulaire coûteuse lorsqu'il s'agit d'importation de matières premières, l'île de la Réunion s'est fixé un objectif d'autosuffisance électrique à l'horizon 2025. Etant donné l'absence de matière première fossile sur l'île, cela équivaut à une production électrique 100% renouvelable. Depuis 2002, le Plan Régional des Energies Renouvelables et de l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (PRERURE) a été créé de concert avec l'ARER (Agence Régionale de l'Energie de La Réunion) pour atteindre cette autosuffisance énergétique électrique.

Aujourd'hui, ce plan est soutenu par l'Etat Français, grâce au lancement du projet GERRI (Grenelle de l'Environnement à la Réunion : Réussir l'Innovation), qui a pour objectif de faire de La Réunion la vitrine technologique française et le laboratoire national des énergies renouvelables.

L'atteinte des objectifs fixés par ces plans énergétiques ambitieux passe par l'utilisation des Energies Renouvelables Marines (ERM). Le Schéma Régional des Energies de la MER (SREMER) se positionne comme un élément et un complément structurant du Schéma d'Aménagement Régional (SAR) et du Schéma de Mise en Valeur de la Mer pour faciliter le développement des ERM à La Réunion.

## I - LES ENERGIES RENOUVELABLES MARINES

Parmi la panoplie d'énergie produite à partir de sources renouvelables, les énergies marines font l'objet de nombreuses recherches. La mer est en effet un milieu riche en flux énergétiques qui peuvent être exploités sous différentes formes avec notamment l'éolien offshore, l'énergie des vagues, l'énergie des courants, l'océanothermie (ou Energie Thermique des Mers) ou encore l'énergie osmotique. Chaque énergie marine sera décrite tout au long de ce document, associée à une veille technologique internationale. Les paramètres techniques dimensionnant de ces énergies ont permis de déterminer les sites potentiels pour l'implantation de ces énergies renouvelables marines à La Réunion.

### **I - 1 Energie des courants marins**

Un courant marin est un déplacement d'eau de mer caractérisé par sa direction, sa vitesse et son débit. Il existe trois grands types de courants marins, à savoir :

- Courant de surface
- Courant de profondeur (courants thermohalin)
- Courant de marée

#### **I-1.1 Description**

##### **a) La ressource en courant**

Le principal responsable des courants marins de surface et de profondeur est le soleil. En effet, la Terre reçoit inégalement l'énergie solaire. Les régions tropicales reçoivent plus d'énergie que les régions polaires.

Ce déséquilibre met en mouvement les océans et l'atmosphère, qui vont rééquilibrer thermiquement l'ensemble. Il génère également des vents, facteurs des courants de surfaces, et provoque des différences de température suivant la latitude. Cette différence de température entraîne une différence



de salinité de l'eau et donc de densité, créant les courants de profondeur. Ces mouvements sont aussi influencés par la rotation de la Terre, appelée force de Coriolis.

Par ailleurs, il existe aussi le courant de marée, généré comme son nom l'indique par la marée. Sa force et sa direction évoluent avec le moment de la marée. Il est notable près des côtes bordant les mers influencées par la marée. Il est plus marqué lorsque la topographie de la côte et des fonds impose aux eaux, sous l'influence de la marée, de transiter dans une zone resserrée.

## **b) Caractérisation des courants**

### **Les courants de surface**

Les vents qui soufflent à la surface des mers et des océans entraînent les eaux de surface dans leur direction. Les vents à l'origine des courants de surface sont principalement les vents dominants : les vents d'est subtropicaux (les alizés), les vents d'ouest, ou encore les vents d'est polaires. Les courants marins, peuvent être extrêmement rapides (jusqu'à environ 3 mètres par seconde).

L'ensemble des courants marins de surface constitue à l'échelle du globe la circulation océanique de surface. La carte de ces courants marins de surface est d'ailleurs connue depuis plusieurs siècles par les navigateurs marins.

De plus, la force de Coriolis, provoquée par la rotation de la Terre, tend à dévier les courants de surface vers la droite dans l'hémisphère Nord (inversement dans l'hémisphère Sud). Cela aboutit à la formation de tourbillons, appelés spirales d'Ekman, qui structurent le mouvement général des courants horizontaux.

### **Les courants de profondeur**

Au-delà de 800 mètres de profondeur, les mouvements d'eau se créent en raison de la différence de densité entre les diverses couches de l'océan. Cette différence de densité est en fonction de la température (plus l'eau est froide, plus elle est dense et donc plus elle descend en profondeur) et de la salinité (l'eau salée est plus dense que l'eau douce) des masses d'eau.

À l'échelle du globe, les courants marins de profondeur constituent la circulation océanique profonde (ou circulation thermohaline). Ces courants profonds, appelés courants thermohalins, se déplacent très lentement, de seulement quelques mètres par jour.

### **Les courants de marée**

La vitesse maximale du courant de marée en un lieu donné dépend à la fois de l'amplitude de la marée et de la configuration des fonds : ce courant peut être particulièrement fort dans, les raz (exemples : en France, Raz de Sein, Raz Blanchard plus de 10 nœuds).

## **c) La récupération d'énergie des courants marins**

Les courants marins sont caractérisés par leurs directions, leurs vitesses et leurs débits. Aujourd'hui, ils suscitent un intérêt au niveau mondial car ils peuvent être exploités pour produire de l'énergie, avec des technologies similaires à des éoliennes sous marine, appelés hydroliennes.

Les courants de marée constituent pour l'instant le domaine préférentiel de ce type de technologie. Ils présentent, en effet, par rapport aux courants généraux (comme le Gulf Stream) des caractéristiques particulièrement favorables :

- intensité importante (dans certaines zones les courants de marée peuvent atteindre ou dépasser 10 nœuds, soit 5 m/s, alors que les courants généraux dépassent rarement 2 nœuds) ;
- proximité de la côte : les veines de courant intense apparaissent dans des zones de faibles profondeurs situées à proximité de la côte, ce qui en facilite l'exploitation ;



- direction stable : les courants de marée sont généralement alternatifs, ce qui simplifie le dispositif de captage ;
- enfin, prédictibilité : les courants de marée sont parfaitement prévisibles, puisqu'ils ne dépendent que de la position relative des astres générateurs - Lune et Soleil - et de la topographie locale.

Dans les passes de nombreux d'atoll ou de lagon, la houle peut être la cause de courants marins puissants. La houle apporte un surplus d'eau dans le lagon, qui se vidange par l'intermédiaire de sa passe.

A La Réunion, les alizés semblent être le facteur premier de création de ces courants marins. La bathymétrie de La Réunion est caractéristique des îles volcaniques, issues de points chauds avec une remontée rapide du plancher océanique. Cette remontée rapide du fond océanique pourrait créer une sorte de goulet d'étranglement des courants marins, sur les cotes aux profondeurs faibles.

### **I-1.2 Contraintes d'implantation des technologies de récupération de l'énergie des courants**

Les technologies de conversion de l'énergie des courants requièrent, un site d'implantation disposant au minimum des conditions suivantes:

- Une vitesse minimum des courants marins de 1 à 2 m/s (soit 2 à 3 Nœuds)
- Une bonne occurrence des courants marins
- Une bathymétrie comprise entre 30 et 50 mètres de profondeur
- Un fond marin stable

Les impacts sur la faune et la flore des systèmes de récupération de l'énergie des courants sont peu connus. Ils divergent selon les différentes technologies mais ils peuvent être considérés comme faibles. Les premiers essais sur site tendent à confirmer un impact faible. Ces impacts peuvent être aussi limités par l'emploi de technologie imitant les mouvements de la faune marine.

Les principaux inconvénients des technologies de récupération de l'énergie des courants sont:

- Un coût élevé dû, entre autres, à des opérations de maintenance lourde.
- La corrosion des matériaux par l'eau de mer ;
- L'opposition des usagers de la mer, dû à la restriction de la zone de pêche (chalut généralement) ou de navigation si les systèmes sont implantés en surface.

Des contraintes concernant l'aménagement apparaissent aussi pour implanter ces technologies à savoir :

- Le passage du câble électrique sous marin ramenant l'énergie produite sur terre. (ancrage, ensouillage).
- L'implantation sur la côte d'une station de transformation du courant pour la connexion au réseau.
- L'aménagement portuaire pour la maintenance des machines (si la maintenance n'est pas réalisée sur site).

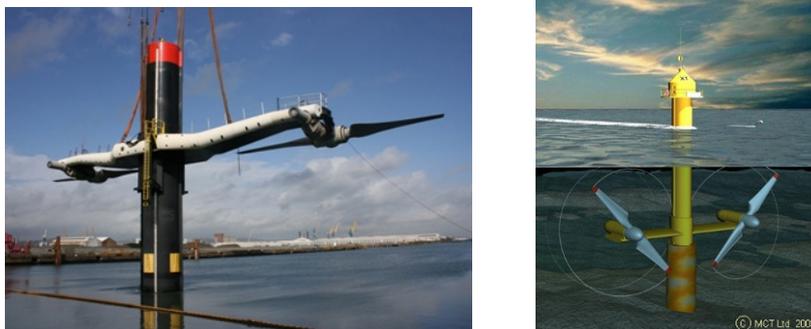
A la Réunion, des contraintes supplémentaires concerneront la résistance aux cyclones et aux fortes houles australes.



### **I-1.3 Veille technologique et réalisations existantes**

#### **a) Technologies commercialisées**

##### **Marine Current Turbine (MCT) :**



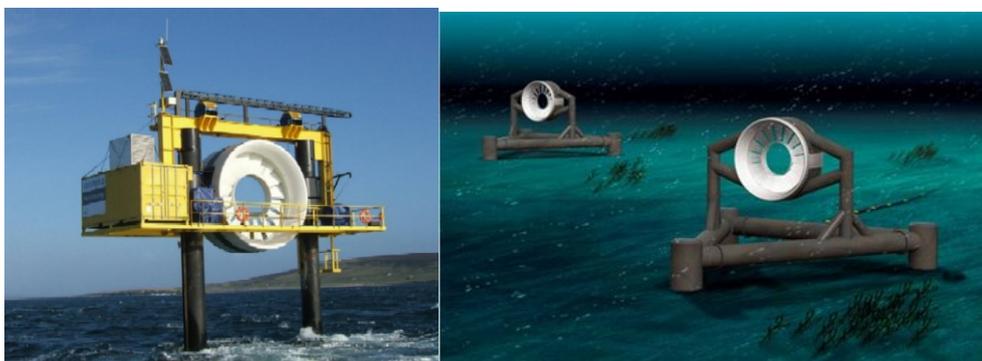
**Figure 2 : Photo et image de la technologie Seagen (source : Seagen)**

Marine Current Turbine (MCT) est une filiale de EDF Energy qui a développé et testé, depuis 2003, un système d'exploitation de l'énergie des courants marins avec le projet « SeaGen ». Cette technologie fonctionne avec des vitesses de courants de 2 à 3 mètres par secondes et par une profondeur de 20 à 40 mètres

L'avantage de ce système peut résider dans le fait que les turbines remontent à la surface pour la maintenance. Le système est conçu avec deux hélices de 15 mètres de diamètre en parallèle, ce qui représente une puissance totale de 1MW.

Marine Current Turbines a pour projet d'exploiter d'ici 2012, au large de l'île galloise d'Anglesey, une ferme de sept hydroliennes produisant 10 MW. En partenariat avec le groupe canadien BC Tidal Energy, la société déploiera également d'ici 2009 son système dans la rivière Campbell à Vancouver : trois turbines dans un premier temps, mais l'ambition à long terme de faire de la Colombie Britannique la première région mondiale de production d'énergie hydrolienne.

##### **Open Hydro :**



**Figure 3 : Photo et image de la technologie Open Hydro (source : Open Hydro)**

OpenHydro a été fondée en 2005 sur la base d'une technologie de turbine-rotor à centre ouvert (Open Center Turbine).

Cette technologie a commencé à être testée aux USA en 1995 avec pour objectif d'obtenir une turbine à fixer directement sur les fonds marins et nécessitant peu d'entretien.

Basée à Dublin, elle a installé ses premières turbines en 2006 sur le site de Fall of Warness à l'Ouest de l'île d'Eday en Ecosse. Un important programme d'observation des impacts environnementaux avait été mis en place, et les résultats sont positifs : algues, mollusques, géologie marine, trait de côte, cohabitation avec le trafic maritime de ferries, etc.

EDF a décidé d'installer ce type de turbine sur le site breton de Paimpol-Bréhat, pour raccorder au réseau une puissance de 2 à 4 MW à partir de 2011. Cette turbine a déjà été ou va être sous peu

installée sur 3 autres sites : les Orcades à l'extrême Nord-Est du Royaume-Uni, la province canadienne de Nova Scotia, et la Manche autour de l'île anglo-normande d'Aurigny (Alderney en anglais).

#### **b) Technologies expérimentées et industrialisables**

##### **Hydrohelix :**



**Figure 4 : Photo de Sabella et image du projet Marénergie (source : Hydrohelix)**

Hydrohélix Energies, entreprise basée à Quimper, a été créée en 2000 et a été labellisée par le pôle de compétitivité Mer de la Bretagne en décembre 2005.

Ces hydroliennes de 8 à 15 mètres de diamètre seront fixées par 30 m de fond à même le sol. D'après la société, ce système n'entraînerait donc aucun problème pour la navigation et fonctionnerait avec une vitesse minimum de courant de 3 nœuds. Chaque hydrolienne produirait 200 kW et fonctionnerait 3000 heures par an. Chaque parc serait ainsi composé de 5 hydroliennes de 10 mètres de diamètre. En 2008, une hydrolienne à l'échelle un tiers, baptisée Sabella, a été testée durant 6 mois dans la baie de l'Odet. Ces tests seront reconduits et affinés en 2009.

##### **HYDRO-GEN :**

Hydro-Gen est une grosse roue à aube flottante enchâssée dans une structure-tuyère-venturi profilée de type catamaran. La structure est optimisée pour permettre le captage d'un maximum d'eau en mouvement afin que la roue à aubes transforme l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique, ensuite transformée en courant électrique par un générateur mécaniquement relié à la roue. Depuis 2005, un prototype de 10 kW (dimensions : 2,3 sur 4,5 m) fait des essais en mer.



**Figure 5 : Photo du système pilote testée en Bretagne**

### c) Technologies en expérimentation et à fort potentiel

#### **Bio Stream :**

Basée à Sydney, Bio Power Systems a mis au point un système innovant. Les premières expérimentations sont attendues dans plusieurs points du globe, notamment en Tasmanie. Le système bioSTREAM™ transforme l'énergie des courants marins en électricité par un système imitant les mouvements de la queue de requin et de thon.

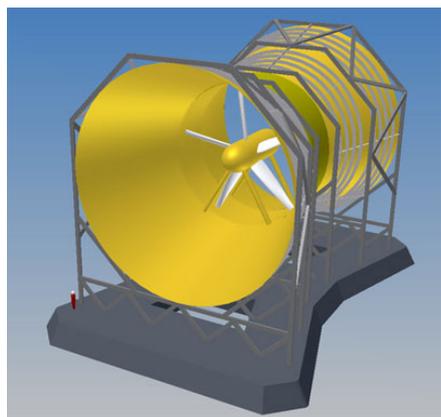
Il se présente sous la forme d'un cylindre ancré au fond, sur lequel est fixé une structure hydrodynamique en forme de nageoire de requin ou de thon.



**Figure 6 : Image de la technologie Bio Stream (Source : Biopower Systems)**

Bio Stream est affiché comme ne générant aucune nuisance pour l'environnement : le mouvement de la structure hydrodynamique choisie est un mouvement imité des mouvements naturels donc suffisamment lent pour ne pas perturber la vie habituelle de la flore et la faune environnante. Le système est parfaitement silencieux, ne modifie ni la salinité ni l'intensité des courants, ne rejette aucune substance étrangère dans l'environnement et a un impact visuel nul, puisque fonctionnant sous la surface de la mer.

#### **Rotech Tidal Turbine de Lunar Energy :**



La société britannique, Lunar Energy, fondée en 2001, a créé le Rotech Tidal Turbine (RTT). Ce système d'hydrolienne, totalement immergé et fixé au fond, fait 21 mètres de diamètre et 27 mètres de long.

Cette technologie à 5 pales pourrait, selon les tests réalisés au niveau des Orcades, fournir une puissance de 1 MW.

Lunar Energy, basée à Hesse (Angleterre), devrait installer prochainement 8 hydroliennes au large de la péninsule de St David au Pays de Galles. La société a également annoncé un projet de 300 hydroliennes d'ici 2015 en Corée du Sud, en partenariat avec Midland Power Co., Hyundai Samho Heavy et Rotech Engineering. Une turbine test sera mise en place l'année prochaine, et une étude d'impacts déterminera la faisabilité de l'ambitieux chantier coréen.

**Figure 7 : Représentation de l'hydrolienne de Lunar Energy (Source : Lunar Energy)**

**HARVEST:**

**Figure 8 : Représentation et photo de l'hydrolienne à axe vertical, HARVEST**

Le programme HARVEST (Hydroliennes à Axe de Rotation VERTical STabilisé) est basé sur un principe innovant et viable économiquement de turbines à axe vertical et flux transverse. Il est issu d'un regroupement de plusieurs laboratoires, (3S-R de l'université Joseph Fourier, G2ELab et LEGI du Grenoble Institut National Polytechnique et LAMCOS de l'INSA de Lyon). L'objectif de ce regroupement est le développement d'un nouveau concept d'hydrolienne pour la récupération de l'énergie des courants marins et fluviaux. Le projet entre dans une seconde phase, où il s'agit d'implanter une première tour à Pont de Claix (Isère) dans un canal EDF pour la fin 2008. Les turbines seraient alors à l'échelle 1/2. L'ultime étape consisterait à mettre en commun plusieurs tours pour former un parc, avec l'objectif de tester une telle « ferme fluviale » en 2010.

**Rochester Venturi :**

Hydro Venturi propose le Rochester Venturi (RV) qui est une sorte d'entonnoir, qui avec la chute de pression entraîne les turbines produisant de ce fait de l'électricité.

Les avantages sont :

- Possibilité d'installation dans des courants moins rapides et des eaux moins profondes que les autres systèmes, entre 2 et 30 mètres
- Peu de maintenance

Le RV a été testé dans le nord de l'Angleterre (en 2002).

**Figure 9 : L'unité Rochester Venturi de 60 kW testé dans le nord de l'Angleterre**

**Tidel :**

La société anglaise SMD Hydrovision a développé un système d'extraction de l'énergie des courants de marée, nommé TidEL. Il s'agit de deux turbines de 500 kW tournant en sens inverse montées sur un même support. L'assemblage flotte et est ancré sur le fond par des chaînes d'amarrage.

Un prototype à l'échelle 1/10ème a été testé en Janvier 2004 au NAREC (Centre de recherche anglais sur les énergies renouvelables).



**Figure 10 : Photo de la technologie TIDEL (Source : SMD hydrovision)**

**Gulf Stream turbines :**

**Figure 11 : Photo de la technologie développée par FHPL**

La société FHPL (Florida Hydro Power and Light) a développé une turbine spécialement conçue pour être placée dans des courants océaniques, tels que le Gulf Stream.

La turbine comportant deux rotors en fibre de verre, d'un diamètre de 30m, devra fournir 3MW. La machine sera ancrée sur le fond marin, au moyen de câbles. Le coût de fabrication pour une série de 400 turbines serait de 400 euros par kW, ce qui rendrait le système concurrentiel face à une centrale électrique moderne.

**AUTRES TECHNOLOGIES :**

De nombreuses autres technologies existent mais elles n'ont pu être toutes présentées. Les plus avancées (actuellement à la fin de l'année 2008) sont celles décrites ci-dessus.

## **I - 2 Energie de la houle**

### **I-2.1 Description**

#### **a) La ressource en houle**

Le vent est la principale cause de la formation des vagues vu qu'il s'écoule de façon turbulente à la surface de l'eau. Le champ de pression n'étant pas uniforme, l'eau est soumise à des pressions différentes en des points plus ou moins proches. Apparaît alors un clapot qui prend la forme de petites ondes de très faibles amplitudes, de longueurs différentes, se propageant dans le sens du vent à des célérités plus ou moins élevées.

Les petites vagues vont s'amplifier car il se produit une réaction entre la surface des deux fluides qui se poussent et se repoussent mutuellement. Petit à petit, en s'amplifiant, les vagues finiront par se stabiliser.

Au large, ces vagues ne se propagent pas à la même vitesse car un clapot désordonné se forme. Le vent va alors jouer le rôle de filtre passe-bas : les vagues ayant une longueur d'onde courte vont avoir une vitesse de propagation importante et vont aller plus vite que le vent. Ceci provoque un frottement dans le sens contraire de leur propagation et donc une pression plus importante sur leur face avant, ce qui va les faire se lever et déferler. Inversement, les vagues longues et ayant une vitesse de propagation faible, vont être entretenues par ce vent et elles vont continuer à grossir dans la zone où souffle le vent.

Sur le littoral, une vague déferle lorsqu'elle arrive sur la côte. A la surface, l'eau a un mouvement circulaire, mais pas dans les profondeurs. En raison des frottements sur le fond et des efforts internes du fluide, la vitesse et la longueur d'onde de la vague vont diminuer. De ce fait, l'énergie cinétique de la vague diminue et se transforme en énergie potentielle car l'énergie de la vague est la somme de ses énergies cinétique et potentielle, et reste constante.

Quand l'énergie cinétique diminue, l'énergie potentielle augmente (hauteur de la vague). C'est ce qu'on appelle le déferlement car la vague va gonfler sur la côte et au bout d'un moment s'affaler sur le rivage, où elle aura perdu toute son énergie.

#### **b) Caractérisation de la houle**

Les vagues ne représentent aucune régularité : il n'y a pas deux vagues identiques mais elles sont, malgré tout, caractérisables, grâce à :

- La célérité : la vitesse de la vague.
- La longueur d'onde : la distance entre deux crêtes successives.
- La période : le temps mis par deux crêtes pour passer en un même point.
- L'amplitude (aussi appelée hauteur de la vague) : la distance verticale entre un creux et la crête suivante.

L'énergie d'une vague est la somme de ses énergies cinétiques et potentielles.

#### **c) La récupération de l'énergie de la houle**

Les vagues sont caractérisés par leurs directions, leurs hauteurs et leurs fréquences. Aujourd'hui, elles suscitent un intérêt au niveau mondial car elles peuvent être exploitées pour produire de l'énergie. Ces dernières années, de nombreuses technologies se sont développées et passent aujourd'hui au stade commercial. Ces technologies peuvent s'implanter en :



- On shore (sur la côte).
- Nearshore (profondeurs comprises entre 20 m et 50 m).
- Offshore (profondeurs supérieures à 50 m).

### **I-2.2 Contraintes d'implantation des technologies de récupération de l'énergie des vagues**

Les technologies de conversion de l'énergie des vagues requièrent un site d'implantation disposant au minimum des conditions suivantes:

- Une bonne occurrence et puissance des vagues,
- Une surface exploitable importante,
- Un fond marin stable,
- Pour les systèmes nearshore, un large platier avec une bathymétrie comprise entre 30 et 150 mètres de profondeur,
- Pour les systèmes on shore, des fonds marins remontant rapidement pour éviter la perte d'énergie des vagues dû aux frottements sur le fond marin.

Les impacts sur la faune et la flore des systèmes de récupération de l'énergie de la houle sont peu connus. Ils divergent selon les différentes technologies mais ils peuvent être considérés comme faibles.

Les principaux inconvénients des technologies de récupération de l'énergie de la houle sont:

- Un coût encore élevé dû, entre autres, à des opérations de maintenance.
- La corrosion des matériaux par l'eau de mer.
- L'opposition des usagers de la mer, due à la restriction de zone de pêche ou de navigation.
- Une potentielle gêne visuelle.

Des contraintes concernant l'aménagement apparaissent aussi pour implanter ces technologies à savoir :

- Le passage du câble électrique sous marin ramenant l'énergie produite (ou l'eau sous pression) sur terre. (ancrage, ensouillage).
- L'implantation d'une station de transformation du courant pour la connexion au réseau.
- L'aménagement portuaire pour la maintenance des machines (si la maintenance n'est pas réalisée sur site).

A La Réunion, des contraintes supplémentaires concerneront la résistance aux cyclones (vents, houles) et aux fortes houles australes.

### **I-2.3 Veille technologique et réalisations existantes**

#### **a) Technologies commercialisées**

##### **LIMPET ou WAVEGEN (technologie on-shore) :**



**Figure 12 : Photo du Limpet installé en Ecosse**

Le Limpet fonctionne depuis 2000, il est installé sur le littoral écossais. Il produit environ 200 kW pour une machine installée d'environ 500 kWc. L'effet de la houle dans une chambre étanche crée une montée et une redescende de l'eau de mer, qui aspire et expulse l'air à travers une turbine (en vert sur la photo précédente) produisant de l'électricité. Le Limpet utilise le principe de la colonne d'eau oscillante et sa turbine a été développée pour tourner dans les deux sens, ce qui la rend indépendante du sens d'entrée de l'air, et maximise la capacité de production.

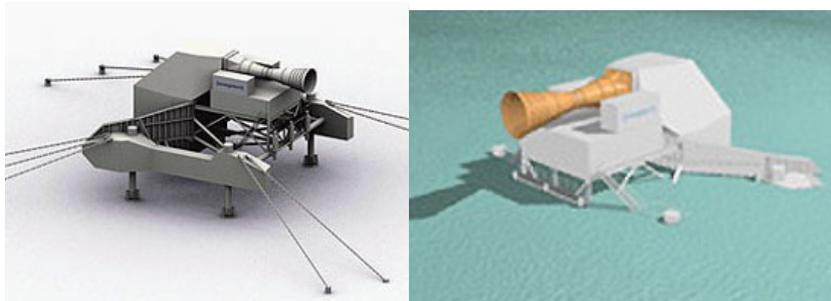
Sa position sur le littoral permet un accès facile aux techniciens et rend le prix du kW faible mais la capacité de production d'électricité reste faible. Ses dimensions sont d'environ 20 m de long pour une durée de vie d'environ 30 ans. Les contraintes d'implantations sont d'avoir sur la côte une profondeur minimale de 5 mètres, et une ressource moyenne annuelle en houle (minimale) de 15kW/m.

##### **PELAMIS (technologie nearshore):**



**Figure 13 : Photo du Pelamis sur son site d'essai en Ecosse**

La technologie « PELAMIS » semble être actuellement la plus avancée pour l'exploitation de l'énergie des vagues. Le système est un convertisseur d'énergie des vagues semi immergé constitué de segments cylindriques en acier, liés entre eux linéairement par des articulations. Lors du passage des vagues le long de la machine, le mouvement induit de chacun des flotteurs cylindriques, par rapport aux autres, est freiné par des vérins hydrauliques. Ces vérins entraînent un fluide sous pression vers un moteur hydraulique. Ce dernier entraîne, à son tour, un générateur producteur d'électricité. D'une longueur de 150 mètres pour un poids d'environ 700 tonnes, un PELAMIS, ancré par des profondeurs de 50 à 100 mètres, a une capacité maximale de production de 750 kW. La production électrique est par la suite évacuée, à terre, par un câble électrique sous marin pour être transformée et injectée sur le réseau électrique.

**b) Technologies expérimentées et industrialisables****Energtech (technologie nearshore) :****Figure 14 : Représentation de la technologie Energtech**

Le projet Energtech australien utilise un système qui concentre les vagues jusqu'à la turbine, qui convertira leur énergie en électricité. Il y a un mur parabolique pour concentrer l'énergie des vagues sur le collecteur et améliorer l'économie du dispositif.

**AquaBuoy ou IPS OWEC Buoy (technologie nearshore) :**

La firme Interproject Service présente son OWEC Buoy ou AquaBuoy, qui fournit de l'énergie par compression verticale de deux pistons. Un peu comme le Pelamis (voir plus haut), fonctionnant lui horizontalement. Un seul engin peut fournir de 50KW à 150KW, cela peut paraître peu mais l'AquaBuoy est beaucoup plus petit et moins cher que ces concurrents.

**Figure 15 : Photo de l'Aquabuoy****Wave Dragon ou dragon des vagues (technologie offshore):****Figure 16 : Photo et représentation du Wave Dragon**

Le Wave Dragon est développé par l'entreprise Danoise Wave Energy technology et est financé conjointement par le Danemark et l'Union européenne.

Ce système se compose essentiellement de trois éléments : deux déflecteurs qui dévient les vagues en direction d'une rampe, une coque dont la rampe courbée amène l'eau dans un bassin d'accumulation au-dessus du niveau de la mer, et plusieurs turbines Kaplan à travers lesquelles s'écoule l'eau du bassin d'accumulation en produisant de l'électricité.

Submergé par les flots, le Wave Dragon se remplit d'eau comme un entonnoir. La pression de cette colonne d'eau, entretenue et alimentée par les vagues, entraîne des turbines qui génèrent le courant.

Le prototype actuel à l'échelle 1/5, ancré au nord du Danemark, dans des eaux modérément calmes, a été déployée en 2006. La version définitive pèserait 21.750 tonnes et aurait une puissance de 4 MW.

### **Archimede Wave Swing (technologie nearshore) :**

L'Archimede Wave Swing (AWS) est une bouée immergée. Elle est constituée d'un ballon rempli d'air et relié aux fonds marins. Ce ballon est mis en mouvement par l'oscillation du niveau de la mer. Lorsque l'amplitude de la vague est maximale au dessus du système, l'air du ballon est comprimé et son volume diminue. La force d'Archimède diminue elle aussi, et le ballon descend. A contrario, dans le creux de la vague, l'air du ballon, dépressurisé, se détend et fait remonter le ballon. Le mouvement oscillatoire du ballon, par rapport au fond, est ainsi créé. Un prototype de 2MW, haut de 23 mètres pesant 220 tonnes, a été construit au Portugal en 2001.

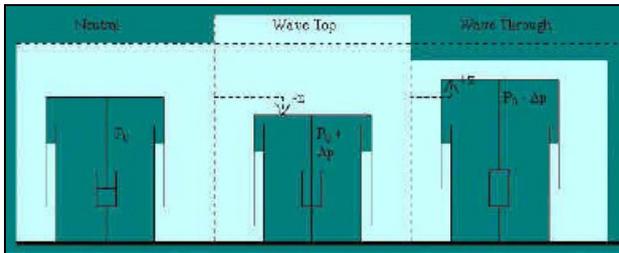


Figure 17 : Principe et photo de l'AWS

### **c) Technologies en expérimentation et à fort potentiel**

#### **SEAREV (technologie nearshore):**

SEAREV est un système offshore de deuxième génération, composé d'un flotteur clos et étanche dans lequel est suspendue une roue chargée jouant le rôle d'un pendule embarqué. Cette roue à axe horizontal, de grand diamètre (9m), dont la moitié supérieure est évidée, a sa masse concentrée dans la moitié inférieure, lestée de béton, d'où l'effet de pendule. Sous l'action de la houle et des vagues, le flotteur se met à osciller, entraînant à son tour un mouvement de va-et-vient de la roue pendulaire. Chacun a son propre mouvement, et c'est le mouvement relatif entre le flotteur et la roue qui actionne un système hydro-électrique de conversion de l'énergie mécanique en électricité : des pompes hydrauliques liées à la roue pendulaire chargent des accumulateurs à haute pression ; en se déchargeant, ces derniers livrent à leur tour, leur énergie à des moteurs hydrauliques qui entraînent des générateurs d'électricité. L'électricité est ramenée à terre par un câble sous-marin.

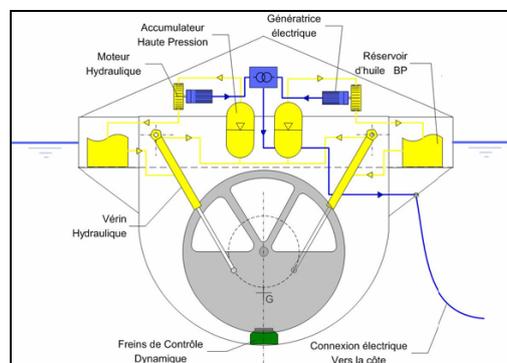


Figure 18 : Schéma de fonctionnement du SEAREV

Le projet débuta en 2003 au sein du Laboratoire de mécanique des fluides (LMF) de l'École centrale de Nantes. Depuis deux autres laboratoires ont rejoint le projet, à savoir l'RCCyN, toujours de l'École centrale de Nantes et le SATIE de l'École normale supérieure de Cachan (antenne de Bretagne). Tous

ces laboratoires sont des unités mixtes de recherche du Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Le principe du SEAREV a été breveté en octobre 2004 par le CNRS.

Le premier prototype, à l'échelle 1/12<sup>e</sup>, est testé dans le bassin à vagues du LMF depuis juin 2006. Son test en conditions réelles est prévu pour 2010 dans la région du Pays de la Loire au Croisic où il sera immergé entre 30 et 50 mètres sous la mer, à environ quinze kilomètres des côtes.

### **BIOWAVE (technologie nearshore) :**



BioWAVE™, conçu en fibre de verre, transforme l'énergie des vagues en électricité par un système imitant les mouvements des grandes espèces d'algues sous-marines (kelp). Il se présente sous la forme d'un cylindre ancré sur le fond marin (jusqu'à 40 mètres) et doté de 4 lames géantes disposées en éventail, invisibles de la surface et rétractables sur le fond en cas de forte houle. En condition de fonctionnement optimal, c'est à dire par mer calme à peu agitée, chaque unité peut produire un peu plus de 2 MW. L'exploitation en fermes sous-marines de plusieurs unités est d'ores et déjà envisagée.

Figure 19 : Représentation du système Bio Wave

### **CETO (technologie nearshore) :**

La technologie CETO inventée en 1975 par l'australien Alan Burns a subi ses premiers tests de faisabilité en 1999, avant qu'un premier projet de prototype ne voit le jour fin 2003.

Le CETO est un système de bouées immergées. Sous l'effet des vagues, le mouvement vertical des bouées de 7 mètres de diamètre entraîne le va et vient des pompes hydrauliques. Ces dernières pompent de l'eau de mer et l'acheminent à forte pression sur terre. A terre, l'eau de mer est dirigée vers un filtre à osmose inverse, qui la dessale et la transforme en eau douce, puis vers une turbine (Pelton) qui produit de l'électricité

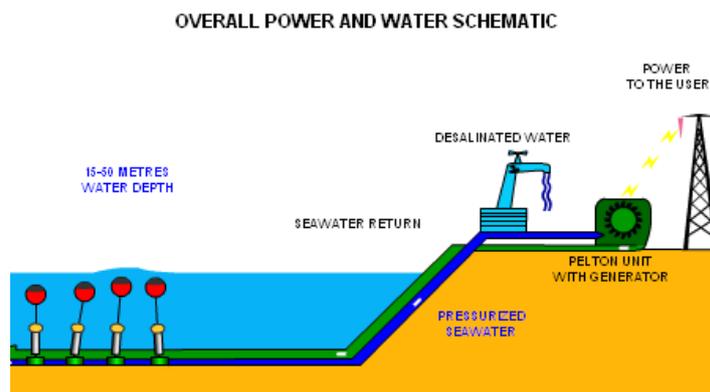


Figure 20 : Représentation du fonctionnement de la technologie CETO

### **AUTRES TECHNOLOGIES :**

De nombreuses autres technologies existent mais elles n'ont pu être toutes présentées. Les plus avancées (actuellement à la fin de l'année 2008) sont celles décrites ci-dessus.

## I-3 Energie Thermique des mers

### I-3.1 Description

#### a) La ressource en énergie thermique

L'océan tropical est un vaste capteur d'énergie solaire et ses eaux de surface, un immense réservoir de chaleur. La circulation océanique qui contribue, avec la circulation atmosphérique, à l'apport de chaleur, depuis les régions tropicales vers les pôles, et à l'établissement des climats, crée une stratification relativement stable entre l'eau de surface, chauffée par le soleil, et l'eau profonde, froide en provenance des régions polaires. Dans toute la région intertropicale la température de l'eau descend régulièrement jusqu'à 4° C à 1000 mètres de profondeur, alors qu'à la surface elle est souvent supérieure à 20° C, (voir figure de la thermocline ci-contre).

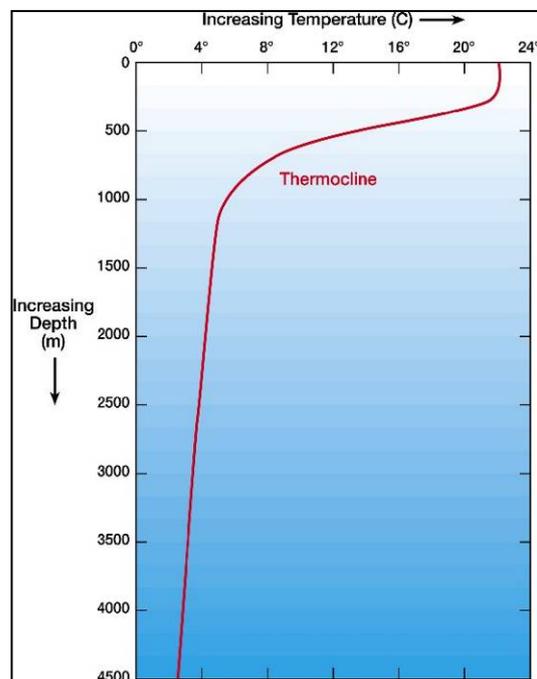


Figure 21 : Thermocline typique en milieu intertropical

#### b) Caractérisation et récupération de la ressource en énergie thermique

L'idée d'exploiter ce gradient thermique pour produire de l'énergie est née en France, au 19e siècle. Plusieurs procédés ont été expérimentés. Ils sont fondés sur le principe de thermodynamique selon lequel il est possible d'obtenir du travail mécanique à partir d'un transfert de chaleur entre deux sources à températures différentes.

Cette ressource en énergie thermique et les procédés pour sa conversion en énergie mécanique utilisable par l'homme sont connus sous le nom d' "Energie Thermique des Mers " (ETM) ou " Ocean Thermal Energy Conversion " (OTEC en anglais). La ressource est abondante, stable, disponible 24 heures sur 24, tous les jours de l'année, et largement distribuée et facile d'accès pour de nombreux pays situés dans la ceinture intertropicale.

Dans un futur plus ou moins proche, l'ETM servirait avant toute chose à la production d'énergie. Mais aujourd'hui, le plus intéressant est que les « résidus » de cette technologie sont de l'eau douce et de l'eau de mer profonde avec de fortes teneurs en nutriments. Avant de pouvoir penser uniquement à la production d'électricité via des grosses centrales, il faut rentabiliser les premières installations ETM avec un consortium d'activités annexes. Dans cette optique, le NELHA (Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority), situé à Hawaï, s'est spécialisé dans l'utilisation de cette eau de mer profonde en formant un incubateur d'entreprises, et aujourd'hui elles deviennent très rentables.

Cette ressource en eau profonde peut être utilisée pour développer des activités telles que la climatisation industrielle, l'aquaculture, l'agriculture, la végétalisation d'espace urbain, la production d'eau douce (à forte valeur ajoutée) pour l'export, fabrication de produits cosmétiques...

Il est possible de récupérer cette énergie via des centrales:

- On-shore (sur terre) de petites tailles (inférieures à une puissance de 5MW), dont la canalisation d'eau froide (de 1 à 2,5m de diamètre) ancrée sur les fonds marins pompe l'eau froide à de grandes profondeurs.
- Offshore flottante de grande puissance (5 à 100MW), dont les canalisations d'eau froide disposées verticalement sous la plateforme pompent l'eau froide à 1000 mètres de profondeur ou plus.

### **I-3.2 Contraintes d'implantation**

La technologie de l'Energie Thermique des Mers requière un site d'implantation, disposant au minimum des conditions suivantes :

- Un écart de température entre l'eau de surface et l'eau profonde d'environ 20°C
- Un accès rapide à la ressource en eau froide profonde (tombants rapides en on shore)
- Un fond marin stable facilitant les ancrages (en on shore pour l'ancrage de la canalisation d'eau froide et en off shore pour l'ancrage d'une plate forme flottante)
- Une exposition limitée à la houle et aux courants marins

Les impacts sur la faune et la flore d'une centrale ETM sont peu connus. Une étude avait cependant été réalisée par l'IFREMER dans les années 80, pour le projet de centrale ETM 5MW à Tahiti. Les impacts pourraient être positifs du fait de la création d'un « up-welling » artificiel, re-minéralisant les eaux de surface et redynamisant la production biologique. Par ailleurs, un rejet des eaux pompées à des profondeurs correspondant à la température de rejet limiterait fortement les impacts.

Des études, [3],[2],[1]affirment que seul une implantation massive de centrales ETM pourrait perturber la circulation océanique. A l'horizon 2040, 5000 usines de 100MW n'aurait que peu d'impact sur cette circulation océanique.

Les principaux problèmes de la technologie ETM sont:

- L'utilisation d'une faible différence de température
- Un investissement initial élevé, dû aux installations imposantes à mettre en place
- La gestion technique et des risques pour le génie maritime et la Canalisation d'Eau Froide profonde aussi bien en centrale sur terre, qu'en pleine mer.

Des contraintes concernant l'aménagement apparaissent aussi pour implanter ces technologies à savoir :

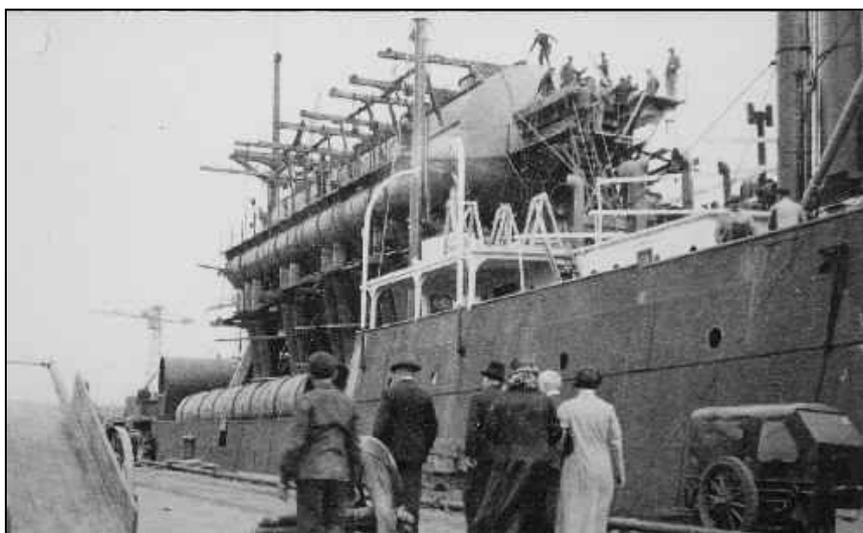
- Le passage du câble électrique sous marin ramenant l'énergie produite (ou/et de l'eau douce pour les centrales off shore)
- L'ancrage (ou/et ensouillage) de la CEF (Canalisation d'Eau Froide) pour une centrale sur terre.
- L'implantation d'une station de transformation du courant pour la connexion au réseau.
- L'éventualité d'un aménagement portuaire pour l'implantation (et la maintenance) d'une centrale aussi bien en on-shore qu'offshore, et l'assemblage et la mise en place de la CEF.

A La Réunion, des contraintes supplémentaires concerneront la résistance aux cyclones (vents, houles) et aux fortes houles australes.



### ***1-3.3 Veille technologique et réalisations existantes***

En 1926, CLAUDE et BOUCHEROT proposent d'utiliser la vapeur d'eau produite par l'évaporation sous vide de l'eau de mer pour entraîner une turbine. CLAUDE voyait dans ce concept d'ETM en cycle direct (ou "ouvert", par opposition au cycle "fermé" proposé par d'ARSONVAL) la possibilité de produire à la fois de l'énergie et de l'eau douce par récupération de la vapeur dans les étages de condensation après son passage dans la turbine.



**Figure 22 : Usine ETM flottante " La Tunisie, réalisation de G. Claude pour la vente de glace, Brésil 1935**

Néanmoins, CLAUDE est convaincu que l'ETM n'est pas économiquement compétitive avec les autres sources d'énergie de son époque, l'hydraulique en particulier. Pour lui, déjà, l'avenir industriel de l'exploitation du gradient thermique des mers passait par la production intégrée "multi produits" : énergie, eau douce et froid. C'est à partir de cette vision qu'il entreprend entre 1933 et 1935 la construction d'une usine à glace pour le Brésil "LA TUNISIE", dont l'installation en mer se soldera par un échec.

En 1942, à l'initiative du Ministère des Colonies et du CNRS, un comité technique réévalue la filière ETM et en 1948, la société d'économie mixte "Energie des mers" est créée dans le but d'étudier une usine électrogène de 2 x 3,5 MWe pour la Côte d'Ivoire. Malgré les conclusions favorables de cette étude, le projet est abandonné en 1956 au profit d'une usine hydraulique.

Jusqu'en 1973, l'intérêt pour le concept OTEC fut très limité. Les spécialistes de l'énergie jugeaient alors que l'utilisation des énergies fossiles puis du nucléaire fournirait largement le marché à un coût minime. Le premier choc pétrolier et les considérations environnementales croissantes ont débloqué les premiers investissements américains. Ces derniers ont permis en 1979 la production nette d'électricité d'une centrale baptisée « Mini OTEC » basée à Hawaï. C'est une centrale flottante sur barge qui produira pendant plusieurs semaines 15 kWe net. Celle de NAURU (1982) et celle de TOKU NOSHIMA (fin 1978), construites à terre, sont aussi en cycle fermé respectivement à l'ammoniac et au fréon. Citons aussi à partir de 1978 la construction d'un ensemble de moyens d'essai d'équipements, échangeurs notamment, à terre, au "Natural Energy Laboratory", et en mer, sur le navire OTEC 1 ancré au large d'Hawaï.

Les Français, avec un consortium comprenant l'IFREMER, ont approuvé la faisabilité économique d'une centrale de 20 MW à Tahiti. Leur programme prévoyait la construction d'une centrale pilote de 5

MW avant 1989. Mais la chute du cours du pétrole en 1986 a mis un terme à l'ensemble des grands projets. Les gouvernements respectifs ont alors stoppé (France) ou fortement réduit (Japon, Etats-Unis) leurs subventions.

De 1990 à aujourd'hui, quatre acteurs principaux se sont dégagés: NEHLA (laboratoire américain actuellement centré sur l'étude de l'eau de grande profondeur), SSP (firme américaine privée), NIOT (institut indien des technologies de l'océan) et surtout IOES (institut japonais de l'énergie de l'océan). En l'absence d'une veille technique ou d'accord de coopération avec les pays qui sont restés actifs, il est difficile d'apprécier les progrès réalisés récemment à l'étranger sur ces technologies ETM.

La dernière réalisation connue est la centrale ETM « Sagar Shakti » de 1 MW construite en coopération indo japonaise. Elle est adaptée aux besoins de petites communautés littorales en électricité et en eau douce. Elle a été présentée en 2001 avant d'être remorquée pour essais sur la côte près de Tuticorin au sud-est du continent. Plus tard, la Canalisation d'Eau Froide a essuyé quelques problèmes, ce qui a entraîné l'arrêt de la centrale « Sagar Shakti ».

En résumé, plusieurs expériences ont bel et bien confirmé la possibilité de produire de l'énergie à partir de la différence de température entre l'eau froide profonde et l'eau chaude de surface.

Dans le courant de l'année 2008, plusieurs consortiums d'industriels, d'instituts de recherche et de groupes pétroliers, se sont positionnés pour développer des centrales ETM offshore. Les îles pour le moment pressenti pour l'implantation de ces centrales sont : Hawaï, Tahiti et La Réunion.

La société Lockheed Martin s'est positionnée pour la mise en place d'une centrale ETM de 10 MW à Hawaï. La société Pacific OTEC collabore avec Xenosys (Institut de recherche Japonais) pour la mise en place de l'ETM à Tahiti. L'île de La Réunion, s'étant fixé un objectif d'autosuffisance énergétique électrique en 2025-2030 grâce à l'utilisation d'énergies renouvelables, devra, selon les études prospectives de mix énergétique, installer au minimum une puissance de 100 MW d'ETM en 2025.

Le 07 Avril 2009, la Région Réunion et DCNS (premier constructeur naval européen) ont signé une convention de partenariat de Recherche et Développement pour la réalisation d'une étude de faisabilité pour la mise en place d'un démonstrateur ETM à La Réunion.

Les premiers résultats de cette étude ont été présentés à la fin du mois de juin 2009. Le démonstrateur ETM pourrait être implanté au large de la ville du Port par 1400 m de profondeur et ancré sur des fonds allant de 1000 à 1600 mètres profondeur. L'eau serait pompée à environ 1150 m de profondeur et la centrale aurait une puissance nette de 1,5MW pour une puissance brute de 2,1 MW, elle aurait un diamètre de 30 mètres et une hauteur de 25 mètres et pourrait être mise en service en 2014, s'il n'y a aucun contretemps.

Un plan de levée de risque a été lancé à partir de Juillet 2009 pour la mise en place d'un banc d'essais ETM (prototype à terre) sur le site de l'IUT de Saint Pierre (Université de La Réunion), la réalisation de mesures sur site (courantologie, houle, température) et des études sur la canalisation d'eau froide profonde. Vers le mois d'Octobre 2010, les premières estimations financières sur le coût du démonstrateur ETM seront connus ainsi que les premières estimations du cout de revient de l'électricité produite par les centrales ETM de série.



Figure 23 : Illustration du démonstrateur ETM implanté au large de La Réunion

La carte ci-dessous représente le site d'implantation éventuel du démonstrateur au large de la ville du Port.

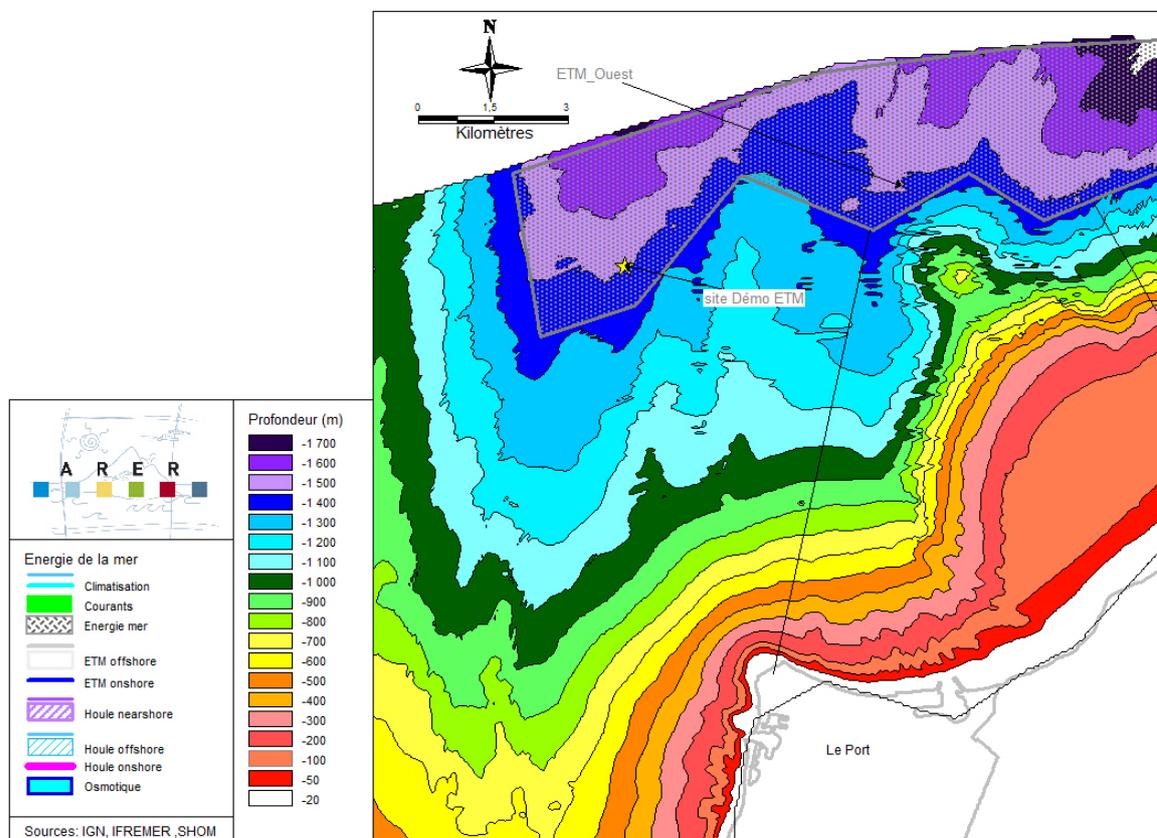


Figure 24 : Représentation du site d'implantation éventuel pour le démonstrateur ETM à La Réunion

## I - 4 Climatisation par eau froide sous-marine

### I-4.1 Description

Comme pour l'Energie Thermique des Mers, la climatisation par eau froide sous marine consiste à utiliser la basse température de l'Eau Froide Profonde, pour climatiser des bâtiments aussi efficacement que les méthodes classiques et à des coûts inférieurs. Ce principe intervient dans le domaine de la Maîtrise de la Demande en Energie (MDE) et non dans la production directe d'énergie.

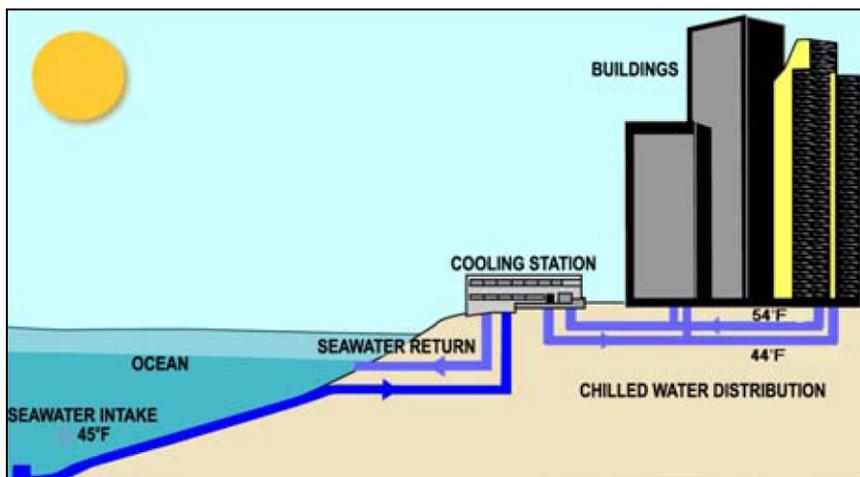


Figure 25 : Principe de fonctionnement de la climatisation sous-marine

Le schéma précédent décrit le principe de fonctionnement de la climatisation par eau froide sous marine. L'eau froide est pompée à de grandes profondeurs puis passe dans une station d'échange (sur la figure précédente, la 'cooling station'), pour refroidir le circuit d'eau froide en boucle fermé (dénommé 'chilled water distribution'), qui parcourt les installations à climatiser.



Figure 26 : Photos extérieure et intérieure de la station d'échange de l'Université de Cornell

### **I-4.2 Contraintes d'implantation**

La technologie de climatisation par eau froide sous marine (en anglais : SWAC, Sea Water Air Conditionning) requière un site d'implantation, disposant au minimum des conditions suivantes :

- Un site à terre où les besoins en climatisation sont importants
- Un bon accès à la ressource en eau froide profonde (tombants rapides).
- Un fond marin facilitant les ancrages pour la canalisation d'eau froide
- Une faible exposition à la houle et aux courants marins
- Un espace au sol suffisant pour l'implantation de la station d'échange

Les impacts sur la faune et la flore d'une installation de climatisation par eau froide sous marine sont peu connus. Il semble que le rejet de l'eau froide réchauffée de quelques degrés à une profondeur adéquate limite fortement l'impact sur l'environnement

Les principaux inconvénients de la technologie SWAC sont:

- Un investissement initial élevé, dû aux installations imposantes à mettre en place
- La mise en place d'un réseau d'eau froide et à son adaptation sur les bâtiments existants
- La gestion technique et des risques pour le génie maritime et la Canalisation d'Eau Froide profonde.

Des contraintes concernant l'aménagement apparaissent aussi pour implanter cette technologie à savoir :

- L'ancrage (ou/et ensouillage) de la CEF
- L'éventualité d'un aménagement portuaire pour la mise en place de la CEF.
- Les contraintes de travaux VRD pour le passage d'un réseau d'eau froide.

A la Réunion, une contrainte supplémentaire concernera la résistance de la Canalisation d'Eau Froide aux conditions cycloniques (vents, houles) et aux fortes houles australes.

### **I-4.3 Veille technologique et réalisations existantes**

En Polynésie française, le Sea Water Air Conditioning (SWAC) est déjà installé à Bora-Bora dans un grand hôtel de luxe, avec une puissance installée de 1,5MWf (MWf : le mégawatt froid est l'unité de mesure des puissances frigorifiques). Après deux ans de fonctionnement, les économies réalisées par rapport à un système de climatisation conventionnel sont de l'ordre de 90, [4]. Le futur hôpital de Papeete (Tahiti) et un autre hôtel sur l'île de Tetiaroa reprendront certainement et très prochainement ce principe pour leurs climatisations. A Curaçao, cette technologie a été installée et de nombreux autres projets verront le jour autour du globe.

Depuis 1999, le campus universitaire de Cornell (Etat de New York) utilise de l'eau froide d'un lac pour sa climatisation. Des études de faisabilité ont aussi été réalisées pour la climatisation de quartiers de la ville de Toronto au Canada et d'une ville de l'état de New York.

Par ailleurs, un système SWAC urbain est en cours de construction à Hawaï pour la ville d'Honolulu.



**Figure 27 : Photo de l'hôtel Intercontinental de Bora- Bora utilisant un système de climatisation par eau froide sous marine**

## I- 5 Energie osmotique

### I-5.1 Description

Encore en phase de recherche et développement, l'énergie osmotique présente un fort potentiel pour la production énergétique renouvelable de base. Cette énergie se base sur le phénomène naturel d'osmose, qui désigne le flux à travers une membrane semi-perméable, d'un liquide peu concentré vers un liquide plus concentré. Ce principe peut permettre de produire de l'énergie à partir de la différence de salinité entre l'eau douce et l'eau salée.

Lorsque l'eau douce est séparée de l'eau de mer par une membrane semi-perméable, elle va naturellement passer dans le compartiment d'eau de mer et augmenter la pression de celui-ci. Cette pression peut ainsi être utilisée pour faire tourner un moteur hydraulique et produire de l'électricité

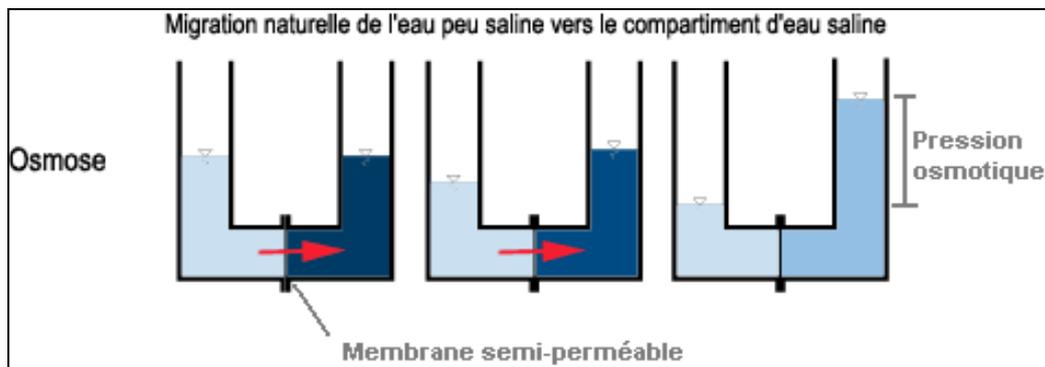


Figure 28 : Principe de l'osmose

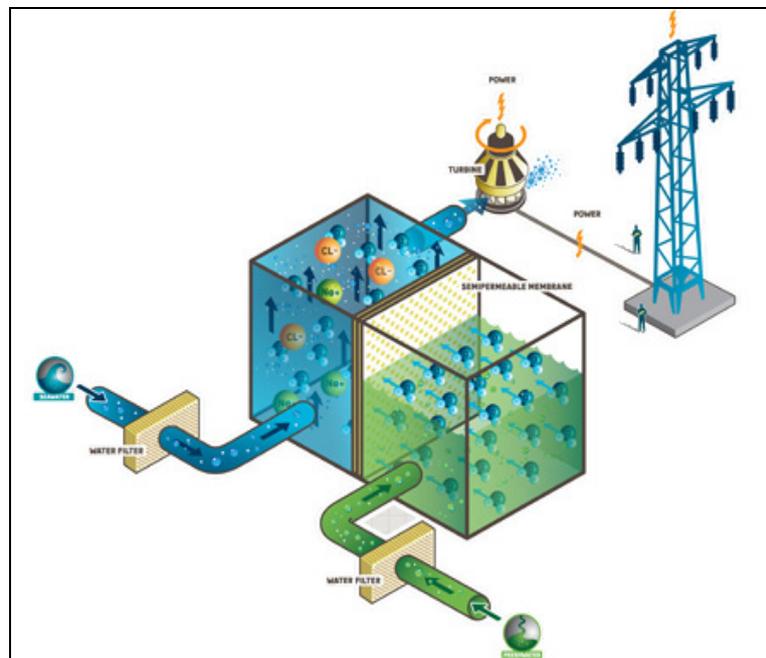


Figure 29 : Schéma de principe d'une centrale à énergie osmotique

Il est à savoir que la pression osmotique entre l'eau douce et l'eau salée est de 27 bars (soit 270 m de colonne d'eau). Une usine d'énergie osmotique utiliserait une partie de cette différence de pression, à savoir environ 11-12 bars, ce qui correspondrait à une usine hydroélectrique disposant d'une hauteur de chute de 120m.

La société, STATKRAFT, [5], rappelle que ce type d'usine peut être installé à chaque embouchure de fleuve, en milieu urbain et peut être si nécessaire enterré. La production énergétique à partir de l'énergie osmotique est stable et prévisible contrairement à d'autres énergies renouvelables et les processus de gestion de l'eau liés à l'opération de l'usine peuvent être conçus sans affecter les biotopes. Le potentiel mondial de production électrique est estimé, selon la société Statkraft [1], à environ 1.600-1700 Terawattheure (TWh) par an, dont 200 TWh en Europe.

### **I-5.2 Contraintes d'implantation**

L'énergie osmotique requière un site d'implantation, disposant au minimum des conditions suivantes :

- Proximité et bonne qualité de l'eau douce et de l'eau de mer
- Un espace foncier suffisant

Les impacts sur la faune et la flore d'une centrale à énergie osmotique sont peu connus (voire même inconnus). Ils seraient à priori faibles vu que le mélange entre l'eau douce et l'eau de mer se ferait naturellement. Une attention devra être portée si des produits chimiques étaient utilisés pour le fonctionnement de la centrale.

Bien qu'encore au stade de développement, les principaux inconvénients de la technologie de l'énergie osmotique semblent déjà identifiés:

- L'importante surface de membrane nécessaire
- Un investissement initial élevé, dû aux coûts des membranes et aux aménagements importants
- La maintenance et le coût des membranes semi-perméable

### **I-5.3 Veille technologique et réalisations existantes**

L'idée d'utiliser le gradient de salinité de salinité pour créer de l'énergie a été soulevée dans les années 70. Le prix des membranes et le faible coût de l'énergie n'ont pas permis le développement de cette technologie. Depuis 1997, la société Statkraft se penche sur le sujet et à réaliser récemment des tests à petites échelles. En 2008-2009, la société devrait construire la première usine pilote d'énergie osmotique à Tofte, au sud Ouest d'Oslo en Norvège. Aujourd'hui, Statkraft a investi une dizaine de millions d'euros dans l'énergie osmotique et prévoit de développer encore cette filière. Leur objectif est de présenter à l'horizon 2012, un produit opérationnel, une usine d'énergie osmotique.

## **I - 6 Biomasse marine**

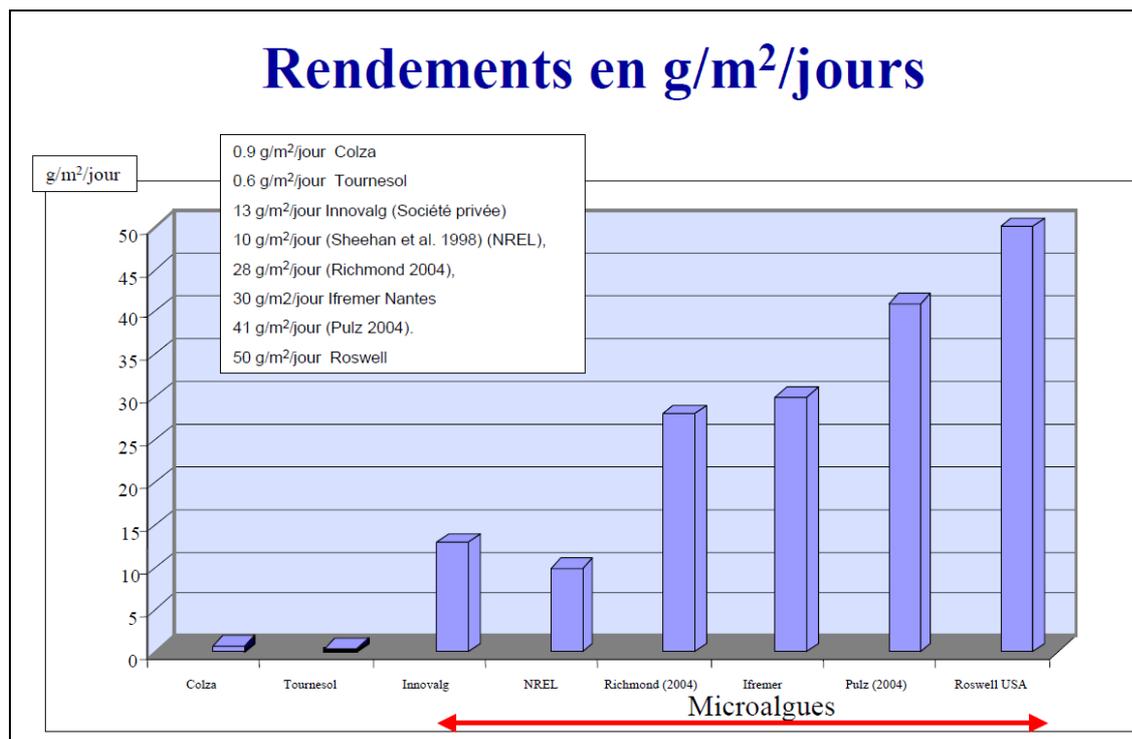
### **I-6.1 Description**

Face à une future pénurie du pétrole, la recherche et développement est en pleine effervescence afin de suppléer la pétrochimie. Le pétrole est omniprésent dans notre économie actuelle, utilisé dans de nombreux secteurs et servant à la fabrication de nombreux produits : plastiques, carburants, textiles, solvants, engrais, médicaments et cosmétiques (shampoings, crèmes...), additifs alimentaires (colorant artificiel, texturant), peintures. Tout ceci est produit grâce à la synthèse chimique de composés issues du raffinage du pétrole.

L'objectif est de créer une nouvelle chimie basée sur l'utilisation de ressources renouvelables à court terme comme les microalgues, on l'appelle la chimie verte.

Les avantages d'utiliser les microalgues comme ressources renouvelables sont nombreuses. Parmi celles-ci, les plus importantes sont sans aucun doute leurs rapidités de croissance et leur productivité à l'hectare en comparaison des autres plantes (Cf. figure suivante)





**Figure 30 : Rendements de production en biomasse de différents végétaux (source IFREMER)**

Dans le domaine de la valorisation de la biomasse, les microalgues possèdent un avantage concurrentiel par rapport aux autres végétaux. Il s'agit également de microorganismes, qui permettent de travailler dans le domaine des biotechnologies, avec par exemple la production de molécules d'intérêt pour l'industrie pharmaceutique. Celles-ci sont généralement produites avec des bactéries ou des levures.

Les microalgues sont des végétaux, leur production est une activité agricole, qui fixe du carbone et ne participe pas à l'effet de serre. Elles font partie des premiers organismes à être apparus sur terre et à avoir contribué à l'élaboration de notre atmosphère actuelle en captant l'énergie solaire. Il est aussi possible d'utiliser les fumées d'usines afin de récupérer le CO<sub>2</sub>, cette activité est communément appelée remédiation de CO<sub>2</sub>.

Ces microorganismes sont de véritable usine cellulaire. Contrairement aux végétaux terrestres, elles vivent en milieu aqueux et n'utilisent pas l'énergie solaire aux mêmes fins et de la même façon. Par exemple, elles ne synthétiseront pas de lignine. Celle-ci est présente en masse chez les végétaux terrestres pour leur permettre d'adopter un port en hauteur et de résister à la pesanteur. Par conséquent, l'énergie solaire captée par les microalgues sera utilisée pour synthétiser d'autres molécules qui pourront être ainsi valorisées. Elles ont un meilleur rendement photosynthétique car leur croissance en suspension dans un milieu aqueux leur permet un meilleur accès aux ressources : eau, CO<sub>2</sub> ou minéraux.

Au vu de tous ces avantages, la filière microalgues est vouée à se développer et particulièrement dans les régions fortement ensoleillées. Les tropiques, présentant des atouts climatiques, sont un lieu idéal pour le développement de cette filière.

### **I-6.2 Contraintes d'implantation**

D'un point de vue environnemental, leur culture se fait en milieu fermé et contrôlé. Il est tout de même préférable d'utiliser des espèces d'algues/microalgues endémiques. L'introduction d'espèce est très contrôlée. De ce fait, un important travail doit être menée sur l'identification des microalgues locales et sur les propriétés leur apportant une valeur ajoutée pour leur revente sur un quelconque marché.

Tous les nutriments apportés à leur culture pourront être recyclés et non pas libérés dans le sol, comme pour des cultures en plein champs. Les risques de pollution sont donc moindres. Leur développement n'entre pas en concurrence avec l'alimentation, en effet leur production peut se faire en bassin ou photobioréacteur. Aucune terre arable n'est donc nécessaire. De plus pour les microalgues marines aucune eau douce n'est nécessaire.

Un bon ensoleillement est aussi nécessaire pour que ces organismes photosynthétiques est une croissance normale.

### **I-6.3 Veille technologique et réalisations existantes**

De nombreuses entreprises et multinationales se positionnent dans la culture de microalgues pour répondre aux besoins des marchés aussi diverses que la pharmaceutique, la cosmétique, la production de biocarburant, l'alimentation humaine et de bétails.

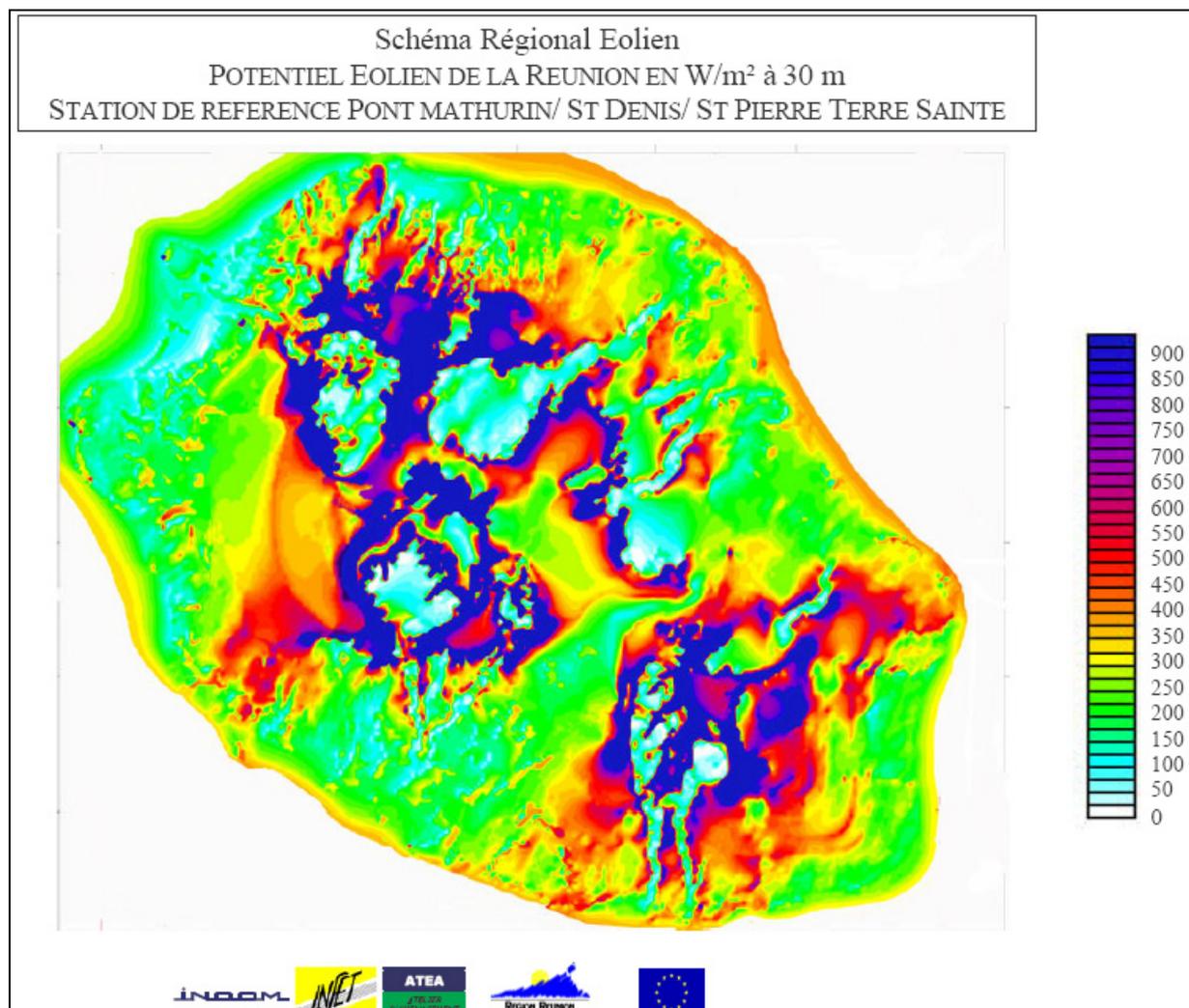
## **I - 7 Eolien offshore**

### **I-7.1 Description**

Après un développement principalement terrestre, il semblerait que le futur de l'énergie éolienne se joue en mer, où il est possible d'implanter des machines plus puissantes. Extrêmement prometteuse, l'exploitation de la ressource éolienne en mer convient particulièrement dans les pays à forte densité de population ayant des difficultés à trouver des sites appropriés sur terre. Bien que les coûts de construction soit plus élevés en mer que sur terre, l'éolien offshore permet d'obtenir une production plus régulière et plus importante du fait que les vents en mer soit plus constants.

L'île de La Réunion est soumise aux vents d'alizés provenant des grandes latitudes Sud. Ses côtes Est, Sud et Nord sont beaucoup plus exposés au vent que sa côte Ouest, qui est elle protégée par les hauts massifs du centre de l'île. La carte suivante, extraite du schéma régional éolien présente le potentiel éolien réunionnais.





**Figure 31 : Potentiel éolien de La Réunion (Source : Schéma régional éolien)**

### **I-7.2 Contraintes d'implantation**

Les éoliennes offshore requièrent un site d'implantation disposant au minimum des conditions suivantes:

- Une bonne occurrence des vents,
- Une bathymétrie comprise entre 20 et 100 m de profondeur (peut être à l'avenir entre -120 et -700 m)

Les principaux inconvénients des technologies d'éoliennes offshore sont:

- Un coût élevé dû, entre autres, à des opérations de maintenance.
- La corrosion des matériaux par l'eau de mer.
- L'opposition des usagers de la mer, due à la restriction de zone de pêche ou de navigation.
- Une gêne visuelle.

Des contraintes concernant l'aménagement apparaissent aussi pour implanter ces technologies à savoir :

- Le passage du câble électrique sous marin ramenant l'énergie produite (ou l'eau sous pression) sur terre. (ancrage, ensouillage).
- L'implantation d'une station de transformation du courant pour la connexion au réseau.

- L'utilisation possible de moyen lourds pour la construction et la maintenance des machines.
- L'implantation sur des bathymétries profondes

A La Réunion, des contraintes supplémentaires concerneront la résistance aux cyclones (vents, houles) et aux fortes houles australes. **A l'heure actuelle à La Réunion, aucune éolienne de grande puissance n'existe à terre et encore moins en mer, répondant aux contraintes d'un climat tropical cyclonique.**

### **I-7.3 Veille technologique et réalisations existantes**

Concernant les éoliennes terrestres installées à La Réunion, la violence des cyclones exige de limiter la taille des machines et d'opter pour des technologies adaptées à ces conditions météorologiques (mats haubanés basculants permettant de rabattre l'éolienne). Il s'agit d'éoliennes de moyennes puissances dont les dimensions sont les suivantes :

- Hauteur du mât : 55 mètres,
- Diamètre du rotor : 32 mètres,
- Puissance nominale : 275 kW.

Sur le vieux continent, les éoliennes terrestres peuvent atteindre des puissances de 3 MW pour des diamètres de rotor de 100 mètres de diamètre et des hauteurs de mat de l'ordre de 120m.

A La Réunion, les éoliennes terrestres sont limitées en puissance à 275 kW, pour qu'elles puissent se rabattre sur le sol en cas de cyclone. **La mise en place d'éolienne offshore à La Réunion ne se fera que si les avancées technologiques permettront d'installer des éoliennes offshore « rabattables » ou « immergeables » ou résistantes aux forts vents et fortes houles pour affronter les conditions cycloniques.**

**Si ce verrou technologique était passé**, grâce à des éoliennes offshore immergeables, il serait possible d'installer des éoliennes de fortes puissances (jusqu'à 3 MW) à La Réunion.

Par ailleurs en Europe, les éoliennes offshore utilisent la même technologie que les éoliennes on-shore. Les conditions météorologiques plus rigoureuses en mer nécessitent des exigences spécifiques pour la base, la tour et le système de contrôle. A La Réunion, la contrainte supplémentaire sera d'immerger cette éolienne et qu'elle puisse s'implanter à de grandes profondeurs.

Aujourd'hui, de nombreux parc éoliens offshore ont déjà été installés en Europe et de nombreux autres verront bientôt le jour. Ci-après seront présentés un parc éolien de Nysted et une technologie en développement ayant un potentiel important pour La Réunion.

#### **Le parc éolien offshore de Nysted**

Construit en 2003, ce parc éolien (Cf. figure suivante) est situé à environ 10 km au sud de la ville de Nysted dans la partie sud-est du Danemark. Il est composé de 8 rangées de 9 éoliennes. Ces 72 éoliennes d'une puissance unitaire de 2,3 MW totalisent 165,5 MW de puissance installée.

Le mât des éoliennes mesure 70 m et le diamètre des rotors est de 82,4 m. Lorsque la pôle atteint son point culminant, l'éolienne mesure alors 110 m de haut. Elles produisent 595 millions de KWh par an, ce qui couvre les besoins en électricité de 145.000 foyers danois. Le coût total de l'installation du parc était de 213 millions € et les coûts annuels de maintenance se situent autour de 1,5 à 2 % de l'investissement initial.





Figure 32 : Parc éolien de Nysted (Danemark)

### Eolienne Hywind :

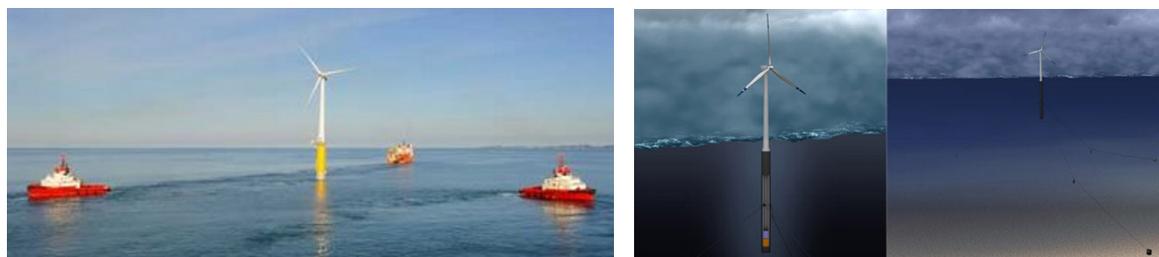


Figure 33 : Photo et image de synthèse de l'éolienne offshore flottante Hywind

L'éolienne flottante Hywind fabriquée par le pétrolier Statoil Hydro a été remorquée sur son site de test en Norvège. Elle va devenir la toute première éolienne flottante testée en mer. La période d'essai débutera officiellement en automne 2009 (Septembre) et durera deux ans. Ce premier démonstrateur de turbine flottante possède la particularité de combiner la technologie éolienne offshore à celle de l'industrie du pétrole et du gaz et s'appuie sur plusieurs expertises offshore pétrolières (Statoil Hydro et Technip).

Le concept d'éolienne flottante Hywind offre, pour la première fois au monde, la possibilité d'exploiter le vent en haute mer dans des environnements variant **de 120 à 700 mètres de fonds**, ce qui n'est pas le cas avec les éoliennes offshore classiques actuellement en fonctionnement. Hywind offre aussi et surtout la possibilité d'affronter, tout comme les plates-formes pétrolières en haute mer, les conditions météorologiques les plus rudes et de pouvoir rester productive même pendant les tempêtes ce qui, là encore, n'est pas le cas des éoliennes offshore classiques.

La structure flottante de Hywind est constituée d'une gaine en acier lestée, fixée au fond marin non pas par une base en béton mais par des câbles reliés à trois pieux d'ancrage. La turbine d'une puissance de 2,3 MW est construite par l'équipementier international d'origine allemande Siemens. Dans cette collaboration véritablement internationale, il est important de souligner que deux entreprises françaises ont su trouver leur place : le pétrolier Technip, chargé de toute l'installation offshore et Nexans leader mondial de l'industrie du câble, qui installera le câble acheminant l'électricité produite en haute mer jusqu'au rivage où l'entreprise norvégienne Haugaland Kraft sera responsable des opérations de raccordement au réseau.

## II - RECUEIL DES DONNES LOCALES

**II - 1 Compilation des données existantes**

A La Réunion, de nombreuses études ont déjà été menées dans d'autres domaines touchant le milieu marin. Ces études peuvent faire office de bibliographie pour le développement des énergies marines sur l'île. Le tableau suivant énumère ces études et les données, qui amélioreront dans les prochaines années la connaissance du milieu marin réunionnais.

	Organisme	Intitulé de l'étude ou des données	Fin de l'étude	Contact
<b>E T U D E S</b>	Université de la Réunion	Étude sédimentologique des Baies de Saint Paul et de La Possession (Roland TROADEC)	1991	Roland TROADEC
	ARER	Étude sur l'énergie des vagues (ARER 2003, Gwenole PERONNO)	2003	www.arer.org
	Université de la Réunion et de Clermont Ferrand	Les déstabilisations de flanc des volcans de l'île de La Réunion (OEHLER, Thèse universitaire)	2005	Laboratoire géoscience
	Université de La Réunion	Thèse sur la géologie des fonds marins (Franky SAINT ANGE)	2008	Laboratoire géoscience
	Université de La Réunion	"Dynamique hydro sédimentaire du récif frangeant de l'Hermitage / La Saline Processus physiques et flux sédimentaires" (Thèse universitaire d'Emmanuel CORDIER)	2007	Laboratoire ECOMAR
	Région Réunion	Modélisation numérique de l'énergie des vagues dans le sud de La Réunion (étude BCEOM)	2005	Service DEAT Région Réunion
	Région Martinique	Étude de modélisation pour l'exploitation des ressources marines pour la production d'électricité dans les Régions Ultra Périphériques (étude egis eau)	2007	Service DEAT Région Réunion
	BRGM	Étude sédimentologique autour de La Réunion (BRGM)	2008	Ywenn DE LA TORRE
	ARER	Étude sur l'ETM et l'utilisation de l'eau froide profonde au Port (ARER 2008, Matthieu HOARAU)	2008	www.arer.org
	ARER	Étude sur le mix énergétique réunionnais (ARER 2008, Matthias LEVY)	2008	www.arer.org
	ARER	Publication ICOE "Ocean Energies In Réunion Island" et création d'un poster	2008	www.arer.org
	ARER	Publication ICOE "0 TO 1000 m DEEP OCEAN WATER CHARACTERIZATION FOR OTEC AND SWAC APPLICATIONS, REUNION ISLAND"	2008	www.arer.org
	ARER	Étude sur l'énergie osmotique à sainte Rose (ARER 2009, Matthieu HOARAU)	2009	www.arer.org
	ARER	Étude sur le développement de l'ETM et de l'utilisation de l'eau froide profonde à Sainte Rose (ARER 2009, Matthieu HOARAU)	2009	www.arer.org
IFREMER	Étude courantologie autour de La Réunion de l'IFREMER rendu prévu 2011	2011		
<b>D O N N E E S</b>	DDE	Données des houlographes de la DDE (DDE, antenne travaux dragages, phares et balises)	Depuis 2001	Henri ALLAERT
	DIREN	Mesure de température de l'eau de surface de la DIREN autour de La Réunion (programme de surveillance, RNO)	Depuis 2002	Pascal TALEC
	IFREMER	Données de l'IFREMER/NOAA /NODC pour la connaissance de l'océan (température, salinité, marée, courants, ...)	Depuis 2004	<a href="http://www.coriolis.eu.org">www.coriolis.eu.org</a>
	Capitainerie du Port/DDE	Données de courantologies, de marées, de houle à l'entrée des Port Est et Ouest	Depuis 2007	Henri ALLAERT
	Mairie de Saint Pierre/CIVIS/ARE R	Données de houle de la future étude de faisabilité pour l'implantation de PELAMIS à Saint Pierre (mairie de Saint Pierre, CIVIS)	2009-2010	
	Mairie de Saint Pierre/CIVIS	État des lieux environnemental de la zone de la Pointe du Diable	2009-2010	
	DDE	Données bathymétriques de la DDE (Port Est et Ouest)		
	Université de la Réunion Laboratoire ECOMAR	Mesure de température de l'eau en surface durant 10 ans au Port (1993 - 2004) A Ten-year Period of Daily Sea "Surface Temperature at a Coastal Station in Reunion Island, Indian Ocean (July 1993 – April 2004): Patterns of Variability and Biological Responses"	2005	François CONAND
		Données de courantologies appartenant aux diverses communes relatives à l'implantation des diverses stations d'épuration (différents bureaux d'études)		
		Étude géotechnique de la future route du littoral (Utile à la possible implantation de technologie de récupération de l'énergie de la houle on shore)		
	Étude sur l'installation du câble Internet Safe			

**Tableau 1 : Tableau récapitulatif des études et données relatives au milieu marin réunionnais et utiles au développement des énergies marines.**



## **II - 2 Compilation d'informations**

Les caractéristiques de l'île de La Réunion en font un territoire atypique avec de nombreux microclimats. Il est possible d'imaginer ces mêmes microclimats en milieu marin. Dans ce cas, les expériences de plongeurs, pêcheurs ou autres usagers de la mer peuvent s'avérer très précieuses pour la localisation de sites propices à la récupération des énergies de la mer, plus particulièrement en ce qui concerne les courants marins.

### **a) Informations sur les courants marins**

Lors de l'ancrage de parcs à poissons en Baie de Saint Paul, des plongeurs se sont, plusieurs fois, faits emporter par des forts courants de fond. Les clubs de plongées ont confirmé ces phénomènes vers les 40-50 mètres de profondeur alors qu'aucun signe à la surface ne pouvait laisser présager de la présence de ces courants. Un effet d'entonnoir semble se produire dans la baie de Saint Paul mais l'origine de ces courants n'est pas clairement définie.

En 2009, une campagne de mesure des courants marins tentera de faire la corrélation avec tous les paramètres météorologiques de la Baie de Saint Paul. Une fois mesurés et caractérisés, il sera possible de juger si ces courants marins pourraient produire de l'électricité.

Sur ces mêmes dîres, les pêcheurs et plongeurs ont signalés la présence de courants marins au large de Saint Gilles (Saline, Hermitage) notamment sur le site de plongée dénommée « Piège à requin ». Les courants seraient dus aux vents d'alizés de Sud - Sud Ouest. Ils s'intensifieraient sur le platier sous marin en face de Saint Gilles à cause d'une diminution de la profondeur.

D'autres sites dans le Sud de l'île sont connus pour être le siège de forts courants, (en face de Grand Anse, de l'Anse des Cascades, de la Pointe de la Table, etc...). Un travail de concertation avec les pêcheurs locaux se doit d'être effectué pour tenter de localiser des ressources, qui pourraient être importantes et suffisantes mais très localisées en énergie des courants marins.

L'étude des courants marins de l'IFREMER qui se terminera en 2011, améliorera la connaissance sur les phénomènes de courants marins se formant autour de l'île de La Réunion. Il n'est pas certain que cette étude soit assez fine pour caractériser des sites très localisés, à forts potentiels de courants marins.

### **b) Informations sur le réseau électrique réunionnais et le raccordement au réseau**

La tension de raccordement de référence d'une installation de production d'énergie est déterminée en fonction de sa puissance maximale, conformément aux arrêtés du 17 mars 2003 et 4 juillet 2003 relatifs aux prescriptions de conception et de fonctionnement pour le raccordement électrique à un réseau public de distribution ou au réseau public de transport d'une installation de production d'énergie électrique. De façon synthétique, on retient :

Classe de tension	Puissance de l'installation
HTA	≤ 12MW
HTB1 (50-90 kV)	≤ 50 MW
HTB2 (150 -225 kV)	≤ 250 MW
HTB3 (400 kV)	> 250 MW

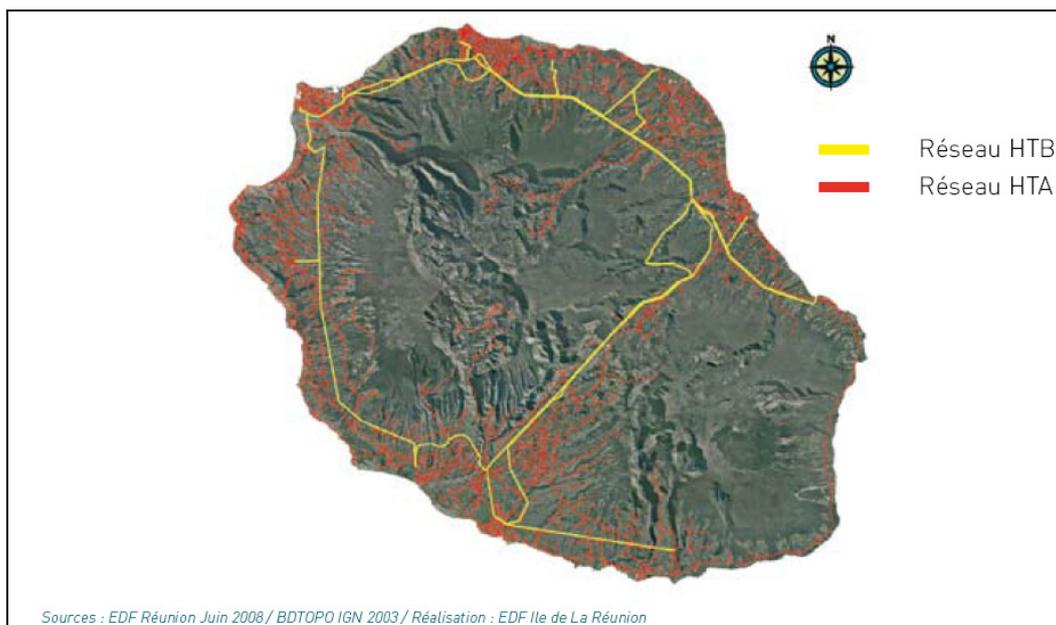
**Tableau 2 : Raccordement électrique au réseau public de distribution**

Outre la construction de la ligne à partir du poste source, il est possible qu'un renforcement du réseau en amont ou la création d'un poste source au droit d'une ligne soit nécessaire. Il s'agit là d'investissements supplémentaires à intégrer au coût global du projet.

Seuls les réseaux HTA et HTB1 (69 kV) existent à La Réunion. Le déploiement des importantes puissances photovoltaïques pour l'atteinte de l'autosuffisance énergétique de La Réunion en 2025 perturbera les flux d'énergie sur le réseau. Une optimisation des points d'injection et le renforcement de certaines lignes du réseau seront sans doute nécessaires.

La mise sur le réseau de l'énergie produite par les centrales de production d'énergie à base d'ERM de grandes puissances se fera donc en des points stratégiques du réseau électrique réunionnais.

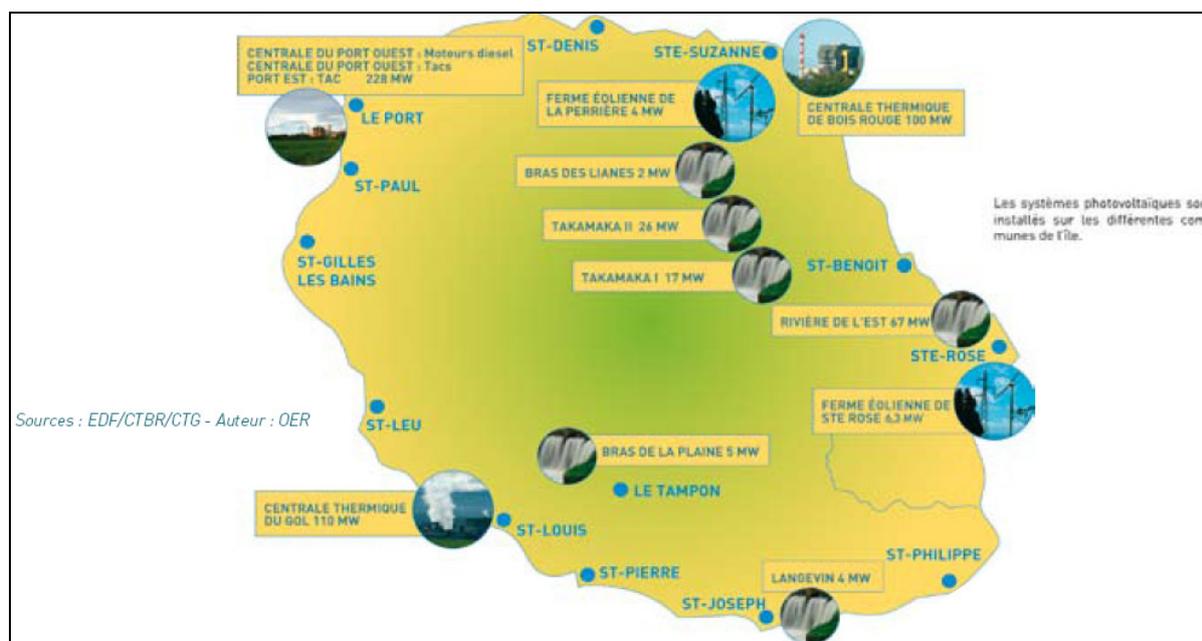




**Figure 34 : Réseau électrique haute tension de La Réunion**

La carte suivante représente les différents points de production d'énergie à La Réunion. Ces points de productions sont beaucoup plus nombreux sur la côte Est, où de nombreuses sources d'énergies renouvelables sont exploitées, notamment en hydraulique et en éolien). La production de la côte Ouest provient essentiellement de ressources fossiles (charbon, fioul).

En 2011, la centrale thermique du Port Ouest sera démantelée et sera remplacée par la future centrale thermique du Port Est. Le point d'injection de la centrale du Port Est devra être réhabilité ou réutilisé. Les contraintes liées au transfert d'énergie du réseau électrique réunionnais sont bien connues par le gestionnaire réseau. A première vue, l'implantation de sites de productions d'énergie renouvelable serait bénéfique à l'Ouest et au Sud-Ouest de l'île, pour pallier à la consommation de la côte Ouest et des populations se trouvant « en bout de ligne » de Saint Joseph à Saint Philippe.



**Figure 35 : Carte des sites de productions d'énergie réunionnais en 2007**



### **II - 3 Publications pour la Conférence Internationale sur les Energies des Océans (ICOE)**

Du 15 au 17 Octobre 2008, s'est déroulée à Brest, l'ICOE. Lors de cette conférence internationale sur les énergies renouvelables marines, l'ARER a présenté deux publications.

La première présentation concernait les prélèvements d'eau froide profonde réalisés au Port en Avril 2008 ainsi que l'étude sur le développement de l'Energie Thermique des Mers et de l'utilisation de l'eau froide profonde sur le territoire de la ville du Port.

La seconde publication présentait les énergies de la mer à La Réunion. Il s'agissait là d'un travail précurseur à celui du schéma régional des énergies de la mer. Une brève présentation en anglais des sites potentiels pour la récupération de l'énergie des océans à La Réunion a ainsi été réalisée. Cette étude est téléchargeable sur le site web de l'ARER grâce au lien suivant :

<http://www.arer.org/moteurrecherche/affiche.php?article=278>



### III - DEVELOPPEMENT DES ERM A LA REUNION

#### **III - 1 Localisation des sites potentiels**

Le chapitre I s'est attardé sur la description de chaque Energie Renouvelable Marine (ERM), ainsi que sur les moyens et les contraintes de récupération de ces énergies. Grâce au croisement de ces divers paramètres, des zones et des sites, possédant un potentiel pour le développement des systèmes de conversion de ces énergies, ont été identifiés.

##### **a) Energie des courants**

Les paramètres techniques dimensionnant pour l'implantation des équipements de récupération de l'énergie des courants sont :

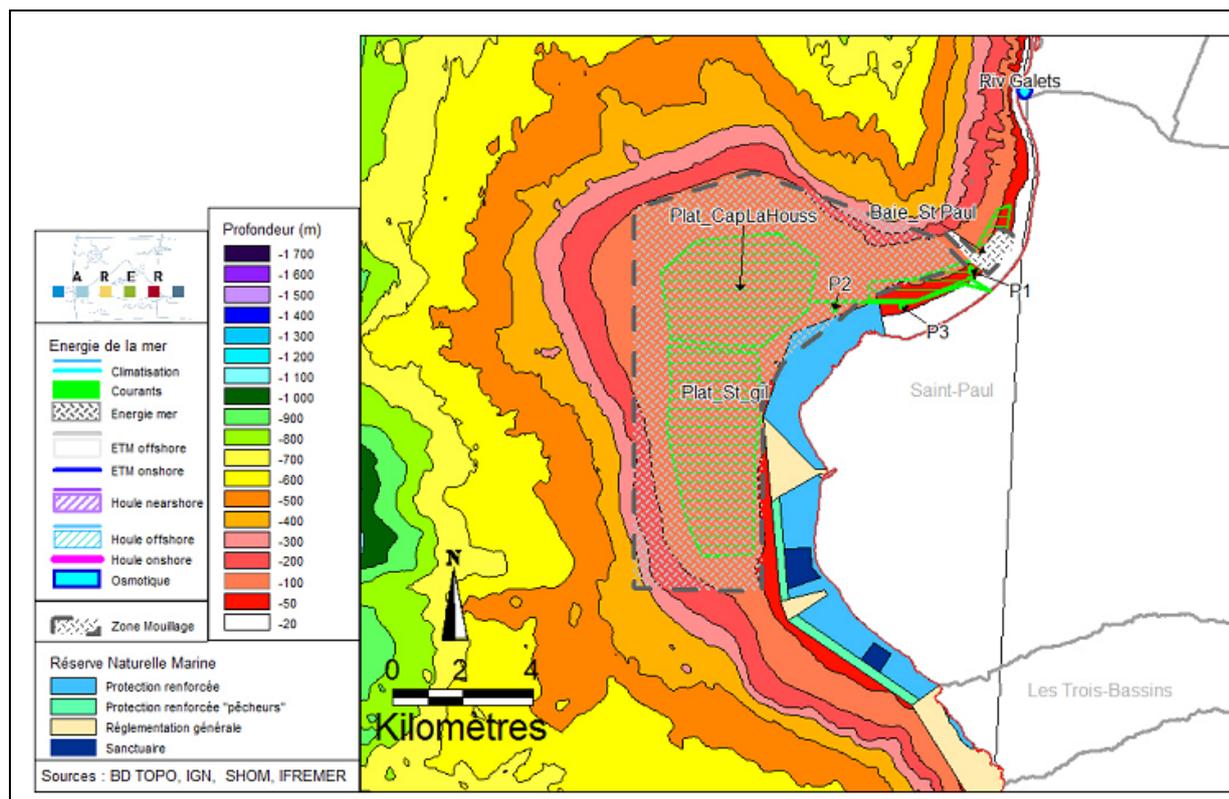
- Une bathymétrie inférieure à -70 mètres de profondeur
- Des courants marins forts ( $v > 2-3$  nœuds) et fréquents (~2000h/an)
- La nature des fonds / sédimentologie.

##### **Sites identifiés de la Baie de Saint Paul et du platier de Saint Gilles :**

Des courants marins ont été repérés en Baie de Saint Paul (cf. II - 2a) par des plongeurs. Ces observations ont été confirmées par d'autres centres de plongées. En 2009, l'ARER pilotera une campagne de mesure sur toute la colonne d'eau des courants marins en 3 points (P1, P2, P3) de la Baie de Saint Paul. Ces mesures devraient permettre de déterminer les phénomènes de formation de ces courants. Si les résultats sont positifs (courants mesurés d'environ 2 à 3 nœuds fréquents), cette étude de R&D serait la première approche pour le lancement d'une étude de faisabilité pour l'implantation d'un projet industriel de conversion de l'énergie des courants.

La Baie de Saint Paul dispose d'une surface de 2,6 km<sup>2</sup> (représenté sur la figure ci-dessous en hachuré vert : « B\_St Paul »). Les profondeurs sont comprises entre -25 m et -65 m, et la profondeur moyenne est de -45m. Les courants semblent se créer sous l'effet de vidange de la vallée sous marine.





**Figure 36 : Représentation des sites potentiels en énergie des courants en Baie de Saint Paul et en face de Saint Gilles**

#### **Sites potentiels du Platier en face de Saint Gilles (SEC) :**

En bordure de la Baie de Saint Paul commence un platier sous marin s'étendant jusqu'à la Saline les Bains (représenté sur la figure précédente par 2 polygones Plat\_CapLaHoussaye et Plat\_St\_Gil). Appelé communément le SEC par les pêcheurs, ce platier d'environ 25 km<sup>2</sup> de surface se trouve en face de la réserve naturelle marine. Entre 30 m et 100 m de profondeur, des courants marins de fond semblent aussi présents.

Le point de mesure, P2, de la campagne de mesure (évoquée dans le paragraphe précédent) se situe à la frontière séparant la Baie de Saint Paul au SEC. Les résultats obtenus sur ce point apporteront des informations sur la présence de courants de fond sur le SEC.

Bien que situé en bordure et en face de la réserve naturelle marine, il serait envisageable d'implanter, sur ce large platier, des technologies de récupération de l'énergie des courants, **imitant le mouvement d'animaux marins et respectueuses de la faune et de la flore (technologie Biostream).**

Dans un futur plus ou moins proche, le retour d'expérience et les impacts de ces technologies seront connus. L'implantation et l'impact de ces systèmes en milieu protégé seront alors contrôlés.

#### **Sites potentiels dans de Langevin et Grand Anse :**

Dans le Sud de l'île, certains lieux (Langevin, Grand Anse, etc...) sont connus pour la puissance de leurs courants. Possédant des fonds abrupts, le développement de technologies de conversion de l'énergie des courants semble compromis mais les avancées technologiques (surtout dans le domaine des ancrages et de la maintenance) pourraient à l'avenir y remédier. Une veille technologique doit être menée sur ce sujet, surtout en ce qui concerne les technologies récupérant l'énergie des courants de surface.

Afin de mieux connaître ces sites, il serait judicieux de rencontrer les usagers de la mer du secteur (pêcheurs, plongeurs, etc...) pour en savoir plus sur la force et la fréquence de ces courants avant tout lancement d'une campagne de mesure ou d'une étude de faisabilité. Le site potentiel de Langevin s'étend sur une surface d'environ 2 km<sup>2</sup> et celui de Grand Anse sur 0,8 km<sup>2</sup>.

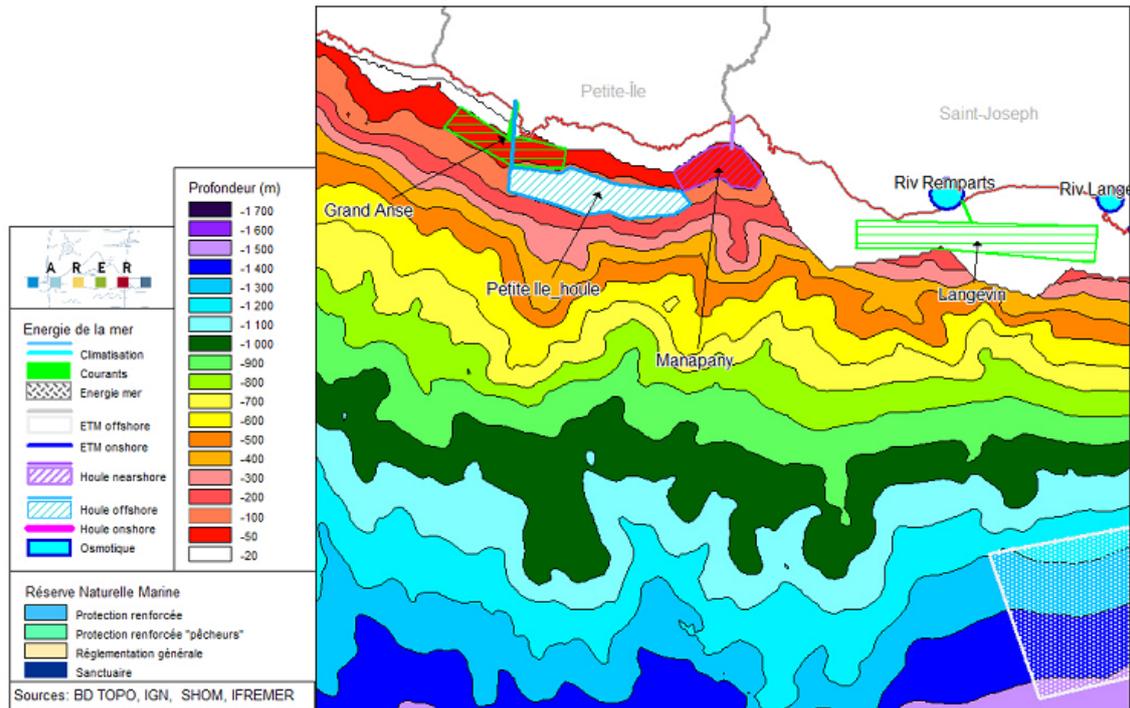


Figure 37 : Représentation des sites potentiels de Langevin et Grand Anse (où des courants de surface semblent présents)

### Platier de Piton Sainte Rose :

Dans le Sud-Est de l'île, des courants de surface puissants semblent se former sous l'effet des vents d'alizés en face de Piton Sainte Rose (1,4 km<sup>2</sup>). Le site pourrait être propice à l'implantation de technologie de récupération de l'énergie des courants.

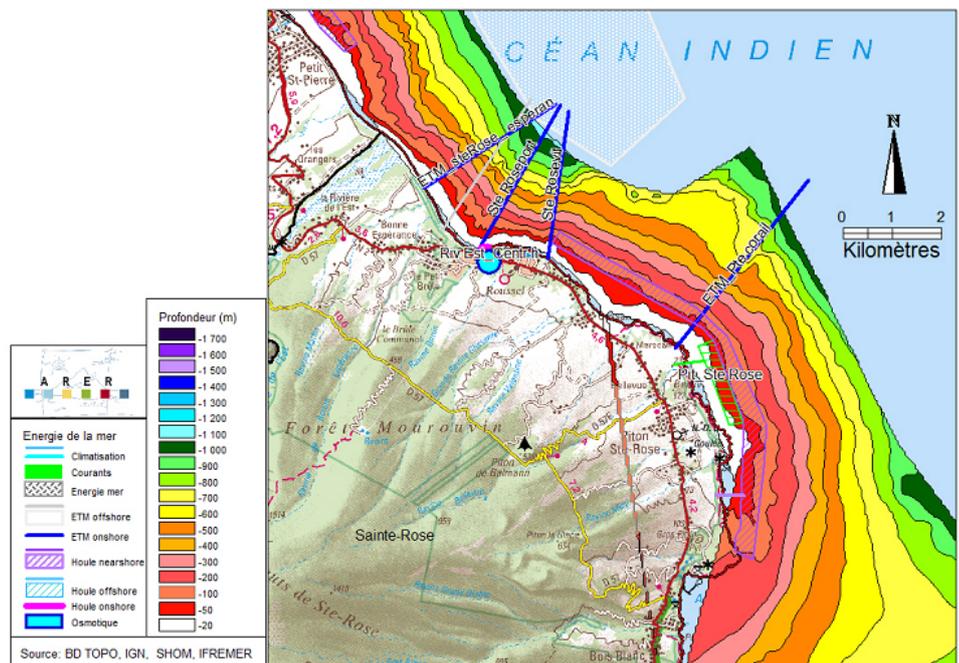


Figure 38 : Représentation du site potentiel de Piton Sainte Rose (où des courants de surface semblent présents)

### Autres sites potentiels :

En termes de bathymétrie, les sites potentiels pour l'exploitation de la houle near-shore pourraient aussi correspondre à l'exploitation de l'énergie des courants marins. Les études menées pour l'implantation de ferme houlomotrice demanderont certainement des mesures de courants. Une attention particulière devra être portée sur les données de courants mesurées sur ces sites.



Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques des sites potentiels en énergie des courants marins.

Energie	Identifiant	Caractéristiques	Activités	Morphologie de la cote	Evolution du littoral	Surface (km <sup>2</sup> )	Longueur cable électrique marin ou pipeline (km)	Profondeur Moyenne (m)	Profondeur minimum (m)	Profondeur maximum (m)	Puissance Potentielle (MW)	Perspective développement	Commune
Courants	P1	Mesure sur tte colonne d'eau 2009	Mesure courants			0.0	0.00	-36	-21	-44	0		
Courants	P2	Mesure sur tte colonne d'eau 2009	Mesure courants			0.0	0.00	-56	-21	-57	0		
Courants	P3	Mesure sur tte colonne d'eau 2009	Mesure courants			0.0	0.00	-25	-21	-28	0		
Courants	Baie_St Paul	Courants repérés par plongeur	Production électricité	plage de sable basaltique	Erosion modérée	2.6	0.76	-45	-21	-65	3	Moyen terme	Saint-Paul
Courants	Plat_St_gil	Courants repérés par plongeur, techno respectueuse de l'environnement.	Production électricité, techno respectueuse de l'environnement			13.5	0.00	-60	-21	-79	2	Long terme	
Courants	Plat_CapLaHouss	Courants repérés par plongeur, techno respectueuse de l'environnement	Production électricité, techno respectueuse de l'environnement	plage de sable basaltique	Erosion modérée	11.5	5.29	-63	-21	-68	2	Long terme	Saint-Paul
Courants	Langevin	Connaissance pêcheur/public	Production électricité	cordon de galets d'estuaire ou de cône-d	Engraissement	2.0	0.41	-77	-21	-77	1	Moyen terme	Saint-Joseph
Courants	Grand Anse	Site pour courants de surface forts	Production d'énergie	plage corallienne relativement évoluée d	Transition	0.8	0.60	-35	-21	-50	1	Court/moyen terme	Petite-Île
Courants	Pit_Ste Rose	Connaissance pêcheur/public	Production électricité	côte rocheuse basse	Erosion modérée	0.5	0.63	-27	-21	-47	0.5	Moyen/long terme	Sainte-Rose

**Tableau 3 : Caractéristiques des sites potentiels en énergie des courants marins**



## b) Energie des vagues

Le système global de houle présent dans la zone océanique de La Réunion est composé de trois houles différentes :

- Les houles d'alizés : Ces houles, petites à modérées et de courtes périodes, résultent de vents établis de secteur Est, Sud-Est. Elles affectent principalement les côtes Nord, Est et Sud de l'île en épargnant en général la côte Ouest sous le vent. Leur hauteur est rarement supérieure à 2 m et leur période est comprise entre 6 et 10 secondes.
- Les houles cycloniques : Ce sont de grandes houles. Leur direction dépend du déplacement du cyclone tropical associé. Compte tenu des trajectoires climatologiques des cyclones aux alentours de La Réunion, ces houles concernent essentiellement les côtes Nord Est de l'île.
- Les houles australes : Ces houles de grandes longueur d'onde, modérées à fortes, se forment loin au Sud – Sud Ouest de La Réunion, aux latitudes moyennes (vers le sud de l'Afrique du Sud) en liaison avec la circulation des dépressions australes. Elles n'affectent généralement que les côtes Ouest et Sud de l'île.

Le régime de houle réunionnais est généralement bon. Les houles australes et d'alizés sont clairement les plus intéressantes car les plus fréquentes pour le développement des systèmes de conversion de l'énergie des vagues. Provenant principalement du Sud (Sud-Ouest à Sud-Est), les houles ne sont pas altérées sur le littoral Sud de l'île alors que les côtes Nord et Ouest de l'île sont généralement masquées. Les houles cycloniques et les fortes houles australes sont épisodiques et peuvent être considérées comme les houles extrêmes, auxquelles les systèmes devront résister.

La figure et le tableau, ci-dessous, (extrait de [7]) caractérisent les houles sur plusieurs points autour de La Réunion.

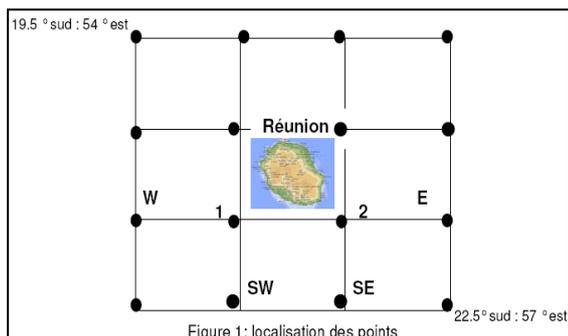


Figure 1: localisation des points

MOYENNES ANNUELLES DIRECTION (°)		
point	Est	148°
	Ouest	184°
	Sud Ouest	164°
	Sud Est	155°
MOYENNES ANNUELLES HAUTEUR (m)		
point	Est	2,09 m
	Ouest	1,73 m
	Sud Ouest	2,13 m
	Sud Est	2,13 m
MOYENNES ANNUELLES PÉRIODE (s)		
point	Est	9,86 s
	Ouest	10,52 s
	Sud Ouest	10,03 s
	Sud Est	10,02 s

Tableau 7: Moyennes annuelles des paramètres étudiés pour chacun des points

**Figure 39 : Caractéristiques des houles autour de La Réunion (Source [7])**

Les paramètres techniques dimensionnant pour l'implantation des équipements de récupération de l'énergie des vagues sont :

- Une bonne occurrence et puissance des vagues,
- Un fond marin stable,
- Une large surface exploitable,
- Pour les systèmes nearshore, un large platier avec une bathymétrie comprise entre 30 et 150 mètres de profondeur,
- Pour les systèmes on shore, des fonds marins remontant rapidement pour éviter la perte d'énergie des vagues dû aux frottements sur le fond marin.

L'identification de site dans ce SREMER s'est principalement basée sur les 3 derniers critères, à savoir la surface, la bathymétrie pour les systèmes near-shore et la longueur de côte pour les systèmes on-shore.

Sur la côte Nord de l'île, la ressource énergétique de la houle reste à déterminer. La côte Sud (du Sud-Ouest au Sud-Est) recevant directement les houles est la côte idéale pour l'implantation de systèmes houlomoteurs, comme le confirme les points analysés (représentés sur la figure précédente).

Dans les années à venir, le développement des technologies et de leurs solutions d'ancrages permettra d'implanter ces systèmes à des profondeurs plus importantes. De ce fait, l'espace maritime utilisable serait plus important (voire même considérable), permettant une production plus importante d'énergie.

Par ailleurs, les sites identifiés à La Réunion se distinguent selon les critères d'implantation bathymétriques pour les systèmes houlomoteurs :

- On-shore (sur la côte)
- Near-shore. (-20m à -50m)
- Offshore (-50m à -150m)

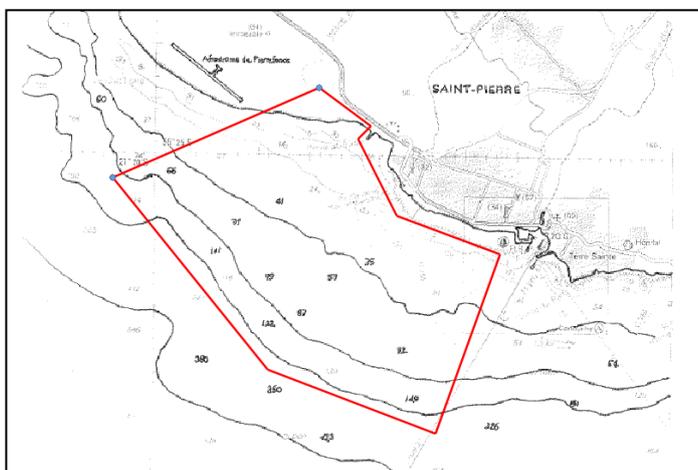
### **Platiers de Saint Pierre :**

Les études, menées par l'ARER ([6],2003) et la Région Réunion ([7],2005), ont mis en avant le site idéal pour l'implantation de systèmes houlomoteurs à La Réunion. Il se situe dans le Sud de La Réunion, au large de Saint Pierre.

Suite à la mise en avant du potentiel de ce site à plusieurs développeurs industriels, un consortium d'industriel s'est positionné pour lancer en 2009, une étude de faisabilité pour l'implantation de la technologie PELAMIS à Saint Pierre. Cette étude devrait durer environ 2 ans. Si les résultats s'avèrent positifs, les premières machines pourraient être installées en 2011-2012, pour l'implantation complète de la ferme en 2015.

Les collectivités locales subventionnent une partie de cette étude de faisabilité pour soutenir le projet mais aussi pour que toutes les données recueillies (houle, courants, environnementales, etc...), soient rendues publiques et soient ensuite utiles à l'installation d'autres systèmes houlomoteurs.

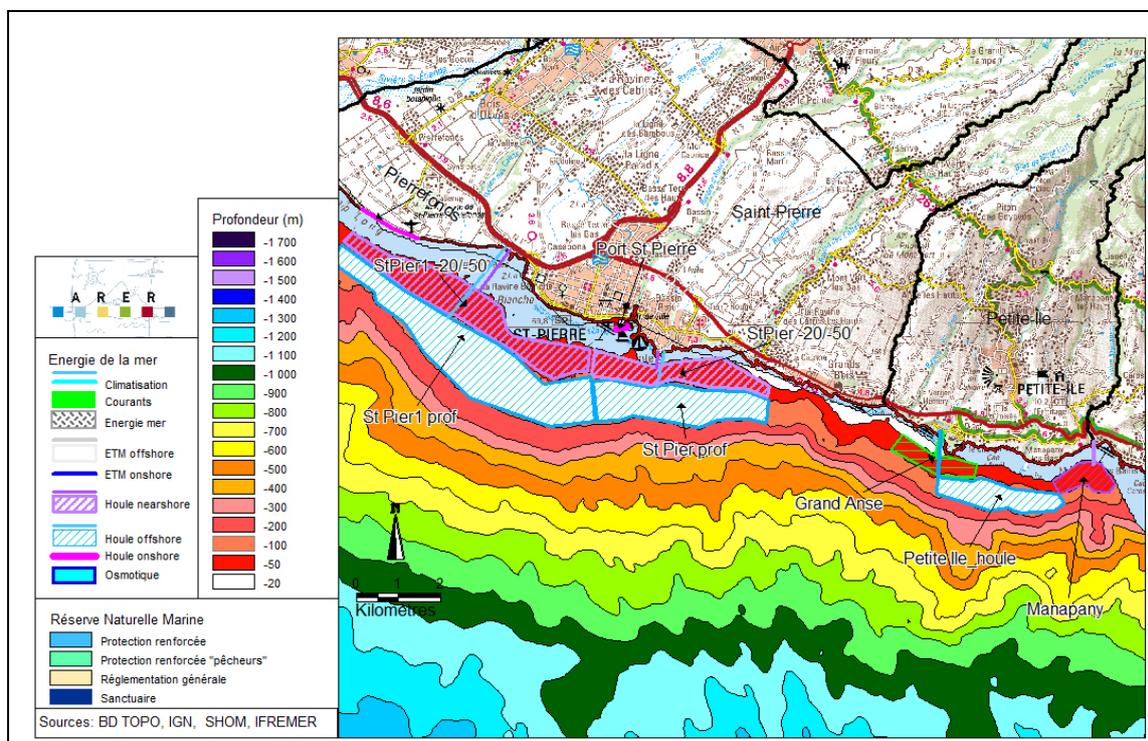
Cette zone d'étude d'une superficie de 18 km<sup>2</sup> est représentée en rouge sur la figure ci-contre. Seul 1 km<sup>2</sup> de cette zone serait occupé par les PELAMIS (au nombre de 40 en 2015 avec une installation complète de la ferme) pour la production d'électricité.



**Figure 40 : Zone de l'étude de faisabilité pour l'implantation de PELAMIS à Saint Pierre (Source : Projet SEAWATT)**

La figure suivante, représente l'intégralité du platier de Saint Pierre, idéal pour l'exploitation de l'énergie des vagues, en terme de ressource en houle, avec une superficie de 16 km<sup>2</sup> pour des profondeurs allant de 20 m à 150m. Situé en face de la ville de Saint Pierre et de son port, l'occupation de ce platier par des systèmes houlomoteurs devra prendre en compte la présence des pêcheurs de Saint Pierre afin d'éviter tous conflits d'usages et un partage équitable de l'espace. Ainsi seul 10 à 20% de la surface des zones représentées (sur la figure suivante) accueilleraient les technologies houlomotrices. Pour se faire, ce platier a été découpé en 4 polygones. Une délimitation selon les profondeurs -20 m à -50 m pour les technologies nearshore et -50m -150m pour celles offshore. L'autre facteur de délimitation est l'accès au port de Saint Pierre pour les pêcheurs. Les zones « StPie1 -20/-50 » et

« StPier1prof » seraient moins sujettes à des conflits d'usages et correspondent globalement à la zone de l'étude de faisabilité pour l'implantation de PELAMIS du projet SEAWATT. Les zones « StPier -20/-50 » et « St Pierprof », situées en face du port, devront prévoir un large chenal d'accès au port pour les pêcheurs. Le développement de systèmes houlomoteurs serait très vraisemblablement restreint sur ces zones.



Sur cette image, apparaissent aussi les sites potentiels pour l'installation de systèmes houlomoteurs on-shore. Le port de Saint Pierre et l'aéroport de Pierrefonds disposent d'un littoral fortement ou totalement artificiel, qui pourrait intégrer des systèmes du type LIMPET. La remontée des fonds marins étant lente, les vagues perdraient tout de même une partie importante de leurs énergies avant de déferler sur la côte. Une attention particulière devra être portée sur la ressource en houle.

#### **Platiers de l'Etang Salé et des Avirons :**

Dans le Sud de l'île, le site de l'Etang Salé/Avirons, situé en face de la Réserve Naturelle Marine (RNM) et en partie de la plage de l'Etang Salé, pourrait accueillir des systèmes houlomoteurs. Soumis aux houles du Sud/Sud-Ouest, la surface identifiée est de 3.8 km<sup>2</sup> (-50m à -100m) pour les systèmes offshore et de 1.4 km<sup>2</sup> pour les systèmes houlomoteurs near-shore (-20m/-50m). Les interactions avec les riverains, les pêcheurs, les surfeurs et la réserve naturelle marine devront être étudiées avec un éventuel atterrissage au niveau de la commune des Avirons (au-delà de la plage de l'Etang Salé).

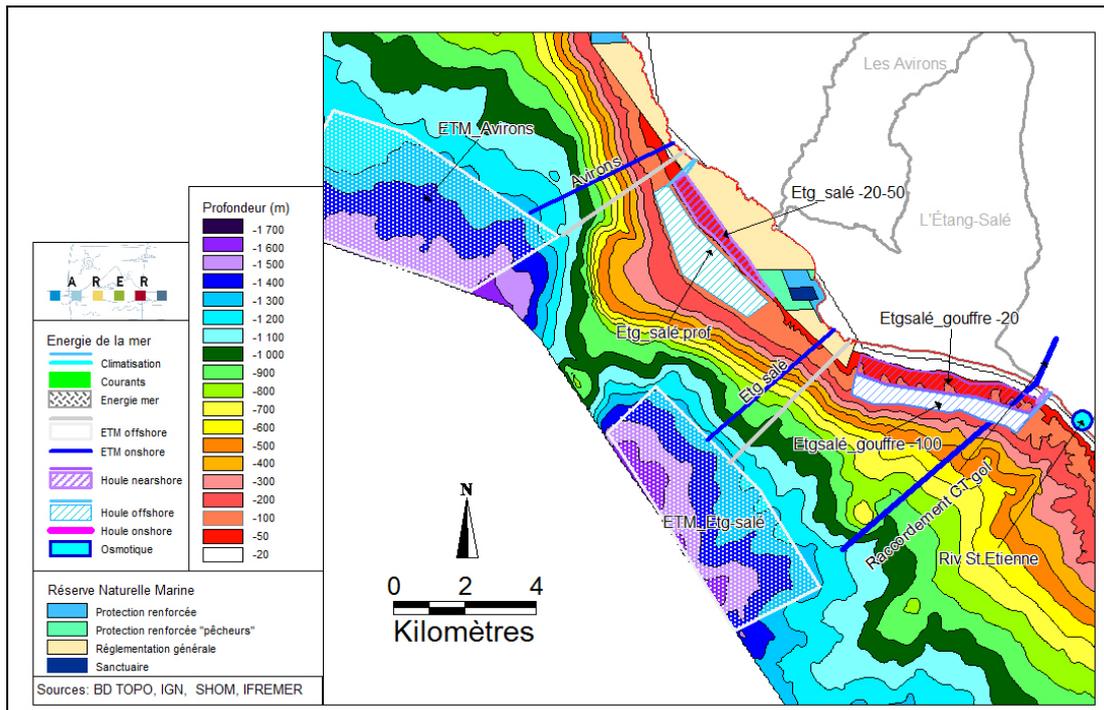


Figure 42 : Représentation des sites potentiels en énergie de la houle à l'Étang-Salé et des Avirons

### Houle on-shore dans le « Sud Sauvage » :

Dans le sud de l'île, d'autres sites présentent un fort potentiel pour l'implantation de systèmes houlomoteurs on-shore. Le littoral entre Saint Joseph et Saint Philippe est caractérisé par des fonds marins remontant rapidement. Soumis directement aux houles australes et d'alizés, les côtes (dessinées en rose sur la figure suivante) seraient idéales pour l'implantation de système à colonne d'eau oscillante de type Limpet ou Wavegen.

La longueur cumulée des côtes disponibles est de 3,5 km, ce qui correspondrait à une puissance théorique d'environ 35 MW (correspondant à environ 10 kW/m). Une utilisation de 5% de cette longueur de côte, c'est-à-dire 175 mètres, serait possible, pour développer une puissance de 1,75 MW. Une intégration paysagère devra être effectuée pour ne pas dénaturer le paysage du « Sud Sauvage » réunionnais et ne pas chevaucher les espaces remarquables du littoral, qui limiteront très fortement les zones d'implantation de ces systèmes. Le potentiel de ces sites semble très bon et pourrait être exploitable dès aujourd'hui car ce type de technologie fonctionne déjà en Ecosse.



Figure 43 : Représentation des sites potentiels en énergie de la houle on-shore entre Saint Joseph et Saint Philippe





Figure 44 : Photographie de la Marine à Saint Philippe, où sera aménager une cale de halage

La ville de Saint Philippe aménagera bientôt une cale de halage pour permettre aux pêcheurs locaux de prendre la mer. Une digue d'une quarantaine de mètres de longueur sera construite pour sécuriser la zone de mise à la mer des embarcations. Cette digue exposée aux houles du grand Sud serait un site idéal pour l'implantation de technologie de récupération de l'énergie de la houle on-shore du type LIMPET.

### Houle on-shore au port de Sainte Rose

La marina de Sainte Rose pourrait accueillir un système houlomoteur on-shore, du fait d'avoir une digue exposée aux houles du large. La connexion au réseau de ce petit système houlomoteur (d'une puissance potentiel de 250 kW) serait d'autant plus aisée que la centrale hydroélectrique se situe à une cinquantaine de mètres de ce port. Une étude a déjà été réalisée sur la mise en place d'un tel système sur ce port.



Figure 45 : Représentation du site potentiel en énergie de la houle on-shore du port de Sainte Rose

### Platiers de Saint Benoît :

Dans l'Est de l'île, plusieurs platiers sous marin ont été localisés en face de Saint Benoît pour l'implantation de systèmes houlomoteurs near-shore et offshore. La ressource en houle reste à définir sur ces sites mais leurs potentiels pour la production d'énergie ne semblent pas négligeables avec une surface totale de 5,5 km<sup>2</sup>. D'autant plus que les conflits d'usages sont beaucoup moins importants sur

la côte Est en termes d'occupation du domaine public maritime et de mise en œuvre des atterrages des câbles électriques ou autres servitudes.

Sur la carte ci-dessous, on voit aussi apparaître un site potentiel en énergie de la houle on-shore (en rose) à Bras-Panon.

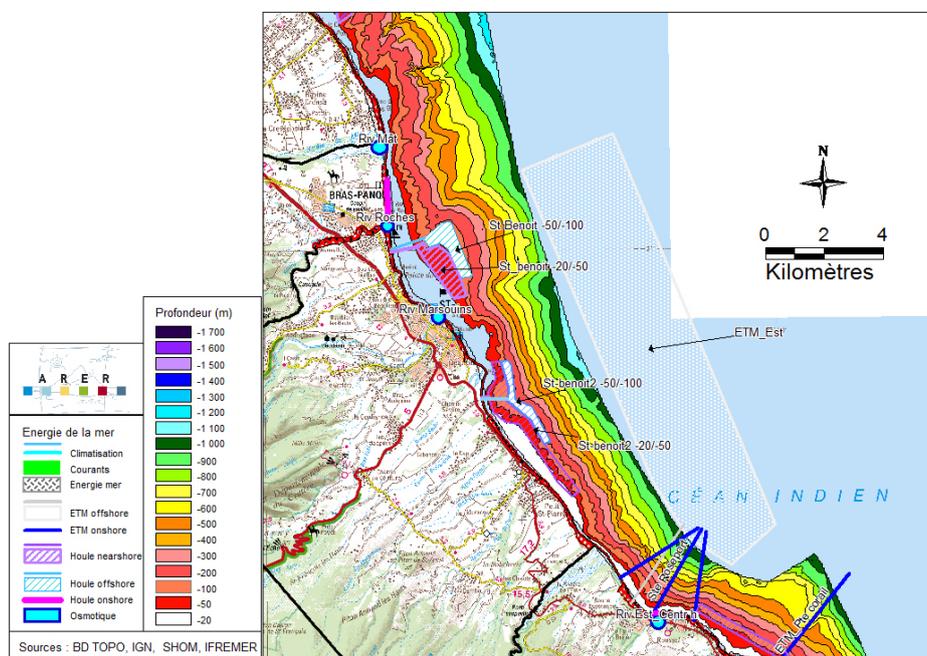


Figure 46 : Représentation des sites potentiels en énergie de la houle à Saint Benoit

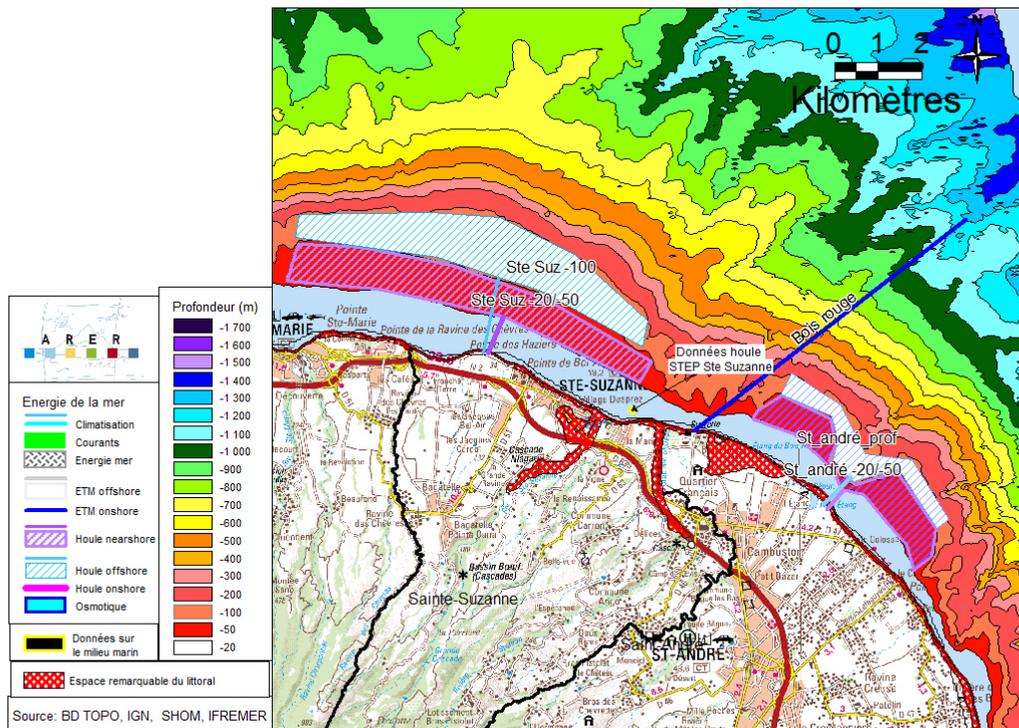
#### Platiers de Sainte Suzanne et de Saint André :

Dans le Nord de l'île, un platier s'étendant de Sainte Suzanne à Saint André pourrait convenir à l'implantation de systèmes houlomoteurs. Dans le Nord de l'île, peu d'informations existent sur la ressource en houle bien que souvent des conditions de « grosse mer » sont rencontrées par les pêcheurs dans le Nord et l'Est de l'île. Une connaissance plus précise du milieu marin dans cette zone serait utile pour définir la rentabilité des systèmes houlomoteurs. L'étude d'implantation de la station d'épuration de Sainte Suzanne a réalisé une campagne de mesure de la houle et des courants (Juillet 2008 à Juillet 2009) en face de la pointe de Sainte Suzanne. L'intercommunalité des collectivités du Nord (CINOR) est propriétaire de ces données, une première analyse de ces données pourrait donner une idée du potentiel de production de systèmes houlomoteurs implantés dans cette zone.

L'ensemble de ces 4 platiers au large de Sainte Suzanne et Saint André représentent une surface totale d'environ 20 km<sup>2</sup>, plus importante que la surface disponible sur le platier de Saint Pierre. L'atterrage dans cette zone serait aussi beaucoup plus simple car très peu d'activités littorales existent et le cordon littoral est de type sédimentaire avec un cordon de galets remaniés par la mer.



Figure 47 : Photo du littoral au niveau du phare de Sainte Suzanne où des mesures de houle ont été effectuées pour la mise en place de la station d'épuration



**Figure 48 : Représentation des sites potentiels en énergie de la houle au Nord de l'île Sainte Suzanne/Saint André**

#### **Platiers et houle on shore de la route du littoral :**

Dans le Nord-Ouest de l'île, une partie de la future route du littoral sera probablement construite sur la mer. L'intégration à ce grand projet de systèmes houlomoteurs on-shore pourrait améliorer la résistance de cet édifice aux effets de la houle. Selon les données de houle récoltées par un houlographe (non directionnel) de la DDE (Direction Départementale de l'Équipement), la ressource en houle dans cette zone ne semble pas la meilleure pour permettre la rentabilité d'un projet houlomoteur on-shore, uniquement utilisé pour la production d'électricité. La digue de la Route du Littoral actuelle est aujourd'hui totalement artificielle et est protégée sur ses 15 km par des tétrapodes (blocs de bétons). La rentabilité d'un projet houlomoteur on-shore pourrait être facilitée en utilisant la double fonctionnalité du système houlomoteur on-shore permettant:

- L'amélioration de la résistance à la houle de la future digue de la Route du Littoral
- La production d'électricité.

Sur la Route du Littoral, longue d'une quinzaine de kilomètres, les systèmes houlomoteurs on-shore pourrait représenter une puissance installée théorique de 15 MWc (10 kW/m de côte). Une attention particulière devra être portée au projet de la Route du Littoral afin d'y intégrer la mise en place de ces systèmes houlomoteurs on-shore, bénéfiques à la tenue de cette route et à la production d'énergie propre.

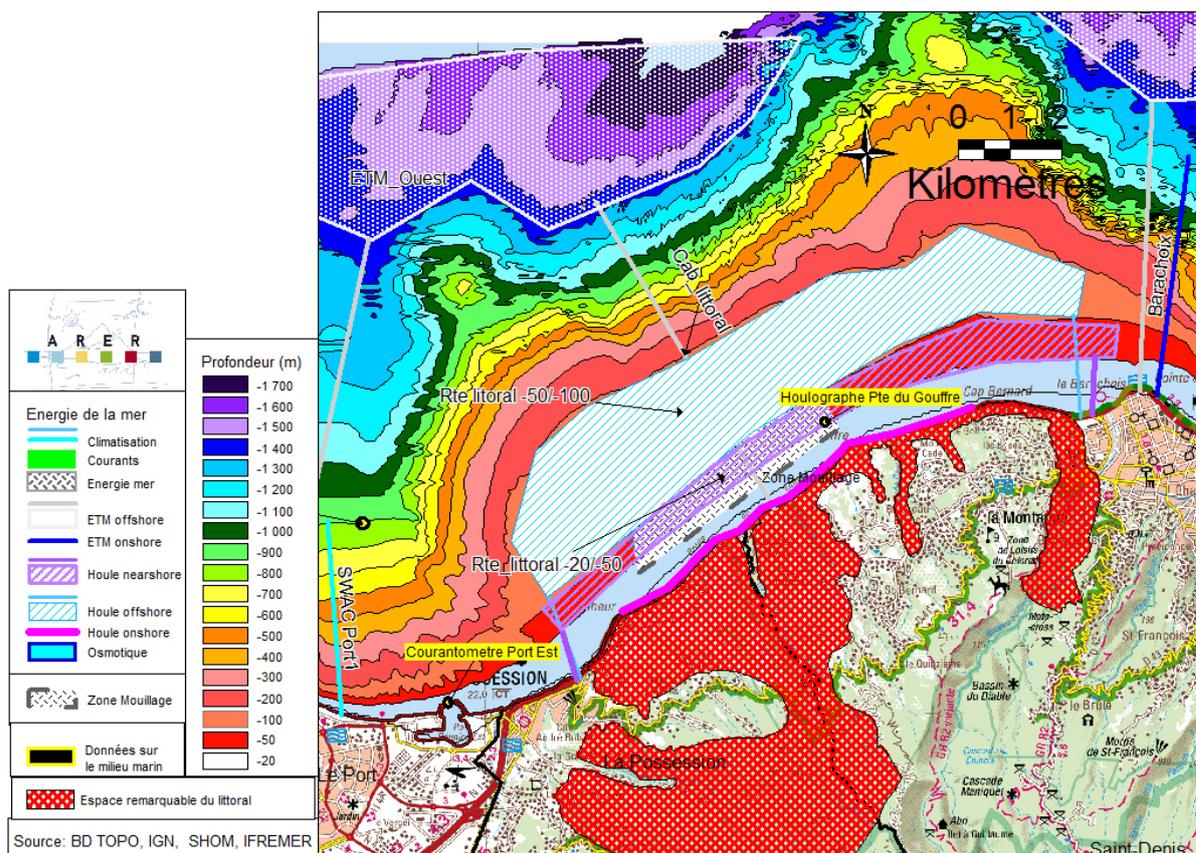


Figure 49 : Représentation des sites potentiels en houle au large et sur la route du littoral

En face de la Route du Littoral se trouve aussi un large platier, où pourrait s'implanter les technologies de houle near-shore et offshore. Des mesures de houle et de courantologie seront certainement effectuées pour la mise en place de la nouvelle route du littoral. Il serait intéressant d'analyser ces mesures afin de définir la viabilité d'un projet houlomoteur near shore et offshore.

Les tableaux suivants présentent les caractéristiques de l'ensemble des sites de houle on-shore, near-shore et offshore cartographiés précédemment.

Energie	Identifiant	Caractéristiques	Activités	Morphologie de la cote	Evolution du littoral	Longueur de la cote (km)	Puissance Potentielle (MW)	Perspective développement	Commune
Houle onshore	Rte Littoral	ressource houle à définir, intégration projet route sur mer	Production électricité, protection digue/route sur mer, aménagement du territoire	artificialisation intégrale	Stabilité	8.08	2	Moyen terme (construction route)	La Possession
Houle onshore	Port St Pierre	Intégration digue Port St Pierre, site repéré par études ARER/BCEOM	Production électricité, aménagement du territoire	artificialisation intégrale	Stabilité	0.26	0,4	Moyen terme	Saint-Pierre
Houle onshore	Port Ste Rose	Intégration digue Port Sainte Rose, site repéré par études ARER/BCEOM	Production électricité, aménagement du territoire			0.20	0,2	Moyen terme	Sainte-Rose
Houle onshore	Littoral St Joseph	Ressource houle et site à définir avec intégration zone litt	Production électricité	côte rocheuse basse	Erosion modérée	2.24	1	Moyen/long terme	Saint-Joseph
Houle onshore	Littoral Bras P	Ressource houle et site à définir	Production électricité	cordon de galets remanié par la mer	Transition	1.37	0,5	Moyen/long terme	Bras-Panon
Houle onshore	Pierrefonds	Site potentiel	Production électricité, aménagement du territoire et aéroport	micro-falaise meuble ou mixte	Erosion prononcée	1.52	0,4	Moyen/long terme	Saint-Pierre
Houle onshore	Quai Henri dall	Site repéré par étude régional BCEOM 2005	Production électricité, aménagement du territoire	côte rocheuse basse	Erosion modérée	0.58	0,3	Moyen/long terme	Saint-Philippe
Houle onshore	Littoral St Philippe	Ressource houle et site à définir avec intégration zone litt	Production électricité	falaise cohérente	Erosion modérée	3.05	1,5	Moyen/long terme	Saint-Philippe

Tableau 4 : Caractéristiques des sites potentiels en houle on-shore à La Réunion



Energie	Identifiant	Caractéristiques	Activités	Morphologie de la cote	Evolution du littoral	Surface (km²)	Longueur cable électrique marin (km)	Profondeur Moyenne (m)	Profondeur minimum (m)	Profondeur maximum (m)	Puissance Potentielle (MW)	Perspective développement	Commune
Houle nearshore	Ste Suz -20/-50	Bathymétrie ok , ressource houle à définir	Production électricité, eau	falaise cohérente	Stabilité	6.8	0.89	-32	-21	-49	10	Moyen terme	Sainte-Suzanne
Houle nearshore	StPier1 -20/-50	Bathymétrie ok; conflits usagers mer à définir	Production électricité	falaise meuble ou mixte	Erosion prononcée	4.0	1.22	-36	-21	-52	10	Court/moyen terme	Saint-Pierre
Houle nearshore	Etg_salé -20-50	Bathymétrie ok ; ressource houle, occupation Res Nat à définir	Production électricité, eau			1.4	0.49	-41	-21	-49	5	Court/moyen terme	Saint-Leu
Houle nearshore	StPier -20/-50	Bathymétrie ok; conflits usagers mer à définir	Production électricité	falaise cohérente	Erosion modérée	2.1	0.40	-38	-21	-50	5	Court/moyen terme	Saint-Pierre
Houle nearshore	St_andré -20/-50	Bathymétrie ok, ressource houle à définir	Production d'énergie	cordon de galets remanié par la mer	Transition	3.3	0.56	-30	-21	-67	5	Moyen/long terme	Saint-André
Houle nearshore	Rte_littoral -20/-50	Bathymétrie Ok, conflits d'usagers à définir trafic et abri pr navire	Production d'électricité, eau	cordon de galets remanié par la mer	Transition	7.5	1.14	-33	-21	-51	5	Moyen/long terme	Saint-Denis
Houle nearshore	St_benoit -20/-50	Bathy ok, ressource houle à définir	Production d'électricité et d'eau	cordon de galets remanié par la mer	Transition	1.3	0.91	-30	-21	-54	5	Moyen/long terme	Saint-Benoît
Houle nearshore	Manapany	Production d'électricité, utilisation houle ou courant	Production électricité, pompage eau	cordon de galets remanié par la mer	Transition	0.7	0.54	-34	-21	-48	3	Moyen terme	Saint-Joseph
Houle nearshore	Pit-SteRose houle	Exposition aux houles du Sud	Production électricité, dessalement, pompage eau	côte rocheuse basse	Erosion modérée	2.9	0.57	-56	-21	-100	5	Moyen/long terme	Sainte-Rose
Houle nearshore	St-benoit2 -20/-50		Production électricité, dessalement, pompage eau	micro-falaise meuble ou mixte	Erosion modérée	2.2	0.28	-44	-21	-91	5	Moyen/long terme	Saint-Benoît
Houle nearshore	Etgسالé_gouffre -20	xposition aux houles du sud, identique platier st Pierre	Production électricité, dessalement, pompage eau	cordon de galets remanié par la mer	Erosion prononcée	2.4	0.46	-41	-21	-81	8	Moyen terme	Saint-Louis

**Tableau 5 : Caractéristiques des sites potentiels en houle near-shore (-20 à -50m)**



Energie	Identifiant	Caractéristiques	Activités	Morphologie de la cote	Evolution du littoral	Surface (km²)	Longueur cable électrique ss marin ou pipeline (km)	Profondeur Moyenne (m)	Profondeur minimum (m)	Profondeur maximum (m)	Puissance Potentielle (MW)	Perspective développement	Commune
Houle offshore	Ste Suz -100	Bathymétrie ok , ressource houle à définir	Production électricité	falaise cohérente	Stabilité	7.9	1.79	-72	-21	-103	20	Moyen/long terme	Sainte-Suzanne
Houle offshore	Etg_salé prof	Bathymétrie ok ; ressource houle, occupation Res Nat à définir	Production électricité	falaise cohérente	Erosion modérée	3.8	1.07	-70	-21	-96	10	Moyen terme	Saint-Leu
Houle offshore	St Pier1 prof	Etude de faisabilité PELAMIS, projet SEAWATT	Production électricité	plage de sable basaltique	Erosion prononcée	6.7	2.18	-70	-21	-100	20	Court/moyen terme	Saint-Pierre
Houle offshore	St Pier prof	Bathymétrie ok; conflits usagers mer à définir	Production électricité	falaise cohérente	Erosion modérée	3.3	0.88	-61	-21	-98	10	Court/moyen terme	Saint-Pierre
Houle offshore	St_andré_prof	Ancrage difficile, bathymétrie ok, ressource houle à définir,	Production d'énergie	cordon de galets remanié par la mer	Transition	2.3	0.92	-77	-21	-149	8	Moyen/long terme	Saint-André
Houle offshore	Rte litoral -50/-100	Bathymétrie ok , ressource houle à définir	Production d'énergie	cordon de galets remanié par la mer	Transition	22.9	2.04	-75	-21	-100	10	Long terme	Saint-Denis
Houle offshore	St Benoit -50/-100	Bathymétrie ok , ressource houle à définir	Production électricité	cordon de galets remanié par la mer	Transition	1.1	1.20	-74	-21	-107	8	Moyen/long terme	Saint-Benoît
Houle offshore	Petite Ile_houle		Production d'énergie, pompage d'eau	plage corallienne relativement évoluée d	Stabilité	1.5	1.15	-67	-21	-98	5	Moyen terme	Petite-Ile
Houle offshore	St-benoit2 -50/-100		Production électricité, dessalement, pompage eau	micro-falaise meuble ou mixte	Erosion modérée	0.8	0.89	-85	-21	-127	5	Moyen/long terme	Saint-Benoît
Houle offshore	Etgسالé_gouffre -100	Exposition aux houles du sud, identique platier st Pierre	Production électricité, dessalement, pompage eau	cordon de galets remanié par la mer	Erosion prononcée	2.5	0.90	-77	-21	-138	10	Moyen terme	Saint-Louis

Tableau 6 : Caractéristiques des sites potentiels en houle off-shore (-50 à -150m de profondeur)



### c) La climatisation par eau froide sous marine, SWAC en anglais

(SWAC, Sea Water Air Conditioning)

La mise en place d'un système de climatisation par eau froide sous marine requière :

- Un accès facile et rapide à la ressource en eau froide (d'environ 8°C)
- Une demande à terre importante en climatisation

Pour avoir de l'eau à cette température, il faut la pomper à environ 900 mètres de profondeur. Une cartographie a donc été réalisée sur les sites potentiels à La Réunion, où il serait possible de développer cette technologie.

Il est à noter qu'il est possible de développer sur chaque site d'ETM on-shore de la climatisation par eau froide sous marine, si un besoin en climatisation existe non loin de la zone d'atterrage.

Dans une certaine mesure, ceci est réciproque, car il serait possible de développer une petite centrale ETM on-shore sur les sites identifiés pour le SWAC, sous réserve d'avoir un espace foncier suffisant car ces sites ont été identifiés en milieu urbain et de toujours avoir un accès facile et rapide jusqu'à 1200 mètres de profondeur.

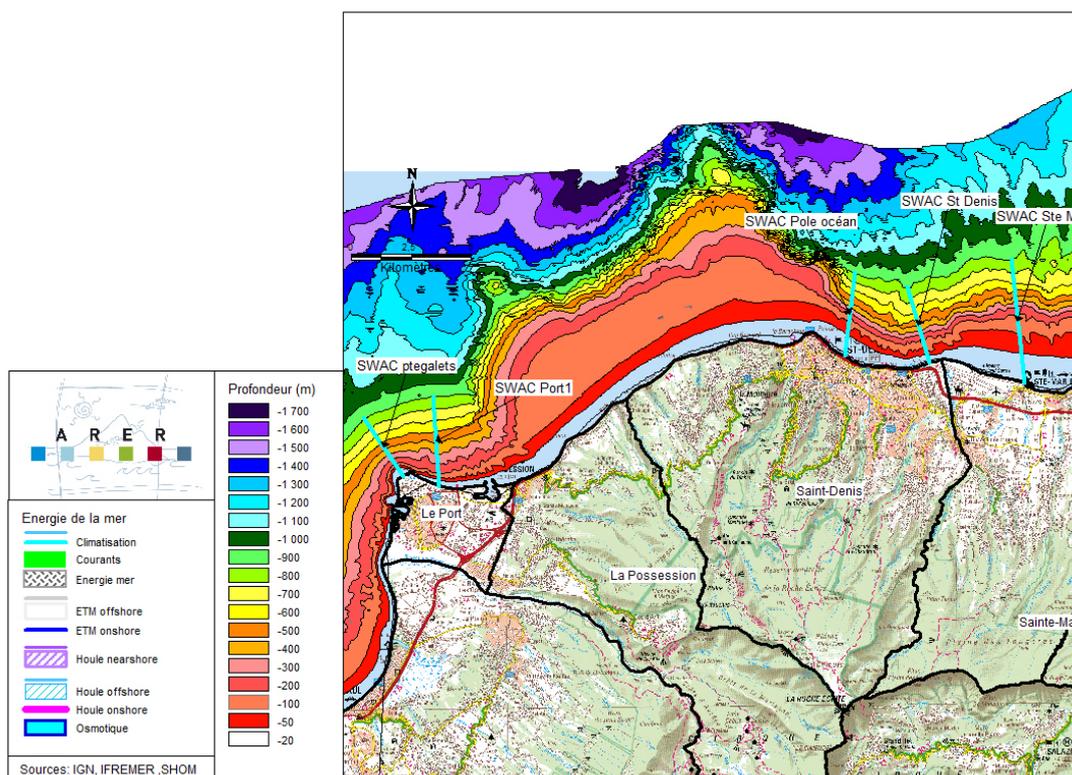
Il est aussi possible de développer une activité de production d'eau potable avec l'activité de climatisation par eau froide sous marine. En effet, pour produire de l'eau potable, il faut avoir un écart de température de 12°C seulement entre la source d'eau froide et d'eau chaude (eau chaude qu'il faudra pomper). Si l'eau de la climatisation est pompée à 8°C, il faudrait pomper de l'eau à la surface à une température minimale de 20°C, or la température moyenne à la Réunion de l'eau de surface est d'environ 25,5°C. Ces activités seraient véritablement complémentaires car le besoin en eau potable est souvent lié au besoin en climatisation (des zones chaudes et arides) comme la côte Ouest Réunionnaise. De surcroît, il est possible de coupler ces activités à l'irrigation par condensation de l'humidité ambiante sur les canalisations d'eau froide (équivalent à un système de goutte à goutte). La note d'opportunités sur la valorisation de l'eau froide profonde au Port explique clairement le fonctionnement de ces activités (cf. [9]).

Le tableau et la figure suivants répertorient et représentent les sites potentiels pour la mise en place de la climatisation par eau froide sous marine :

Energie	Identifiant	Caractéristiques	Activités	Morphologie de la cote	Evolution du littoral	Longueur pipeline (km)	Puissance Potentielle (MW)	Perspective développement	Commune
Climatisation	SWAC St Denis	Climatisation St Denis/aéroport/Ste Marie/ste Clot	Climatisation aéroport, des ZI, Ste Clotilde, irrigation, production d'eau	cordon de galets d'estuaire ou de cône-d	Engraissement	3.34	20 MWf	Court terme	Saint-Denis
Climatisation	SWAC Pole océan	Climatisation Urbaine Saint Denis	Climatisation centre ville saint denis, irrigation, production d'eau	artificialisation intégrale	Stabilité	3.52	10 MWf	Court terme	Saint-Denis
Climatisation	SWAC Port1	Site repéré Etude ARER 2008	Climatisation des ZI du Port, aquaculture, irrigation, production d'eau	cordon de galets remanié par la mer	Erosion prononcée	3.83	5 MWf	Court/moyen terme	Le Port
Climatisation	SWAC ptegalets	Site repéré Etude ARER 2008	Climatisation ville du Port et ZI, aquaculture, irrigation, production d'eau	artificialisation intégrale	Stabilité	2.99	8 MWf	Court/moyen terme	Le Port
Climatisation	SWAC Ste Marie	Bathymétrie moyenne, accès 900m long	Climatisation bureaux Ste Marie, aéroport	artificialisation intégrale	Stabilité	5.25	5 MWf	Court terme	Sainte-Marie

**Tableau 7 : Caractéristiques des sites potentiels pour la climatisation par eau froide sous marine (SWAC) à La Réunion**





**Figure 50 : Représentation des sites potentiels pour la climatisation par eau froide sous marine à La Réunion**

#### d) Energie Thermique des Mers

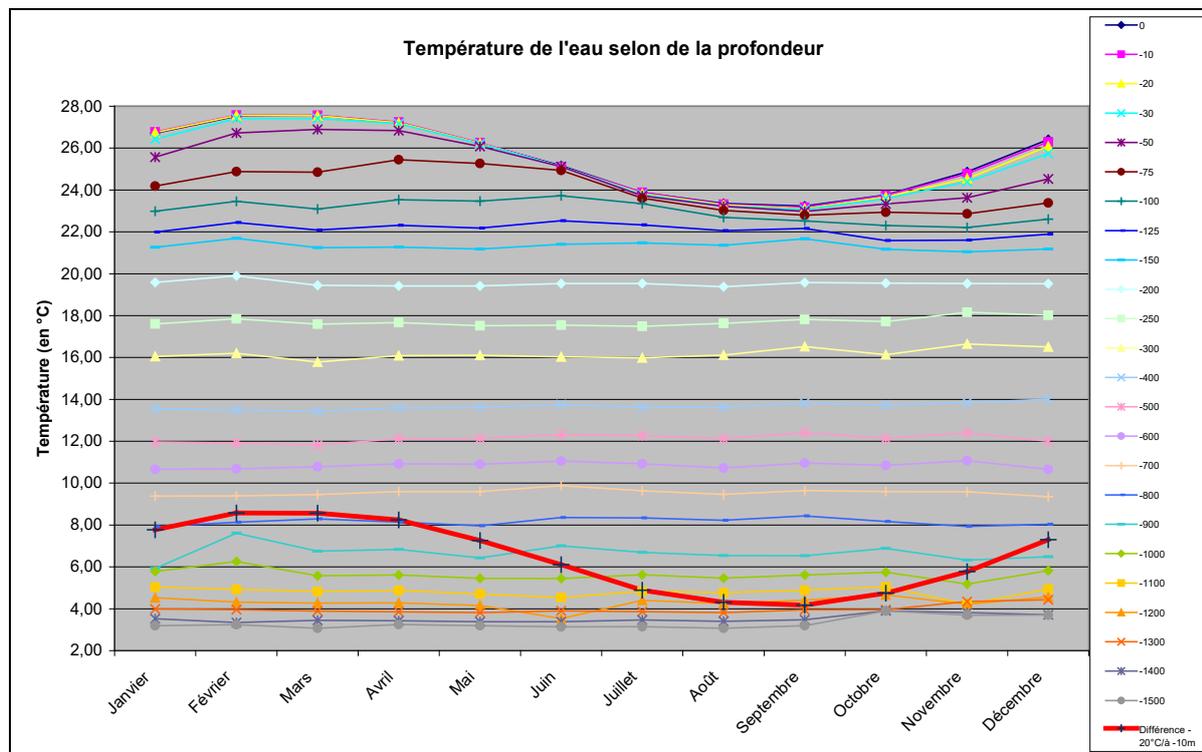
Les paramètres techniques à respecter pour l'implantation des équipements de récupération de l'Energie Thermique des Mers sont :

- Un écart de température entre l'eau de surface et l'eau des profondeurs d'environ 20°C
- Un accès rapide à la ressource en eau froide profonde (tombants rapides en on shore)
- Un fond marin facilitant les ancrages (en on shore pour l'ancrage de la canalisation d'eau froide et en off shore pour l'ancrage d'une plate forme flottante)
- Une faible exposition à la houle et aux courants marins

A La Réunion, la température moyenne annuelle de l'eau à la surface est d'environ 25,7°C (cf.[8]). Les températures à la surface varient typiquement entre 28°C lors de la saison chaude et 23°C en hiver austral. Le bon fonctionnement d'une centrale ETM, qu'elle soit en on-shore ou offshore, requière une différence de température minimale de 20°C. L'écart de température idéal serait de 21°C pour compenser les effets de réchauffement de l'eau froide lors du pompage vers la surface et de pompage de l'eau de surface aux alentours des 10 à 20 mètres de profondeur. Pour un écart de 21°C, la température de la source d'eau froide se doit d'être en moyenne de 4,7°C. Lors des mois d'hiver austral, on pourrait tolérer un écart de température de 19°C, la température de la source froide devrait alors être de 4°C.

En Avril 2008, des prélèvements d'Eau Froide Profonde (EFP) ont été réalisés au Port pour l'étude sur « le développement de l'ETM et la valorisation de l'EFP sur le territoire de la ville du Port » (cf.[9]). La température mesurée à 1000 m de profondeur était de 5,1°C. Grâce à une autre étude menée en 2009 sur l'ETM et la valorisation de l'EFP à Sainte Rose, le meilleur site réunionnais pour atteindre rapidement les grandes profondeurs, il a pu être défini que le pompage de l'eau devait se faire à environ 1150 mètres de profondeur.

La base de données internationale mondiale sur l'océanographie opérationnelle (des organismes : NOAA, NODC, CORIOLIS) permet d'obtenir plusieurs profils de température au large de La Réunion. Une extraction de ces données permet de conclure que la profondeur idéale, pour pomper de l'eau à environ 4,7°C, est de 1200 m.



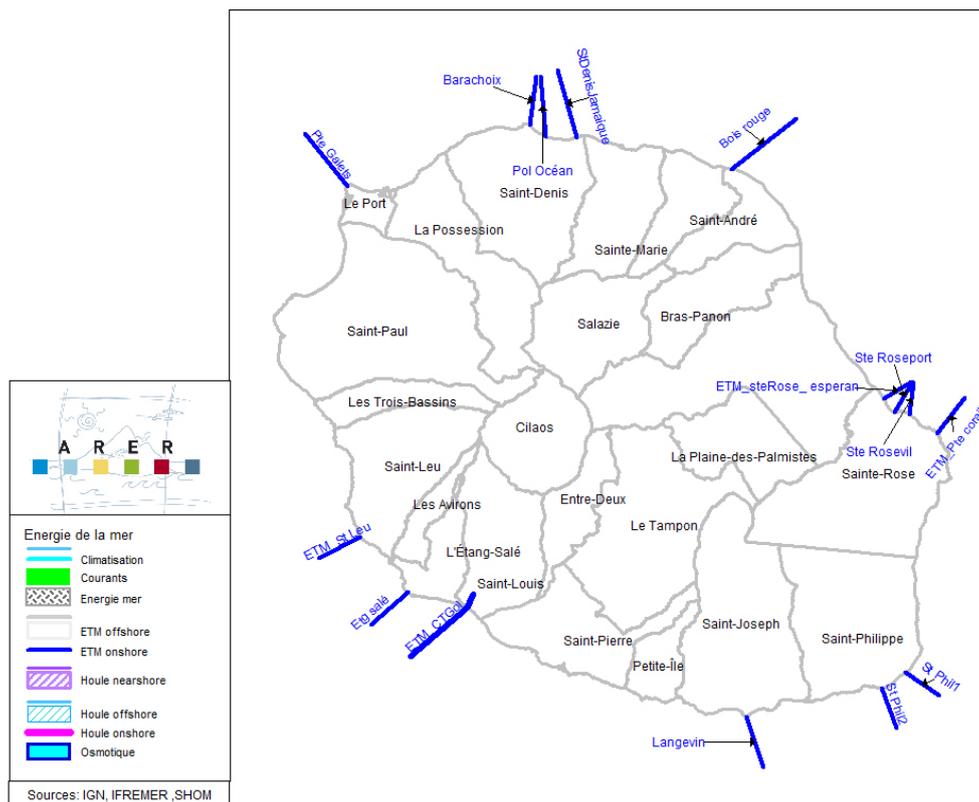
**Figure 51 : Extraction et représentation des profils de température du programme NOAA/NODC/Coriolis**

Le graphe précédent est une extraction des températures annuelle selon les différentes profondeurs de flotteurs ARGO, qui sont passés non loin des côtes réunionnaises. La courbe rouge représente une différence de 20°C avec la température de l'eau de surface.

### **Sites potentiels pour l'ETM on-shore :**

Pour l'implantation de centrales ETM on shore, plusieurs sites ont été repérés à La Réunion comme disposant de tombants rapides vers les profondeurs de -1200 à 1300 m, à savoir les sites suivants, répertoriées dans le tableau suivant et représentés sur la Figure 52 :





**Figure 52 : Représentation des sites potentiels pour l'implantation de centrales ETM on shore**

Il est à noter que les sites de Bois Rouge et du Gol (ETM\_CTgol) permettraient le couplage d'une centrale ETM avec des centrales thermiques. Ces centrales thermiques au charbon-bagasse fonctionnent plus de 8000 h dans l'année et sont situées en bord de mer à moins de 100 mètres pour l'usine de Bois Rouge et à 500-600 mètres du rivage pour l'usine du Gol. Ces usines refroidissent leurs chaudières grâce à des tours aéroréfrigérantes, où l'eau arrive en entrée à environ 35°C avec un débit supérieur à 10 000 m<sup>3</sup>/h (soit plus de 3 m<sup>3</sup>/s) et ressort de la tour à environ 27°C. Utiliser l'eau chaude de ces usines pour une petite centrale ETM augmenterait nettement la production d'électricité de la centrale ETM lorsque l'on sait qu'une centrale ETM produit 12% d'énergie en plus pour un 1°C supplémentaire de l'écart de température. Le gain sur le gradient thermique serait au minimum d'environ 3 à 4 °C pour une centrale ETM on-shore de 1 à 2 MW, ce qui ferait un gain de 30 à 40% de production électrique.

Energie	Identifiant	Caractéristiques	Activités	Morphologie de la cote	Evolution du littoral	Longueur pipeline (km)	Puissance Potentielle (MW)	Perspective développement	Commune
ETM onshore	Pte Galets	Bathy moyenne	Production: eau, électricité, microalgues, aquaculture, climatisation, irrigation	artificialisation intégrale	Stabilité	6.60	2	Court/moyen terme	Le Port
ETM onshore	ETM St Leu	Bathy Ok	Production: eau, électricité, microalgues, aquaculture, irrigation	falaise cohérente	Erosion modérée	4.47	2	Long terme	Saint-Leu
ETM onshore	Etg salé	Bathy Ok	Production: eau, électricité, microalgues, aquaculture, irrigation	côte rocheuse basse	Stabilité	4.75	2	Moyen/long terme	L'Étang-Salé
ETM onshore	Ste Roseport	Bathy idéal	Production: électricité, microalgues, aquaculture	falaise cohérente	Stabilité	3.45	2	Court/moyen terme	Sainte-Rose
ETM onshore	Ste Rosevil	Bathy Ok	Production: électricité, microalgues, aquaculture	falaise cohérente	Erosion modérée	3.07	2	Court/moyen terme	Sainte-Rose
ETM onshore	Pol Océan	Bathy Ok	Production: eau, électricité, climatisation urbaine, irrigation	cordon de galets d'estuaire ou de cône-d	Erosion prononcée	5.89	2	Moyen terme	Saint-Denis
ETM onshore	Barachoix	Bathy Ok	Production: eau, électricité, climatisation urbaine, irrigation	cordon de galets remanié par la mer	Erosion prononcée	4.76	0	Long terme	Saint-Denis
ETM onshore	Bois rouge	Bathy peu favorable/Couplage centrale thermique	Production: eau, microalgues, aquaculture, électricité avec couplage centrale thermique,	micro-falaise meuble ou mixte	Transition	7.89	3	Moyen terme	Saint-André
ETM onshore	St Phil2	Bathy Ok	Production: électricité, microalgues, aquaculture	côte rocheuse basse	Erosion modérée	4.15	3	Long terme	Saint-Philippe
ETM onshore	St Phil1	Bathy Ok	Production: électricité, microalgues, aquaculture	falaise cohérente	Erosion modérée	3.97	3	Long terme	Saint-Philippe
ETM onshore	Langevin	Bathy Ok	Production: électricité, microalgues, aquaculture	falaise cohérente	Erosion modérée	5.22	1	Long terme	Saint-Joseph
ETM onshore	StDenisJamaïque	Bathy ok, espace atterrissage disponible	Production électricité, eau, aquaculture, climatisation urbaine, irrigation	cordon de galets remanié par la mer	Transition	6.78	1	Court/moyen terme	Saint-Denis
ETM onshore	ETM_Pte corail	Site démo aquaculture, cultures d'algues	Production électricité, aquaculture, culture d'algues	falaise cohérente	Erosion modérée	4.37	3	Court/moyen terme	Sainte-Rose
ETM onshore	Raccordement CT gol	Raccord pipeline ETM_CT GOL	Production eau et d'électricité avec couplage centrale thermique, aquaculture, culture d'algues, irrigation, climatisation		0	1.42	3	Moyen/long terme	L'Étang-Salé
ETM onshore	ETM_CTGol	Couplage Gol loin, gain température moyen, Bathy moyenne	Production eau et d'électricité avec couplage centrale thermique, aquaculture, culture d'algues, irrigation, climatisation	cordon de galets remanié par la mer	Erosion prononcée	7.15	3	Moyen/long terme	L'Étang-Salé
ETM onshore	ETM_steRose_esperan	Falaise d'une dizaine de metres en bord de cote	Production électricité, cultures d'algues, aquaculture	cordon de galets remanié par la mer	Transition	3.18	3	Court terme	Sainte-Rose

**Tableau 8 : Caractéristiques des sites potentiels pour l'implantation de l'ETM on-shore**

### **Sites potentiels pour l'ETM offshore :**

Le principe de l'ETM offshore consiste à positionner la centrale offshore à l'aplomb de la ressource en eau froide. Flottante en pleine mer, cette centrale ETM pompe l'eau grâce à une Canalisation d'Eau Froide (CEF) verticale, limitant ainsi les pertes de charges et augmentant le rendement du procédé. La production d'énergie se fait au niveau de la centrale et l'électricité est ramenée à terre grâce à un câble électrique sous-marin. Du fait de leurs dispositions en pleine mer, ces centrales pourraient atteindre 10 voire 25 MW de puissance, l'atterrissage du câble et le point d'injection sur le réseau électrique local seront des points non négligeables, sur lesquels une concertation avec le distributeur d'électricité local devra avoir lieu.

Une cartographie (cf. figure suivante) a donc été réalisée sur les fonds de -1300 m à -1600 m les plus proches de la côte réunionnaise. Les sites potentiels pour de l'ETM offshore sont présentés dans le tableau suivant.

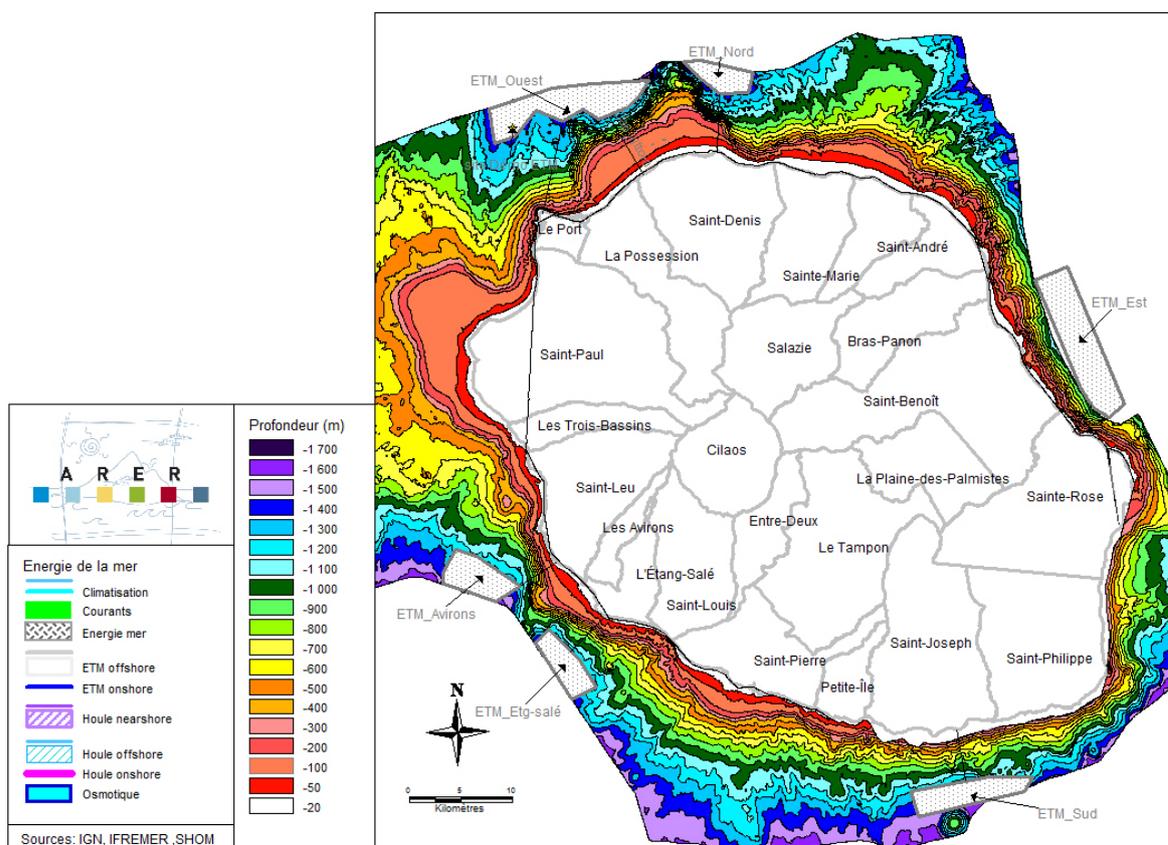


Energie	Identifiant	Caractéristiques	Activités	Morphologie de la cote	Evolution du littoral	Surface (km²)	Longueur cable électrique marin (km)	Profondeur Moyenne (m)	Profondeur minimum (m)	Profondeur maximum (m)	Puissance Potentielle (MW)	Perspective développement	Commune
ETM offshore	ETM_Nord	Bathy ok; Raccordement réseau à étudier	Production d'électricité, upweeling artificiel	artificialisation intégrale	Stabilité	13.3	5.68	-1471	-21	-1658	20	Moyen terme	Saint-Denis
ETM offshore	ETM_Sud	Bathy ok; Raccordement réseau à étudier	Production d'électricité, upweeling artificiel	falaise cohérente	Erosion modérée	24.7	5.11	-1352	-21	-1609	20	Moyen/long terme	Saint-Joseph
ETM offshore	ETM_Est	Bathy ok; Raccordement réseau à étudier	Production d'électricité, upweeling artificiel	cordon de galets remanié par la mer	Transition	47.7	3.26	-1212	-21	-1461	30	Moyen terme	Sainte-Rose
ETM offshore	ETM_Avirons	Bathy ok; Raccordement réseau à étudier	Production d'électricité, upweeling artificiel	falaise cohérente	Erosion modérée	20.9	4.16	-1318	-21	-1509	10	Moyen/long terme	Saint-Leu
ETM offshore	ETM_Etg-salé	Bathy ok; Raccordement réseau à étudier	Production d'électricité, upweeling artificiel	côte rocheuse basse	Stabilité	17.2	4.76	-1352	-21	-1581	10	Moyen/long terme	L'Étang-Salé
ETM offshore	Cab_littoral	Bathy ok; Raccordement réseau à étudier	Production d'électricité, upweeling artificiel	artificialisation intégrale	Stabilité	0.0	6.95	0	0	0	10	Moyen/long terme	Saint-Denis
ETM offshore	ETM_Ouest	Bathy ok; Raccordement réseau à étudier	Production d'électricité, upweeling artificiel	artificialisation intégrale	Stabilité	41.1	9.21	-1470	-21	-1760	10	Court/moyen terme	Le Port
ETM offshore	site Démo ETM					0.0	0.00	0	0	0		Court terme	

**Tableau 9 : Caractéristiques des sites potentiels pour le développement de l'ETM Offshore à La Réunion**

Le site le plus proche des côtes sera comme pour l'ETM on-shore le site de Sainte Rose avec un éloignement d'un peu plus de 3,3 km. En observant la Figure 34 représentant le réseau électrique local, les sites les plus faciles à raccorder au réseau HTB (c'est-à-dire pour une puissance de plus de 12 MW) seront Sainte Rose pour « ETM Est », Le Port « ETM Ouest » avec 10 km de câble électrique sous marin et 5 km pour « ETM Sud ». Pour l'installation de centrales ETM puissantes, une réflexion devra être portée sur le choix à faire entre un renforcement ou une extension du réseau terrestre HTB et la mise en place encore plus coûteuse de long câble électrique sous marin. En effet, les sites d'ETM offshore des Avirons, de l'Étang Salé et de Saint Denis sont plus proches des côtes mais oblige une extension du réseau HTB terrestre en espace remarquable du littoral et dans la réserve naturelle marine ou en milieu urbain.





**Figure 53 : Représentation des sites potentiels pour l'ETM offshore**

Les problèmes seraient moindres si les centrales ETM de série avaient une puissance inférieure à 12 MW, ce qui permettrait un raccordement beaucoup plus simple sur le réseau HTA. Le dimensionnement de ces centrales de série ne sera connu qu'à la fin de 2009 ou 2010.

**e) Energie osmotique**

Les paramètres techniques dimensionnant pour l'implantation des équipements de récupération de l'énergie osmotique sont :

- Proximité et bonne qualité d'eau douce et d'eau de mer
- Un débit d'étiage suffisant du cours d'eau douce

Pour répondre à ces deux critères, l'emplacement idéal pour développer cette technologie est de se placer en embouchure de rivière et de préférence sur la côte Est, où les pluies sont constantes à peu près toute l'année. Le tableau suivant répertorie les différentes rivières de l'île où il serait possible de développer cette technologie lorsque celle-ci aura franchi la phase expérimentale.

Energie	Identifiant	Caractéristiques	Activités	Puissance Potentielle (MW)	Perspective développement	Commune
Osmotique	Riv Est_Centr h	Récupération rejet centrale hydraulique Riv de l'Est, site démo idéal	Production électricité, préserver ressources locales naturelles	3	Court/Moyen terme	Sainte-Rose
Osmotique	Riv Marsouins	Débit d'étiage correct	Production électricité	2	Long terme	Saint-Benoît
Osmotique	Riv Roches	Débit d'étiage correct	Production électricité	2	Long terme	Bras-Panon
Osmotique	Riv Mât	Débit d'étiage correct	Production électricité	2	Long terme	Saint-André
Osmotique	Riv St Etienne	Débit d'étiage correct	Production électricité	1	Long terme	Saint-Pierre
Osmotique	Riv Galets	Débit d'étiage correct	Production électricité	1	Long terme	Le Port
Osmotique	Riv Remparts	Débit d'étiage correct	Production électricité	2	Long terme	Saint-Joseph
Osmotique	Riv Langevin	Débit d'étiage correct	Production électricité	2	Long terme	Saint-Joseph

**Tableau 10 : Caractéristiques des différents sites potentiels pour le développement de l'énergie osmotique**

La carte suivante présente les différents sites potentiels présents tout autour de l'île. Le développement de cette technologie devra se faire de manière cohérente avec les réserves naturelles, les espaces remarquables du littoral et l'utilisation des embouchures de rivière par les pêcheurs traditionnels de bichiques. *Le bichique est un alevin de poisson très prisé pour la réalisation d'un met local d'exception, « le carry bichiques », le kilo se vend à plus de 50€.*

Le site idéal pour développer l'énergie osmotique dans sa phase expérimentale, suivi de la phase industrielle est sans nul doute le site de la centrale hydroélectrique de Sainte Rose, où en moyenne 6 m<sup>3</sup>/s d'eau douce sont rejetés directement dans le port de Sainte Rose. Une note d'opportunités est actuellement en cours d'élaboration sur le développement de cette technologie sur ce site. Les résultats de cette analyse pilotée par l'ARER seront connus vers le mois de Septembre 2009.

L'office de l'eau est l'organisme local qui réalise le suivi de la ressource locale en eau douce et de l'ensemble des cours d'eaux de l'île. Les débits d'étiage des différents cours d'eau de l'île sont donc connus.





Figure 54 : Photographie de pêcheurs et des canaux de pêche aux bichiques de la Rivière des Roches

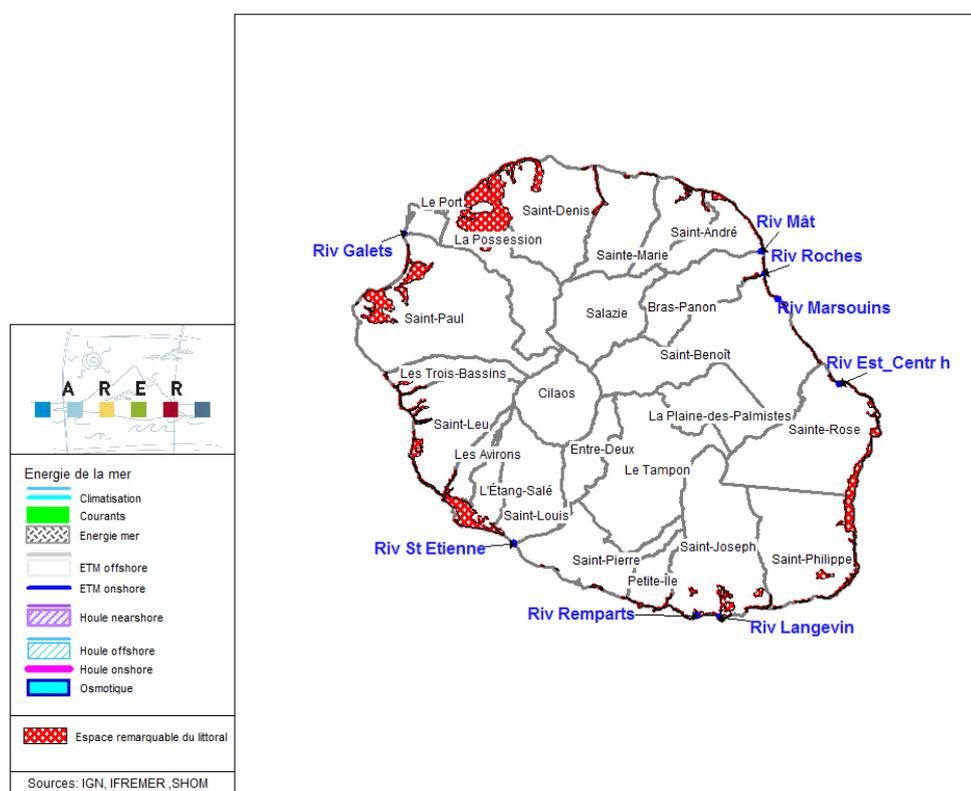


Figure 55 : Représentation des sites potentiels pour le développement de l'énergie osmotique à La Réunion

#### f) Biomasse marine

La biomasse marine consiste à cultiver des algues ou/et des microalgues utilisés dans de nombreux domaines. Aujourd'hui, de nombreuses multinationales affirment pouvoir produire du biocarburant algal à un prix compétitif à celui du biodiesel. Localement, des entreprises se positionnent sur ce secteur et il apparaît important que ces technologies (micro et bio technologies) pleines d'avenir soient intégrées dans la stratégie de développement du territoire réunionnais.

Les microalgues peuvent toucher au volet énergétique mais entrent aussi dans la composition de nombreux produits, alimentaires ou non alimentaires. La culture de microalgues pourrait ainsi assurer la production de matière première locale pour l'alimentation humaine ou de bétail/poissons, la production de composé pharmaceutique ou cosmétique.



**L'Eau Froide Profonde pompée par les centrales ETM on-shore ou les installations de climatisation par eau froide sous marine pourrait être utilisée pour cultiver ces microalgues marines, en photobioréacteurs ou en bassin, autour de l'ensemble des sites potentiels identifiés (cf. Tableau 8, Tableau 7, Figure 50 et Figure 52).**

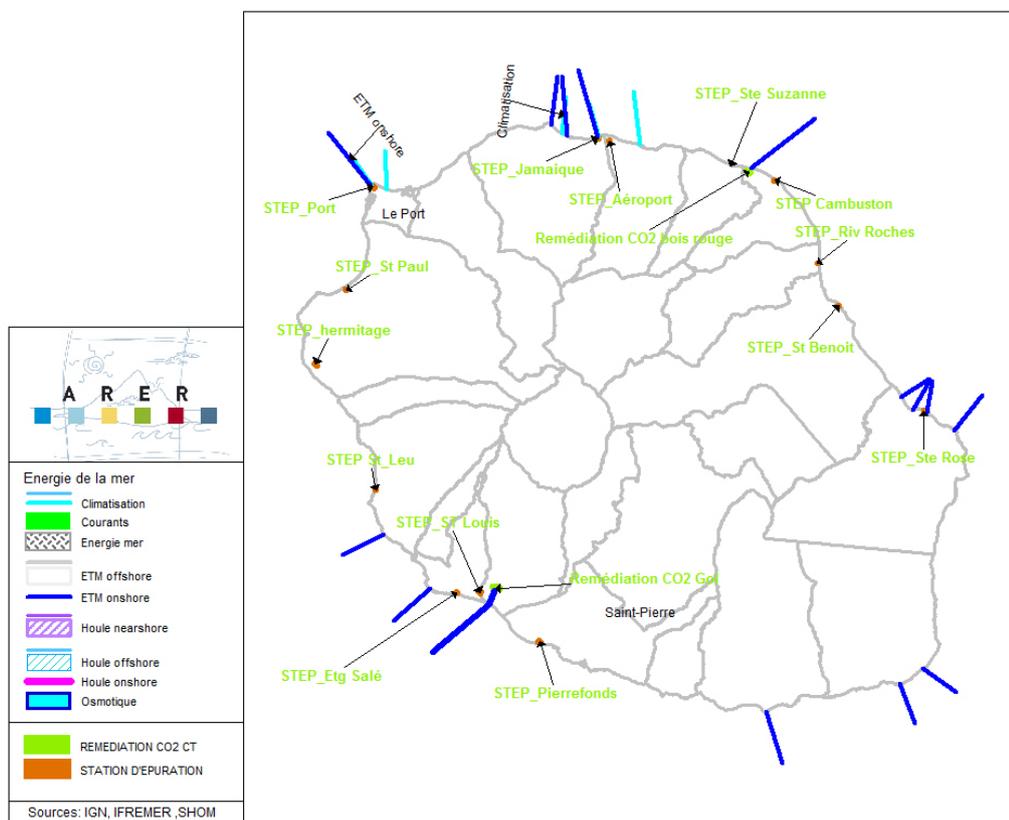
Des technologies de récupération de l'énergie de la houle near-shore (ex : CETO) pomperaient en principe de l'eau de mer sur terre, il serait aussi envisageable de développer la culture d'algues au niveau de l'atterrage de ces technologies.

Les microalgues peuvent aussi être utilisées pour le traitement des eaux usées et la remédiation du CO<sub>2</sub> (traitement du CO<sub>2</sub>) de centrales thermiques, il serait donc envisageable de développer ces cultures autour des stations d'épuration et des centrales thermiques réunionnaises.

Il est à noter que la culture des microalgues/algues est considérée comme une activité agricole. Elle peut donc se faire sur des terrains à vocation agricole située en bord de mer, avec des possibilités de culture en photobioréacteur pour les terrains au relief accidenté.

**Dans ce paragraphe, les sites de culture des microalgues/algues peuvent aussi convenir à des activités d'aquaculture (sauf pour le traitement des eaux usées et du CO<sub>2</sub> des centrales thermiques).**

La carte ci-dessous répertorie les sites autour desquelles peuvent s'implanter des cultures d'algues ou de microalgues et des activités d'aquaculture.



**Figure 56 : Représentation des sites potentiels pour le développement de la culture de la biomasse marine (ou de l'aquaculture) dans l'ensemble des domaines : énergétique, alimentaire, cosmétique, pharmaceutique, ...**

*Rappel : Les atterrages des sites d'ETM on-shore et de climatisation sont susceptibles de recevoir ces activités.*



**g) Eolienne offshore**

Les paramètres techniques dimensionnant pour l'implantation des éoliennes offshore sont :

- Une bonne occurrence des vents,
- Une bathymétrie comprise entre 20 et 100 m de profondeur (peut être à l'avenir entre -120 et -700 m).

**Potentiel éolien réunionnais :**

L'île de La Réunion est soumise aux vents d'alizés provenant des grandes latitudes Sud. Ses côtes Est, Sud et Nord sont beaucoup plus exposées au vent que sa côte Ouest, qui est elle protégée par les hauts massifs du centre de l'île. Ses zones sont donc beaucoup plus intéressantes pour le développement des éoliennes offshore que la zone Ouest. La carte suivante, extraite du schéma régional éolien présente le potentiel éolien réunionnais.

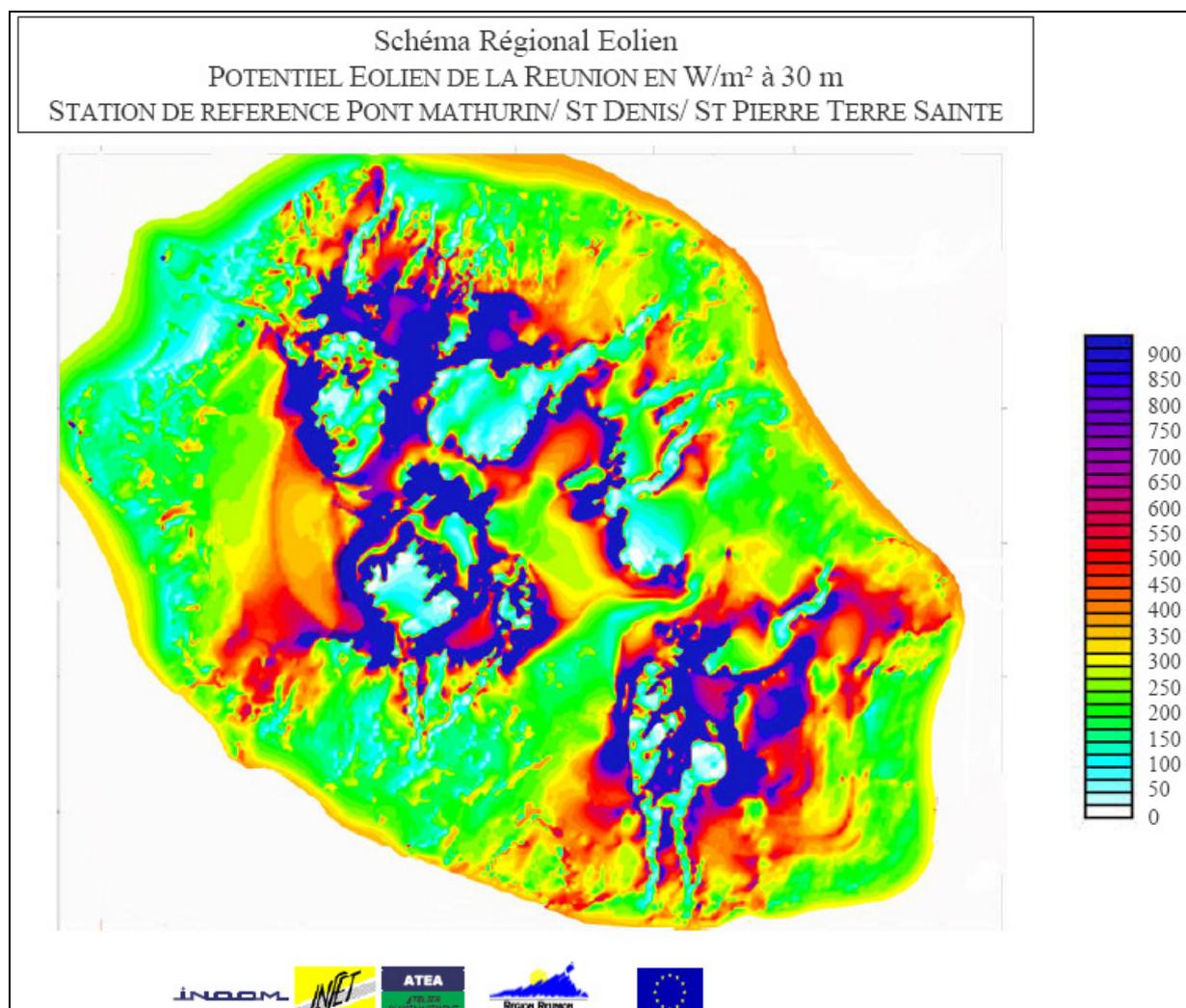


Figure 57 : Potentiel éolien de La Réunion (Source : Schéma régional éolien)

### Sites potentiels pour le développement des éoliennes offshore à La Réunion :

En superposant les cartes de la bathymétrie et du potentiel éolien de La Réunion, plusieurs zones pourraient être idéales pour accueillir des éoliennes offshore. Il faudra cependant que les technologies d'éolienne offshore se développent pour qu'elles puissent s'implanter en milieu tropical cyclonique et à des profondeurs variant de -20 à -100 mètres, ou plus tard de -120 m à -700 m.

Le tableau suivant répertorie l'ensemble des sites potentiels pour le développement des éoliennes offshore à La Réunion.

Energie	Identifiant	Caractéristiques	Activités	Surface (km <sup>2</sup> )	Profondeur Moyenne (m)	Profondeur minimum (m)	Profondeur maximum (m)	Puissance Potentielle (MW)	Perspective développement	Commune
Eolienne offshore	Eol_St Pierre	Bonne occurrence des vents, bathymétrie Ok, proximité aéroport	Production d'électricité	23	-61	-6	-239	20	Moyen/ Long Terme	St Pierre
Eolienne offshore	Eol_Ste Suz/St And	Bonne occurrence des vents, bathymétrie Ok,	Production d'électricité	34	-59	-2	-283	20	Moyen/ Long Terme	Ste Suzanne / St André
Eolienne offshore	Eol St Benoit	Bonne occurrence des vents, bathymétrie Ok	Production d'électricité	10	-70	-4	-311	10	Moyen/ Long Terme	St Benoit
Eolienne offshore	Eol_Pit Ste Rose	Bonne occurrence des vents, bathymétrie Ok	Production d'électricité	6	-84	-12	-264	10	Moyen/ Long Terme	Ste Rose
Eolienne offshore	Eol_Sud Sauvage	Bonne occurrence des vents, bathymétrie Ok	Production d'électricité	14	-107	-32	-387	20	Moyen/ Long Terme	St Joseph /st Philippe
Eolienne offshore	Eol_Etg Salé	Bonne occurrence des vents, bathymétrie Ok	Production d'électricité	19	-73	-11	-433	10	Moyen/ Long Terme	Etg Salé /Avirons

Tableau 11 : Caractéristiques des sites potentiels pour le développement des éoliennes offshore

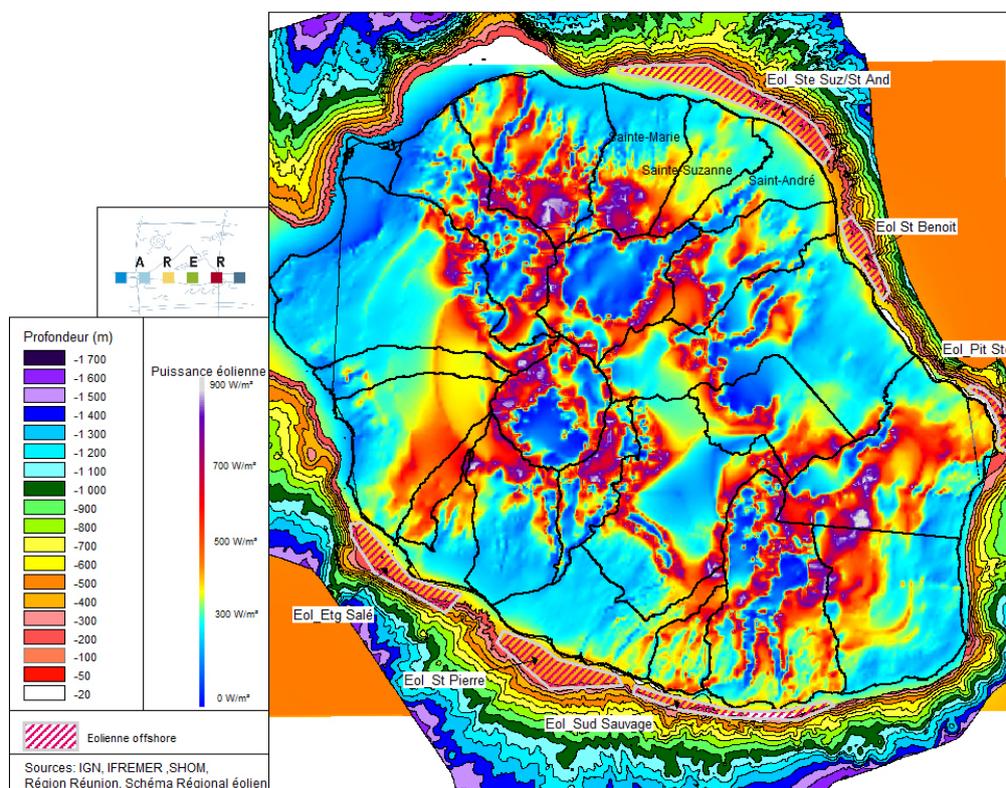


Figure 58 : Représentation des sites potentiels pour l'implantation d'éoliennes offshore en milieu cyclonique

## Conclusion

Ce document décrit dans un premier temps les énergies de la mer, les technologies, la ressource et les projets existants de diverses énergies marines dans le monde. Il repasse ensuite en revue les études qui ont été menées sur le potentiel et la ressource réunionnaise dans ce domaine. Pour atteindre l'autosuffisance énergétique d'ici 2025, l'exploitation des énergies marines pour la production d'électricité à hauteur de 26% du mix énergétique est incontournable sur une île telle que la Réunion. La ressource est grande, les études ont déjà démarré en ce qui concerne l'ETM, l'énergie osmotique, l'énergie des courants ou de la houle principalement. De nombreux projets commencent à voir le jour et devraient d'ici peu donner naissance aux premières installations en mer. Dans une dernière partie, ce document analyse zone par zone le potentiel de développement des diverses énergies de la mer et fournit une base de données de solutions alors envisageables compte-tenu des diverses contraintes naturelles ou structurelles. Le schéma régional des énergies de la mer est dès lors, une première base d'étude pour le développement des énergies de la mer à la Réunion : ETM, énergie des courants, énergie de la houle, énergie osmotique, biomasse marine, éolien offshore, climatisation par eau froide profonde.

## RÉFÉRENCES

- [1] "Renewable Energy from the Ocean - A Guide to OTEC », William H. Avery and Chih Wu, 1994
- [2] "Ocean Thermal Energy Conversion", L.A. Vega, décembre 1999
- [3] "Near-field Evaluation of Artificial Upwelling Concepts for Open-ocean Oligotrophic Conditions", paru dans J. of Marine Env. Eng., Vol. 8., par G.NIHOUS, 2005
- [4] <http://www.clubdesargonautes.org/energie/borabora.htm>
- [5] [http://www.statkraft.com/pub/innovation/tecnology/osmotic\\_power/how\\_osmotic\\_power\\_works.asp](http://www.statkraft.com/pub/innovation/tecnology/osmotic_power/how_osmotic_power_works.asp)
- [6] « Energie des Vagues, Île de La Réunion » , Perrono. G, 2003.
- [7] « Potentiel énergétique de la houle, modélisation de l'Energie des vagues à La Réunion-cotes Sud », BCEOM, 2005,
- [8] "A Ten-year Period of Daily Sea Surface Temperature at a Coastal Station in Reunion Island, Indian Ocean (July 1993 – April 2004): Patterns of Variability and Biological Responses" , Conand & al, 2007
- [9] <http://www.arer.org/moteurrecherche/affiche.php?article=257>



## Annexe I - ACRONYMES UTILISES ET MOT CLES

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ARER	Agence Régionale pour l'Energie - Réunion
ERM	Energies Renouvelables Marines
EnR	Energies Renouvelables
ETM	Energie Thermique des Mers
GERRI	Green Energy Revolution In Reunion Island et Grennelle de l'Environnement à la Réunion : Réussir l'Innovation
HQE	Haute Qualité Environnementale
MDE	Maîtrise de la Demande en Energie
PRERURE	Plan Régional des Energies Renouvelables et d'Utilisation Rationnelle de l'Energie
PRME	Programme Régional de Management Environnemental
PV	Photovoltaïque
RT	Réglementation Thermique
SAR	Schéma d'Aménagement régional
SD	Schéma Directeur
SEI	Systèmes Energétiques Insulaires
SER	Syndicat Des Energies Renouvelables
SMVM	Schéma de Mise en Valeur de la Mer
SREMER	Schéma Régional des Energies de la MER
TAC	Turbine à Combustion