

Energie des Vagues Île de La Réunion

PlateForme R&D ARER 2003

Stage du 04/03/2003 au 04/09/2003



Résumé	6
Abstract	7
Introduction	8
1 Caractéristiques de La Réunion	9
1.1 Les côtes	9
1.2 La bathymétrie	9
2 Les vagues : notions d'océanographie physique	11
2.1 Généralités	11
2.2 Génération des vagues	11
2.3 Propagation des vagues	13
2.3.1 Théorie de propagation	13
2.3.2 Propriétés cinématiques de la propagation	13
2.3.3 Dissipation d'énergie et bilan spectral	16
2.3.4 Exemples de propagation	17
2.4 Evolution des vagues du large vers les côtes	18
2.4.1 Shaoling	18
2.4.2 Atténuation	19
2.4.3 Réfraction Diffraction	19
3 Etude de la ressource réunionnaise	21
3.1 Mesure et modélisation des vagues	21
3.2 Etude de la ressource réunionnaise : réalisation d'un atlas du potentiel	25
3.2.1 Etude de la ressource offshore	25
3.2.2 Etude la ressource côtière (onshore)	34
3.2.3 Pose de houlographes	38
3.2.4 Etude des vagues extrêmes et des épisodes cycloniques	38
3.2.5 La Bathymétrie	42
3.3 Assistance au maître d'ouvrage Région Réunion	42
3.3.1 Introduction	42
3.3.2 Méthodologie générale	43
3.3.3 Les moyens disponibles et les coûts associés à cette méthodologie	45
3.3.4 Cahiers des charges	46
4 Veille technologique et contraintes associées	47
4.1 Les usines houlomotrices	47
4.1.1 Introduction	47
4.1.2 Les technologies shoreline	49
4.1.3 Les technologies near shore	56
4.1.4 Les technologies offshore	58
4.2 Impact environnemental des usines houlomotrices	70
4.2.1 Introduction	70
4.2.2 Impacts biologiques	70
4.2.3 Impacts liés aux accidents	71
4.2.4 Impact visuel	72
4.2.5 Impact sonore	72
4.2.6 Emissions	72
4.2.7 Impact de l'environnement sur les usines houlomotrices	73
4.3 Matériaux et technologies utilisées	74

4.3.1	Matériaux	74
4.3.2	Les turbines et générateurs	74
5	Enjeux et intérêts de l'énergie des vagues sur l'île de La Réunion	76
5.1	Les contraintes réglementaires : le cas d'un projet d'implantation en mer	76
5.1.1	Procédures sur le domaine public maritime (DPM)	76
5.1.2	Urbanisme - Sites et paysages	77
5.2	La production possible	80
5.3	Les secteurs d'activité liés à la filière	80
5.4	La revente de l'énergie des vagues	81
Conclusion		<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
Annexe 1 : Cahier des charges Etude la houle côtière		83
Annexe 2 : Cahier des charges - Pré diagnostic environnemental et réglementaire		89
Annexe 3 : Cahier des charges – Etudes in situ de la houle		93
Annexe 4 : Le Domaine Public Maritime (DPM)		96
Annexe 5 : Contacts		99

Figure 1.1-1	Les côtes	9
Figure 1.1-2	Les plages	9
Figure 1.1-3	récif coralliens	9
Figure 1.2-1	modèle à 100m de la bathymétrie	10
Figure 2.2-1		11
Figure 2.2-2		12
Figure 2.2-3		13
Figure 2.3-1		14
Figure 2.3-2		14
Figure 2.3-3		15
Figure 2.3-4		16
Figure 2.3-5		17
Figure 2.3-6		18
Figure 2.4-1	phénomène de réfraction	20
Figure 2.4-2	phénomène de diffraction	20
Figure 3.1-1	Echo renvoyé par une mer idéalement plate	23
Figure 3.1-2	Echo renvoyé par une mer formée de vagues (Credits Cnes)	23
Figure 3.1-3	trace terrestre autour de La Réunion	24
Figure 3.2-1	rose des houles OI Février	26
Figure 3.2-2	rose des houles OI Août	27
Figure 3.2-3	zone de l'étude offshore	28
Figure 3.2-4	potentiel moyen mensuel – point 67	29
Figure 3.2-5	fréquence d'occurrence de Hs	30
Figure 3.2-6	fréquence d'occurrence de Ts	30
Figure 3.2-7	Rose des vagues – point 67	30
Figure 3.2-8	fréquence d'occurrence énergétique de (Hs, Ts) - point 67	31
Figure 3.2-9	fréquence d'occurrence énergétique de (Hs, Ts) - point 67	31

<i>Figure 3.2-10: fréquence d'occurrence énergétique de (Hs, Ts) - point 67</i>	32
<i>Figure 3.2-11 : fréquence d'occurrence énergétique de (direction, potentiel) - point 67</i>	32
<i>Figure 3.2-12 : fréquence d'occurrence énergétique de (direction, potentiel) - point 67</i>	33
<i>Figure 3.2-13: fréquence d'occurrence énergétique de (direction, potentiel) - point 67</i>	33
<i>Figure 3.2-14</i>	34
<i>Figure 3.2-15: positionnement des houlographes</i>	34
<i>Figure 3.2-16</i>	35
<i>Figure 3.2-17: potentiels onshore</i>	35
<i>Figure 3.2-18: Zones de l'étude onshore</i>	36
<i>Figure 3.2-19</i>	37
<i>Figure 3.2-20</i>	39
<i>Figure 4.1-1</i>	48
<i>Figure 4.1-2 : Photo LIMPET</i>	52
<i>Figure 4.1-3</i>	53
<i>Figure 4.1-4 : Caractéristiques techniques PICO</i>	54
<i>Figure 4.1-5 : caractéristique techniques SAKATA</i>	55
<i>Figure 4.1-6 : usine de Sakata</i>	56
<i>Figure 4.1-7 : Sakata en construction</i>	56
<i>Figure 4.1-8 : vue aérienne de Toftestallen</i>	56
<i>Figure 4.1-9 : Vizhinjam (Kerala, Inde)</i>	57
<i>Figure 4.1-10 : illustration de la technologie Energetech</i>	58
<i>Figure 4.1-11 : illustration de la technologie Energetech</i>	58
<i>Figure 4.1-12</i>	59
<i>Figure 4.1-13</i>	60
<i>Figure 4.1-14</i>	61
<i>Figure 4.1-15 : résonance de ORECon</i>	62
<i>Figure 4.1-16 : Bouée ORECon à la mise à l'eau</i>	62
<i>Figure 4.1-17 : WavePump à la mise à l'eau</i>	63
<i>Figure 4.1-18 : répartition du coût d'une WavePump</i>	64
<i>Figure 4.1-19 : principe de AWS</i>	64
<i>Figure 4.1-20 : caractéristique techniques de AWS</i>	65
<i>Figure 4.1-21 : AWS entre deux eaux</i>	65
<i>Figure 4.1-22 : La McCabe Wave Pump à l'embouchure du Shannon</i>	66
<i>Figure 4.1-23: prototype de Pelamis à l'eau</i>	67
<i>Figure 4.1-24: principe du WaveDragon</i>	67
<i>Figure 4.1-25: Répartition du prix d'un WaveDragon (hors câblage)</i>	68
<i>Figure 4.1-26: caractéristiques techniques du WaveDragon de 4W</i>	68
<i>Figure 4.1-27 : Prototype de WaveDragon à l'eau</i>	68
<i>Figure 4.1-28 : principe du WavePlane</i>	69
<i>Figure 4.3-1: Turbine Pelton</i>	74
<i>Figure 4.3-2: turbine Kaplan</i>	75
<i>Annexe 1 : Cahier des charges Etude la houle côtière</i>	83
<i>Annexe 2 : Cahier des charges - Pré diagnostic environnemental et réglementaire</i>	89
<i>Annexe 3 : Cahier des charges – Etudes in situ de la houle</i>	93
<i>Annexe 4 : Le Domaine Public Maritime (DPM)</i>	96
<i>Annexe 5 : Contacts</i>	99

Résumé

L'océan est, de part sa taille et sa nature, un réservoir extraordinaire d'énergie. Il capte le rayonnement solaire sur toute sa surface ce qui crée un gradient thermique énergétiquement exploitable grâce aux technologies OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion). Il concentre à sa surface l'énergie éolienne à l'origine de la formation de la grande majorité des vagues.

En effet les houles sont créées dans les zones les plus ventées du globe, notamment entre 30° et 60° de latitude. Elles arrivent sur La Réunion du secteur sud (185° à 195°) et atteignent les côtes avec une perte d'énergie minimale caractéristique des îles volcaniques dont les fonds sous-marins remontent très rapidement.

L'étude de la ressource offshore a été réalisée à partir de données issues de modèles de prévision du CEP dont les résultats ont été calibrés, après coup, par les mesures réalisées soit par des houlographes soit par satellites. La houle la plus exploitable a une hauteur de 2m et une période de 10.5s. Le potentiel offshore au sud de l'île est de 26kW/m.

Une méthodologie, visant à la réalisation de l'atlas de la ressource en énergie des vagues a été proposée et adoptée par la Région Réunion : étudier numériquement la houle onshore, discriminer les sites adaptés à l'implantation d'une usine et enfin poser un houlographe dans les sites à fort potentiel.

Les technologies appliquées ou en développement qui pourraient intéresser La Réunion en produisant de 300kW à 4MW et les secteurs d'activité impliqués dans la filière sont enfin présentés afin de dégager les puissances potentiellement installables à La Réunion.

Abstract

Ocean is, because of his nature and his size, an extraordinary energy's stock. It stores solar radiance on his entire surface this that create a thermal gradient energetically exploitable through OTEC technologies. It concentrates on his surface wind energy through waves.

Indeed, swell are created in the windiest zone of the world. It arrives on Reunion Island from south sector (185° à 195°) and surf on Reunion Island coast with a minimal loss of energy characteristic of volcanic islands: submarine ground climb back up very quickly.

Offshore resource study was realized from hindcasted data: the more energetically useful swell have 2m of height and 10.5sec of period. The offshore potential, on the south of the island, is 26kW/m.

A methodology, aiming at the realisation of a wave power resource atlas was proposed and adopted by Reunion Island Council. It deals with a numerical study of onshore waves, with the characterization of onshore sites adapted to the implantation of a wave power device and at least with the installation, on best sites, of a wave buoy.

The applied or currently developed devices that could interest Reunion Island, and activities sectors implicated in the network are finally presented in order to assess potentially installable powers on Reunion Island.

Introduction

L'océan est, de part sa taille et sa nature, un réservoir extraordinaire d'énergie. Il capte le rayonnement solaire sur toute sa surface ce qui crée un gradient thermique énergétiquement exploitable grâce aux technologies OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion). Il concentre à sa surface l'énergie éolienne à l'origine de la formation de la grande majorité des vagues.

La Réunion, île tropicale baignée dans l'Océan Indien, doit faire face à des problèmes énergétiques certains dus à la croissance démographique, à l'augmentation croissante des besoins et à la dépendance actuelle aux énergies fossiles.

De ce constat est née la volonté de connaître le potentiel de La Réunion en énergie houlomotrice. Les caractéristiques physiques de l'île de La Réunion et des vagues seront présentées dans un premier temps. L'étude, à partir des données disponibles, de la ressource hauturière et côtière sera ensuite détaillée et s'inscrira dans une démarche plus globale, la réalisation de l'atlas de la ressource en énergie des vagues engagée par la Région Réunion. Les deux dernières parties du document présenteront la veille technologique et l'impact environnemental des usines mais aussi le marché potentiel que représente l'île de La Réunion.

1 Caractéristiques de La Réunion

1.1 Les côtes

Les paysages littoraux proviennent de multiples facteurs géologiques, climatiques, hydrologiques, et biologiques. La jeunesse du volcanisme n'a pas permis partout le développement de vraies plaines littorales : souvent les pentes volcaniques sont en contact direct avec l'océan.

Les côtes se développent sur 208km : elles sont faites de grands lobes réguliers dus à la fluidité des laves d'un volcanisme de type hawaïen : pas de ports naturels, pas de baies fermées, et pas de promontoires. Elles sont de trois types :

- ✓ Les falaises vives et côtes rocheuses, contacts directs entre le volcan et la mer, plus fréquentes autour du piton de la fournaise qu'ailleurs, ne facilitent pas l'ouverture de l'île vers le large (cf. figure 1-1);
- ✓ Les grands cordons d'alluvions, liés à l'érosion torrentielle, dominant surtout de la rivière de l'Est à Saint Denis, et de la possession au port ;
- ✓ Les plages de sables basaltiques, autres produits de l'érosion torrentielle, font l'originalité de la baie de Saint Paul et de la région de l'Etang Salé ; les plages de sables coralliens sont des plages d'arrière récifs, situées dans l'Ouest et le Sud (cf. figure 1-2 et 1-3) ;

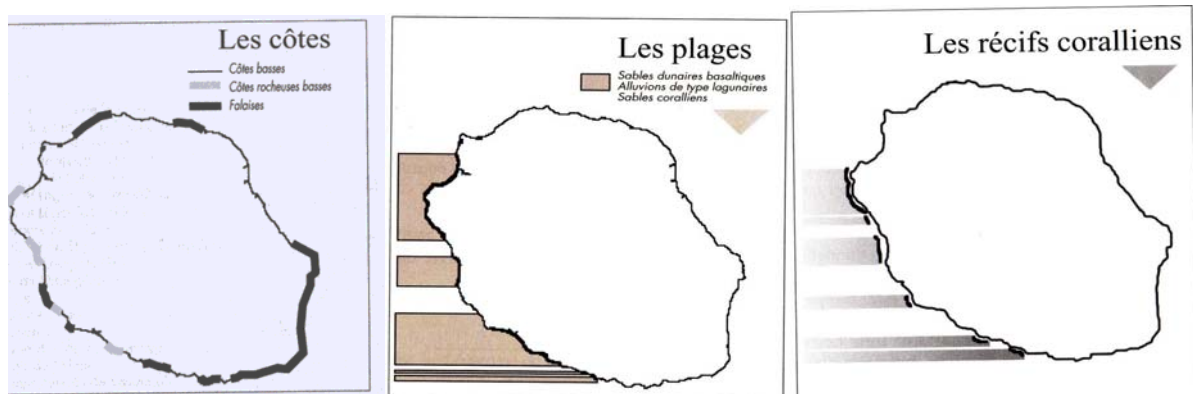


Figure 1.1-1 Les côtes

Figure 1.1-2 Les plages

Figure 1.1-3 récifs coralliens

Une description plus précise des zones côtières est réalisée dans le chapitre du SAR valant SMVM.

Deux études décrivent également les zones maritimes de La Réunion

- ✓ Atlas des espaces naturels du littoral, île de La Réunion
Réalisé par le Service de l'Aménagement et de l'Urbanisme de la DDE par H.Rondeau, J.C.Laude ...
- ✓ Etude sur la sensibilité des zones côtières, île de La Réunion
Découpage des côtes en 17 zones à partir d'une classification des côtes en 10 classes
Réalisée par la DIREN (contact Anne Liotto)

1.2 La bathymétrie

La connaissance de la bathymétrie est un élément primordial pour la filière « énergie des vagues ».

La recherche de données bathymétriques s'est effectuée dans un premier temps auprès d'acteurs locaux comme l'Ifremer ou la DDE puis par l'achat de cartes marines du SHOM :

- ✓ Carte n°7222, La Réunion Partie Est, de la Pointe Rivière du Mât à la Pointe Marcelin
 - ✓ Carte n°7328, La Réunion Partie Sud, de la Pointe des Châteaux à Point Marcelin
 - ✓ Carte n°7183, La Réunion Partie Nord, de la Pointe des Châteaux à Pointe Rivière du Mât
- Le pas du maillage de ces données est, sur ces cartes marines, de l'ordre de 1,5km.

Le SHOM, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, est l'autorité la plus compétente dans le domaine. En plus des cartes, ils possèdent des données analogiques et numériques beaucoup plus finement distribuées. Un modèle de bathymétrie numérique créé par le SHOM permet d'avoir des données bathymétriques avec un pas de 200m, 150m ou 100m.

En figure 1.2-1, la bathymétrie de l'île avec un de 100m est reconstituée.

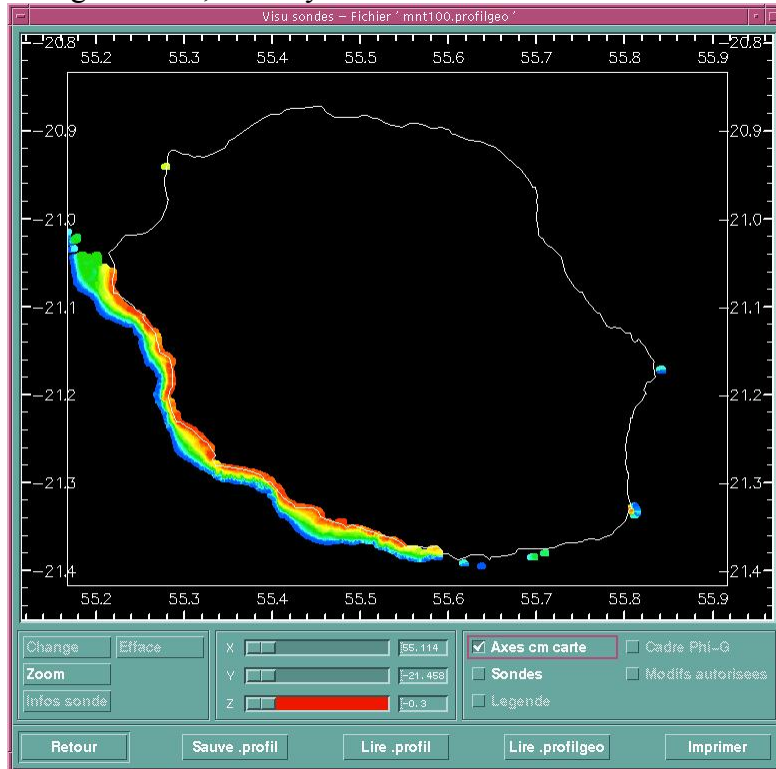


Figure 1.2-1 : modèle à 100m de la bathymétrie

Nous constatons sur cette figure que seule la partie ouest de l'île est représentée numériquement. En effet, pour des raisons de budget et de priorités, la numérisation de la bathymétrie numérique n'a pas été réalisée en totalité. Or pour les études de la ressource, il est important de connaître la partie sud de l'île au même titre que l'ouest. Cette intensification de la numérisation doit être lancée par la Région Réunion en collaboration avec le SHOM.

2 Les vagues : notions d'océanographie physique

2.1 Généralités

Scientifiquement, les vagues sont des ondes de gravité de surface. Une onde correspond à un phénomène de propagation d'une perturbation depuis un endroit d'un milieu matériel jusqu'à un autre, qui n'engendre pas de « mouvement global » du milieu lui-même. Les vagues sont donc des oscillations de l'interface océan-atmosphère (eau-air) qui sont maintenues par un échange entre énergie cinétique et énergie potentielle gravitationnelle.

Définir les vagues comme ondes de gravité restreint le champ des périodes d'oscillation entre une heure et une seconde. Les ondes de période plus grande sont associées aux forces de rappel (forces qui s'opposent à la perturbations) de Coriolis (Ondes de Kelvin et Poincaré) ou d'attraction de la lune et du soleil (marée) tandis que les ondes de période plus petite sont associées à la tension de surface (ondes mixtes de gravité-capillarité et ondes capillaires).

Toutes les vagues sont donc entretenues par le même phénomène, la gravité, ce qui signifie que la propagation d'un vague de raz de marée obéit aux mêmes principes que celle d'un clapot. Ces vagues ont aussi des phénomènes de dissipation communs. Leur génération par contre diffère. Les raz de marée ou tsunamis sont essentiellement provoqués par des glissements de terrain sous-marins, conséquences d'un tremblement de terre. Les autres vagues sont créées par le vent et c'était la seule connaissance que l'on avait sur la génération des vagues jusqu'au début du XX^{ème} siècle. La propagation des vagues était déjà mieux connue, grâce aux travaux de Rayleigh et de Boussinesq au XIX^{ème} siècle et, entre autres, de Rossby dans les années 1930-1945. Les premiers efforts importants de synthèse sur la connaissance des vagues ont eu lieu pendant la seconde guerre mondiale et sont résumés dans les rapports rédigés par Sverdrup et Munk.

2.2 Génération des vagues

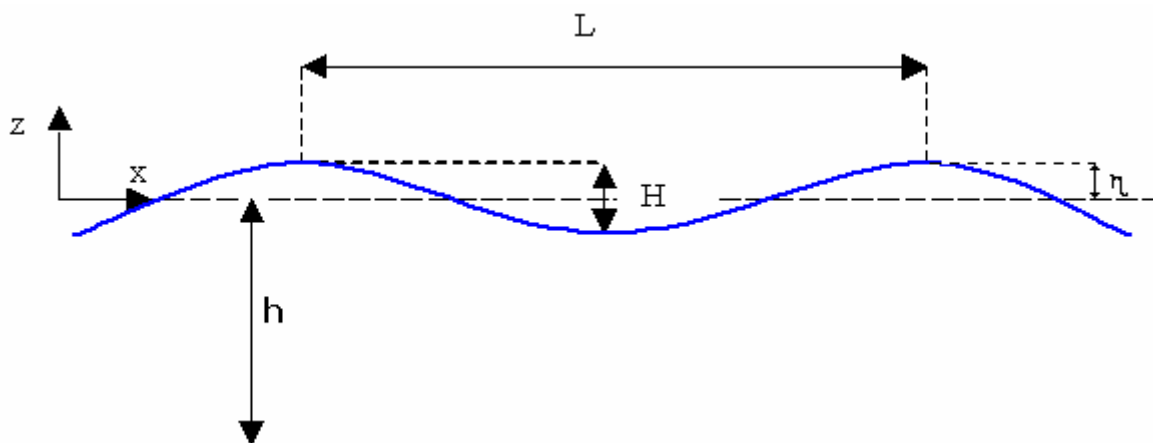


Figure 2.2-1

avec H : amplitude de la houle
 L : longueur d'onde de la houle
 h : profondeur d'eau locale
 η : élévation verticale du niveau de la mer

T : période

Le nombre d'onde k est défini par $k=2.\pi/L$. Ce nombre d'onde est la norme d'un vecteur d'onde k , un vecteur a deux composantes k_x et k_y , dans les deux directions horizontales x et y , qui représente la direction de propagation de la vague.

La formation et la croissance des vagues sous l'effet du vent est un phénomène complexe qui reste encore assez mal compris.

La première théorie correcte pour la formation initiale des vagues est due à Phillips (1957) et fait appel aux fluctuations turbulentes de la pression de l'air et à leur advection par le vent moyen.

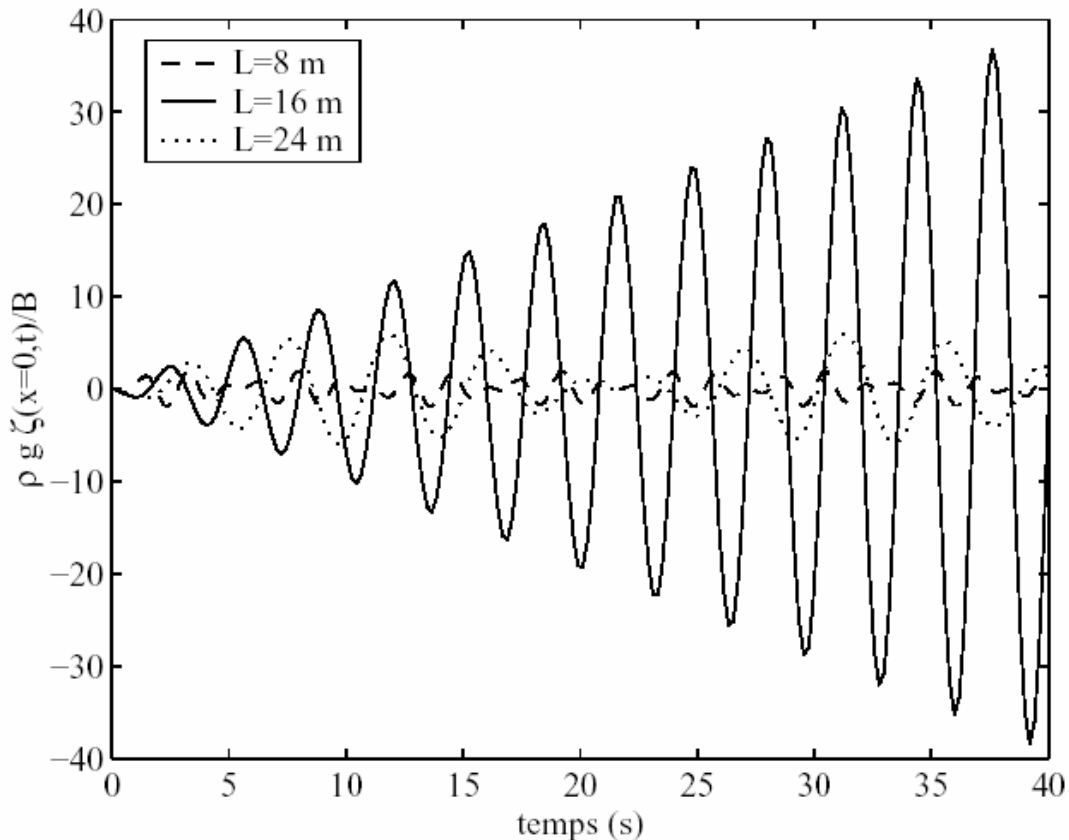


Figure 2.2-2

Croissance des vagues sous l'effet d'un vent turbulent

Elévation normalisée de la surface, pour un vent $U=5\text{m/s}$, et 3 longueurs d'ondes différentes

La longueur d'onde résonnante est $L=16.03\text{m}$

La croissance linéaire de l'énergie des vagues donnée par la théorie de Phillips (1957) semble expliquer convenablement le début de la croissance des vagues. Mais au bout d'un certain temps, on ne peut plus supposer que le vent est uniforme car il est au moins modifié, au voisinage de la surface, par la présence des vagues. Miles (1957) a mis en évidence un mécanisme de croissance des vagues qui découle de cette modification : le vent proche de la surface est modifié par la présence des vagues, et cette modification entraîne une amplification des vagues.

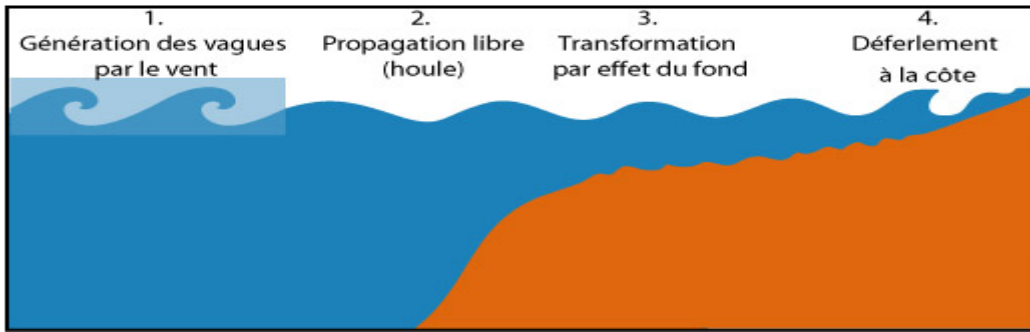


Figure 2.2-3

Les vagues sont générées par le vent (1, voir image ci-dessus). En l'absence de vent, les vagues continuent à se propager librement, c'est ce qu'on appelle la houle (2). Aux abords des côtes, ces vagues sont modifiées par la présence du fond (3, pour des profondeurs inférieures à 300 m) et en particulier par la rugosité du fond (rides, roches) qui peut être elle-même due aux vagues. Enfin les vagues déferlent (4) sur la plage ou les hauts-fonds, récifs et autres, pour des profondeurs de 1 à 20m, perdant toute leur énergie qui est en partie communiquée aux courants.

En pratique ces quatre zones peuvent se chevaucher, la "mer du vent" est souvent mêlée à la houle, et le vent peut souffler sur la zone de déferlement près de la plage, générant des vagues localement, près du rivage. La propagation des vagues est influencée par les courants et les variations du niveau d'eau, mais à leur tour les vagues modifient les courants et le niveau moyen de l'eau.

2.3 Propagation des vagues

2.3.1 Théorie de propagation

La théorie de propagation pour les petites vagues (produit $k.H$ faible et quotient H/h faible) date du XIX^{ème} siècle. Elle offre l'avantage d'être linéaire, on peut donc superposer différentes solutions pour décrire l'état réel de la mer, mais surtout elle explique à 95% le mouvement des vagues, en particulier au large en absence de vent.

En partant des équations de la quantité de mouvement et de la masse appliquées à l'océan, la théorie d'Airy (1845) donnent une solution approchée. Gerstner avait déterminé en 1802 une solution qui satisfait exactement la condition pression nulle à la surface, mais avec un rotationnel non nul. Stokes (1847) a étendu la solution d'Airy à des termes non linéaires, qui améliorent l'accord de la théorie avec les observations de vagues. Dans l'océan, l'ensemble des observations montre que les vagues sont irrotationnelles et sont bien décrites par les théories de Airy et Stokes (voir par exemple Thornton et Kraphol).

2.3.2 Propriétés cinématiques de la propagation

Le mouvement des vagues présente une vitesse maximale en surface qui s'atténue vers le fond avec une distance typique $k^{-1}=L/2.\pi$, de telle sorte que les vagues n'ont aucune influence significative à des profondeurs supérieures à $L/2$, la moitié de la longueur d'onde.

A partir des solutions d'Airy, en simplifiant les termes en $k.h$ et en intégrant sur le temps, on obtient les positions successives d'une même particule d'eau sous la forme :

$$x = x_0 + H \frac{k}{k} e^{kz_0} \sin(k \cdot x - \omega t)$$

$$z = z_0 H e^{kz_0} \cos(k \cdot x - \omega t)$$

qui est l'équation paramétrique d'un cercle de diamètre $2.H.e^{k.z}$. Les particules d'eau suivent donc des trajectoires circulaires dont le diamètre diminue avec la profondeur.

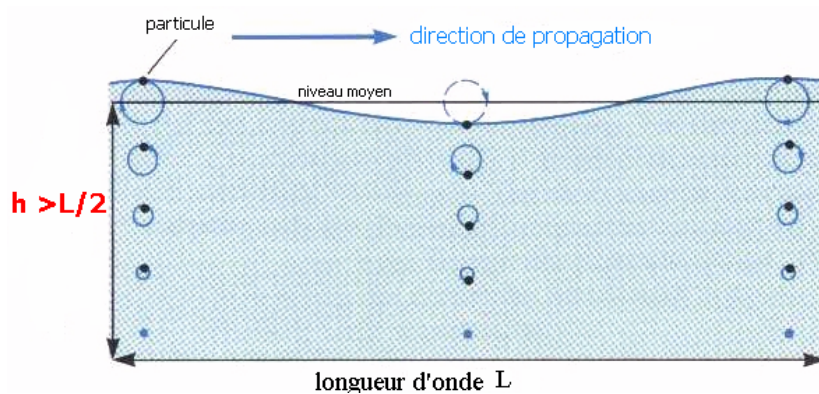


Figure 2.3-1

Pour des profondeurs moins importantes la vitesse au fond n'est plus nulle et dans ce cas les trajectoires sont des ellipses dont le grand axe est horizontal et mesure $2H \cdot \frac{\cosh(k \cdot z + k \cdot h)}{\sin(k \cdot h)}$, et le petit axe, vertical et de mesure $2H \cdot \frac{\sinh(k \cdot z + k \cdot h)}{\sin(k \cdot h)}$, décroît de $2.h$ en surface à 0 au fond.

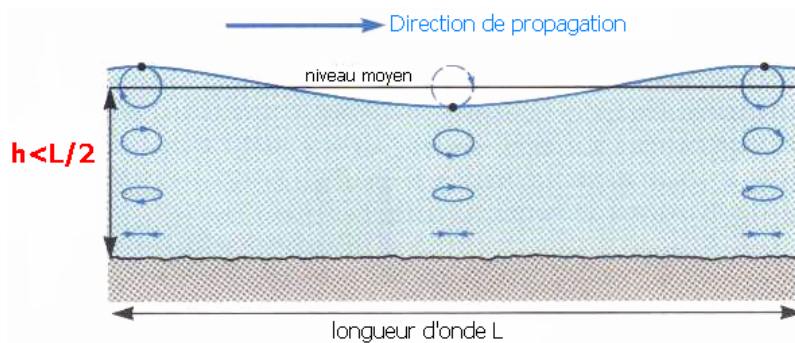


Figure 2.3-2

La vitesse à laquelle la crête des vagues progresse est appelée vitesse de phase et est donnée par le rapport $C = L/T = \omega/k$ de la pulsation et du nombre d'onde. Comme $\omega^2 = g.k.tanh(k.h)$

$$C = \left(\frac{g}{k} \cdot tanh(k.h) \right)^{1/2}$$

Les vagues sont dites dispersives : leur vitesse de phase c est fonction de leur longueur d'onde, les vagues les plus longues se propageant plus vite que les vagues les plus courtes.

Ce n'est plus le cas dans la limite des faibles profondeurs et des grandes longueurs d'ondes ($k.h \ll 1$) pour lesquelles c tend vers $(g.h)^{1/2}$ indépendamment de k .

L'énergie des vagues est constamment échangée entre l'énergie potentielle E_p et énergie cinétique E_c , qui sont égales en moyenne sur une période. On a :

$$E = E_c + E_p \approx 0,5 \cdot \rho \cdot H^2$$

On a vu que les vagues linéaires ne correspondaient à aucun courant moyen, les orbites des particules d'eau étant périodiques. Par contre, la propagation des vagues est associée à un flux d'énergie. En effet, les vitesses et pressions sont en phase (solutions de la théorie d'Airy), si bien

qu'une colonne d'eau effectue un travail W sur sa voisine située dans la direction de propagation. On a :

$$W = C_g \cdot E \quad \text{avec} \quad C_g = \frac{\omega}{k} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{k \cdot h}{\sinh(2 \cdot k \cdot h)} \right)$$

W est un flux d'énergie et C_g est la vitesse de groupe qui est donc la vitesse moyenne de cette énergie. Le nom de vitesse de groupe vient du fait qu'elle représente la vitesse d'un groupe de vagues contenant des fréquences différentes mais proches.

Comme pour la lumière ou le son, la décomposition des vagues suivant différentes fréquences se traduit sous forme de spectre. La différence essentielle est que l'on ne voit pas le spectre (pour la lumière les différentes fréquences sont de différentes couleurs, et pour le son, les différentes fréquences correspondent à la hauteur, grave ou aiguë).

Comprendre le spectre des vagues demande donc un peu d'imagination. Il y a plusieurs manières de représenter le spectre. Une de ces manières utilise une décomposition en différentes longueurs d'onde. On décompose alors la forme de la surface en calculant la contribution de différents nombres d'onde k . Par exemple, une oscillation de longueur d'onde L_0 dans la direction x donne une contribution dans le spectre au vecteur d'onde

$$k = \left(k_x = \frac{2 \cdot \pi}{L_0}, k_y = 0 \right)$$

Pour transformer la forme de la surface de l'espace physique, où les coordonnées sont x et y , à l'espace spectral, où les coordonnées sont k_x et k_y , on utilise la transformée de Fourier.

Ci-dessous : trois exemples de forme de la surface de la mer et leurs spectres associés. Sur les spectres les couleurs rouge et orange représentent une forte et faible intensité du spectre.

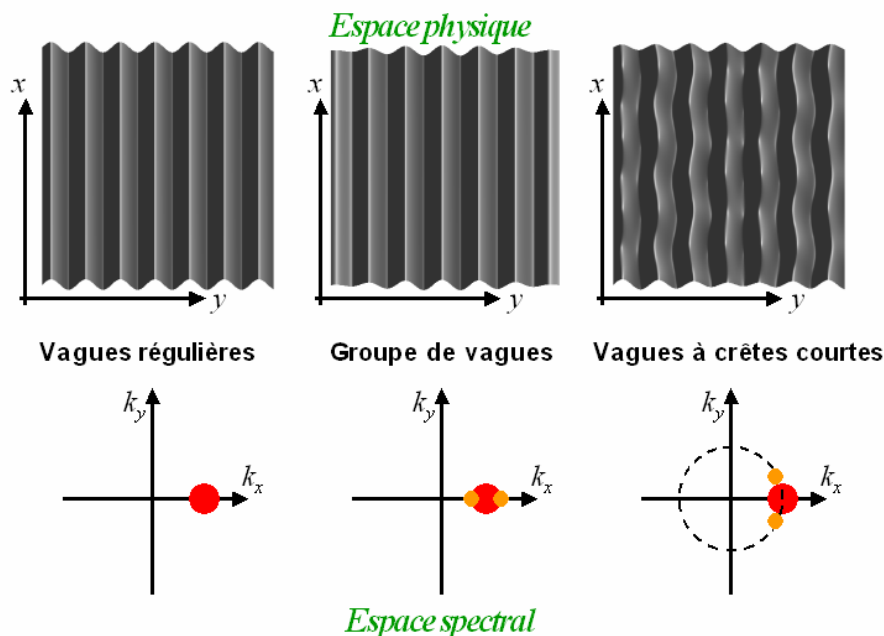


Figure 2.3-3

On utilise souvent une décomposition en fréquence $f = 1 / T$, et direction. Dans l'exemple ci-dessous (a), la couleur représente la densité d'énergie pour une fréquence (axe radial) et direction

donnée. Le pic du spectre, en rouge, correspond donc à des vagues arrivant de l'est avec une fréquence au pic, $f_p = 0,659$ Hz, ce qui correspond à une période de 14 secondes.

Quand on regroupe les énergies de toutes les directions pour une même fréquence, on obtient le spectre en fréquence (courbe b.).

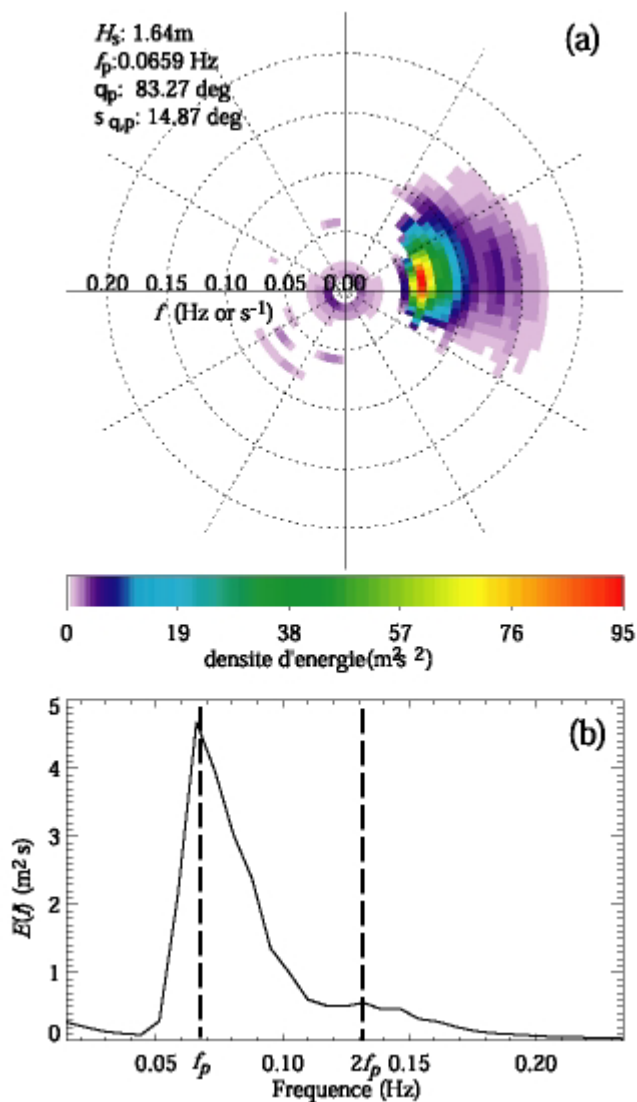


Figure 2.3-4

2.3.3 Dissipation d'énergie et bilan spectral

L'énergie des vagues, au large, est dissipée soit à cause de la viscosité, ce qui est assez rapide pour les vagues très courtes, soit par déferlement. Le déferlement est le puits d'énergie le plus important pour la houle et la mer du vent mais il est très mal compris. Il correspond à une instabilité de la forme de la vague qui se produit lorsque la vitesse ou l'accélération verticale des particules d'eau dépasse la vitesse de phase ou une fraction importante de la pesanteur, ce qui se produit au niveau des crêtes des vagues. Le déferlement aboutit à la création de paquets d'écume dont le front se propage environ à la vitesse de phase des vagues.

2.3.4 Exemples de propagation

Au large les vagues se propagent en ligne droite sur la sphère terrestre. Or sur une sphère la "ligne droite" (la trajectoire la plus courte entre deux points) est un cercle passant par le centre de la sphère.

Les vagues de longue période se propagent sur de très grandes distances. En 1957 une expérience a montré que la houle qui arrive en été en Alaska peut venir de l'Antarctique, après 15000 km à travers le Pacifique. La figure 2.3-5 montre les trajectoires (appelées "rayons") suivies jour après jour (chaque jour est indiqué par une nouvelle couleur) par la houle de période $T = 14$ secondes qui arrive à Ouessant.

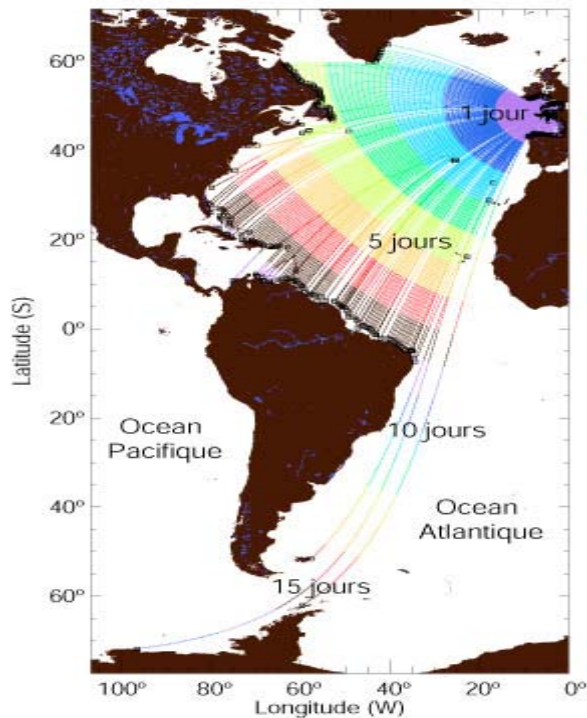


Figure 2.3-5

Sur la figure 2.3-6, les rayons des vagues de période 18s arrivant au large de Monterey, Californie sont représentée. Chaque changement de couleur correspond à un jour de propagation supplémentaire. On voit bien l'ombre des différents groupes d'îles : Hawaii, Polynésie Française...

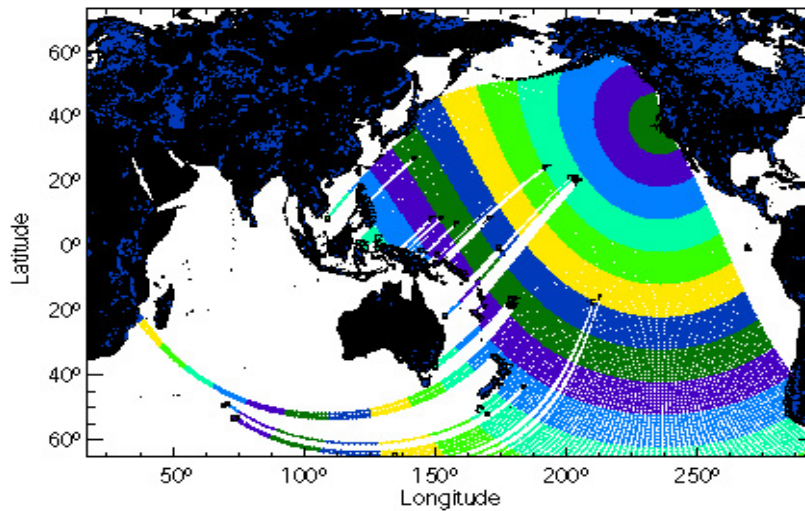


Figure 2.3-6

Le long des rayons, l'énergie de la houle varie peu. A part un effet géométrique, l'énergie de chaque composante est quasiment constante. C'est cette observation qui justifie la décomposition spectrale des vagues : tout se passe (presque) comme si les différentes composantes se propageaient indépendamment les unes des autres.

2.4 Evolution des vagues du large vers les côtes

On dit que la houle se propage en profondeur « finie » ou en eau peu profonde lorsque son mouvement est influencé par la bathymétrie donc comme nous l'avons vu lorsque la profondeur d'eau locale est inférieure à la moitié de longueur d'onde de la houle ($h < \frac{\lambda}{2}$).

Comparaison d'une vague régulière pour trois périodes différentes :

Période	5 sec	10 sec	15 sec
Longueur d'onde en pleine mer	39 m	156 m	351 m
Vitesse de phase en pleine mer	7,8 m/s	15,6 m/s	23,4 m/s
Profondeur à laquelle la vague commence à ressentir le fond	20 m	80 m	175 m
Longueur d'onde à 10m de profondeur	37 m	92 m	144 m
Longueur d'onde à 5m de profondeur	30 m	68 m	103 m
Longueur d'onde à 3m de profondeur	25 m	53 m	81 m
Vitesse de phase à 3m de profondeur	5 m/s	5,3 m/s	5,4 m/s

2.4.1 Shaoling

Une houle de période donnée se propage en « profondeur infinie » sans déformation au cours de sa propagation (dans l'approximation généralement bien vérifiée que l'atténuation par effets de viscosité est négligeable).

En « profondeur finie », la houle « ressent » la présence du fond, ce qui modifie sa longueur d'onde et sa célérité. La forme de la surface libre subit des déformations au cours de la propagation de l'onde dans une direction donnée, cette évolution de la « forme » de la vague, qui s'opère jusqu'au déferlement est appelée le shaoling ou levage, on parle aussi de gonflement de la vague avant déferlement.

Le flux d'énergie d'une houle d'Airy est donné par

$$W=C_g \cdot E \quad \text{avec} \quad C_g = \frac{\omega}{k} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{k \cdot h}{\sinh(2 \cdot k \cdot h)} \right).$$

Si on appelle a_0 l'amplitude de la houle au large, et C_{g0} sa vitesse de groupe, le rapport entre a et a_0 est donné par :

$$\left(\frac{a}{a_0} \right)^2 = \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 = \frac{C_g}{C_{g0}} = \frac{1}{\left(\tanh(k \cdot h) + \frac{k \cdot h}{\cosh^2(k \cdot h)} \right)}$$

Le rapport $\frac{a}{a_0}$, appelé coefficient de shaoling est minimum pour $1 - k \cdot h \cdot \tanh k \cdot h = 0$, soit $k \cdot h =$

1.198. A l'approche du littoral, l'effet de shaoling se traduit par une légère diminution de l'amplitude de la houle suivie d'une forte augmentation jusqu'au déferlement (Mayençon, 1992). La longueur d'onde et la vitesse de phase diminuent du large vers la côte.

2.4.2 Atténuation

De façon générale, les causes d'atténuation sont, en profondeur infinie, le déferlement par instabilités de la surface (« moutons »), la dissipation en volume par viscosité, les effets de la tension superficielle, le transfert d'énergie par effets non linéaires (ce n'est pas une dissipation mais un facteur de perte d'énergie par unité de longueur d'onde), en profondeur « finie » s'ajoutent le frottement sur le fond et le déferlement.

Le mouvement du fluide induit par le passage de l'onde est oscillant au-dessus du fond, et une partie de l'énergie est dissipée par frottement au fond. Ce mode de dissipation d'énergie s'ajoute aux effets déjà existants en profondeur infinie.

2.4.3 Réfraction Diffraction

Pour une onde électromagnétique, le passage, en incidence normale, d'un milieu à un autre d'indices différents se traduit par une onde réfléchiée et une onde transmise. Pour une onde de gravité, des variations de profondeur d'eau vont également se traduire par une réflexion partielle, une transmission partielle, et éventuellement une perte d'énergie.

L'onde « tourne » à l'approche du littoral, pour atteindre souvent le rivage avec une direction perpendiculaire à la côte. Ce phénomène, la réfraction, est analogue à celui observé pour une onde électromagnétique qui se propage à travers des milieux d'indices différents. C'est la profondeur d'eau qui joue le rôle d'indice (via le vecteur d'onde \mathbf{k}).

Pour une houle d'Airy, ce vecteur d'onde est donné à partir de la relation de dispersion $\omega^2 = g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot h)$.

Des variations de profondeurs d'eau pourront donc changer la direction de la houle. Si ces variations sont faibles la houle sera réfractée. Si les variations sont importantes (bathymétrie 2D très accidentée, digue...) des effets de diffraction devront être considérés.

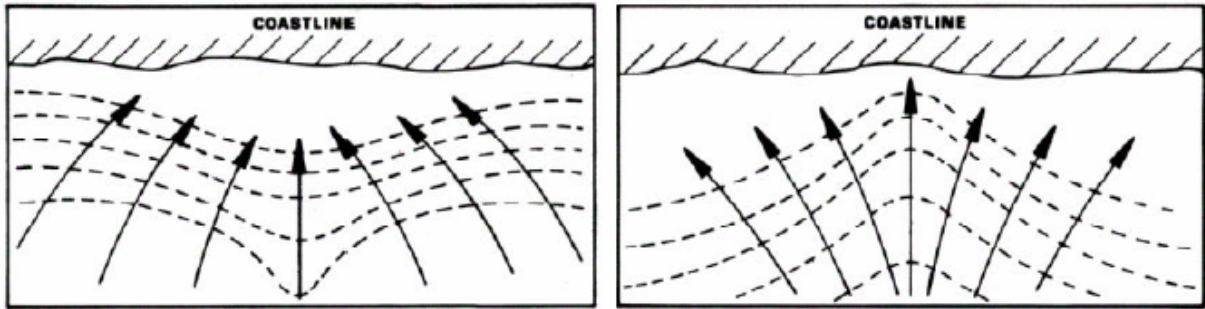


Figure 2.4-1 : phénomène de réfraction

Réfraction et rayons de houle

En zone côtière, lorsque les échelles de temps et d'espace des vagues sont faibles comparées aux variations du milieu, les propriétés locales d'un train d'onde (pression, vitesses...) peuvent être exprimées en fonction de $\eta = H \cdot \exp(i \cdot \phi)$, où H est l'amplitude locale de l'onde, et ϕ est sa phase. Pour des bathymétries variables, la phase ϕ est une fonction lentement variable du temps et de l'espace. On définit le vecteur d'onde local \mathbf{k} comme précédemment.

Dans le plan xOy , on appelle « rayons de houle » les courbes tangentes en tout point du plan au vecteur d'onde local \mathbf{k} .

Diffraction

Lorsqu'une houle se propage dans les régions où les variations du fond sont importantes en comparaison de sa longueur d'onde, ou en présence d'obstacles sur toute la colonne d'eau (digues, falaises), la houle « tourne » avec un rayon de courbure de l'ordre de la longueur d'onde, c'est le phénomène de diffraction.

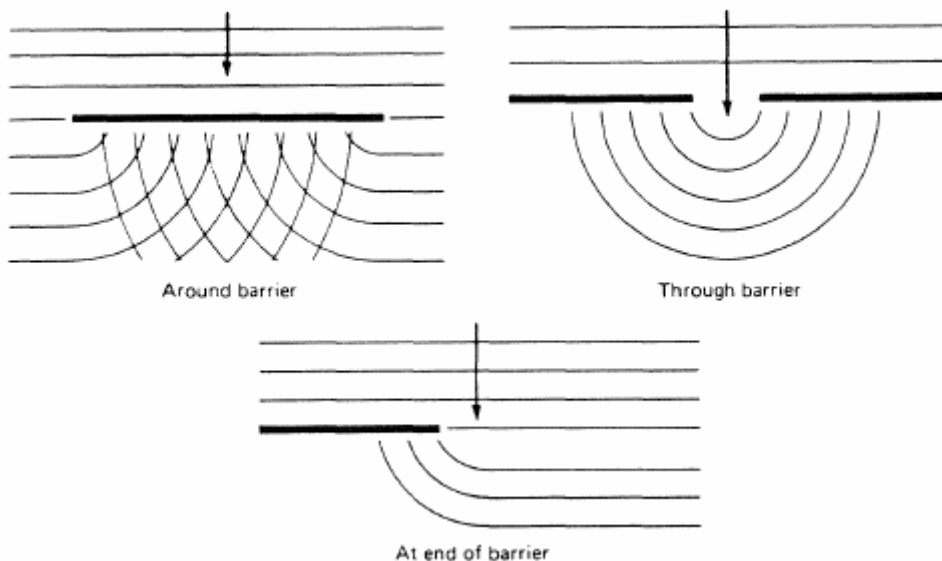


Figure 2.4-2 : phénomène de diffraction

Bibliographie :

- V. Rey, « hydrodynamique littorale et transport sédimentaire » janvier 2002, support de cours
- F. Arduin, « Vagues et hydrodynamique littorale », cours d'initiation à la recherche, février 2002
- Site du SHOM : http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/vagues/vagues_f.htm
- Wave energy resource and economic assessment for the state of Hawaii – Georges Hagermann

3 Etude de la ressource réunionnaise

Nous avons vu dans le chapitre précédent quelques notions d'océanographie physique permettant de mieux comprendre la physique des vagues des points de vue mathématique, physique et mécanique. Un autre pan de l'océanographie physique est celui de la mesure et en ce qui concerne le sujet, la mesure des vagues. La métrologie est une matière commune à toutes les sciences et est toujours au cœur des problématiques car elle est la passerelle entre la théorie et la réalité. Mesurer l'océan est une science d'autant plus difficile qu'il est vaste, difficile d'accès et parfois hostile. Nous verrons que cette science a évolué avec les techniques et que les moyens nous permettent désormais de caractériser correctement l'état de la mer. Nous verrons également les méthodes utilisées pour déterminer le potentiel d'une région en énergie des vagues en détaillant l'étude de la ressource réunionnaise et l'assistance apportée à la Région Réunion pour l'évaluation du potentiel de l'île.

3.1 Mesure et modélisation des vagues

Dans le chapitre précédent, les vagues ont été représentées idéalement par une sinusoïde caractérisée par son amplitude (hauteur) H , sa longueur d'onde L et sa période T (liée à la longueur d'onde par la vitesse C). L'autre paramètre important étant la profondeur d'eau locale h .

Les vagues de la « mer réelle » sont distribuées aléatoirement en hauteur, période et direction, ceci en fonction des vents. A une échelle de temps relativement courte, de l'ordre de trois heures dans des conditions autres que les tempêtes, les caractéristiques de la mer réelle reste approximativement constantes que l'on nommera « état de la mer » et qui peut être totalement décrit par le spectre de distribution de l'énergie en fréquence (et éventuellement en direction). Celui-ci peut être décrit par des paramètres statistiques sur l'amplitude, la période (et la direction). En général, on utilise comme paramètres la hauteur de vague significative H_s , la période principale (en énergie) T_e et/ou la période du pic du spectre T_p , et la direction principale Θ .

En pratique pour cette étude, nous utiliserons les paramètres $H_{1/3}$ et $T_{1/3}$ qui sont respectivement la hauteur et la période moyenne du tiers des plus hautes vagues. Ces deux moyennes sont d'autant plus proches de H_s et T_e que le spectre en fréquence est étroit.

Mathématiquement, on définit H_s comme

$$H_s = 4 \cdot m_0^{\frac{1}{2}}$$

où m_0 est le moment spectral d'ordre zéro. Le moment d'ordre n est défini de la façon suivante :

$$m_n = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty f^n \cdot S(f, \vartheta) df d\vartheta$$

$S(f, \vartheta)$ étant le spectre directionnel de l'état de la mer.

La période principale en énergie est définie comme $T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}$

Le flux d'énergie par unité de longueur peut être calculé comme :

$$P = \rho \cdot g \int_0^{2\pi} \int_0^\infty C_g(f, h) S(f, \vartheta) df d\vartheta$$

où ρ est la densité de l'eau.

En profondeur infinie, la vitesse de groupe est $C_g = \frac{g \cdot T}{4\pi}$

La puissance des vagues ou potentiel en énergie des vagues est alors

$$P = \frac{\rho \cdot g^2}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi\infty} \int_0^{\infty} f^{-1} S(f, \vartheta) df d\vartheta = \frac{\rho \cdot g^2}{4\pi} \cdot m^{-1}$$

Soit $P = 0.5 \cdot H_s^2 \cdot T_e$

Le potentiel est alors donné en kW/m.

Les premières données sur la houle ont été des **observations visuelles** effectuées sur des bateaux en voyage. Elles ont été collectées par des organisations météorologiques depuis le milieu des années 1850. Les observations visuelles sont réalisées suivant un protocole élaboré (World Meteorological Organisation, 1976). Elles sont effectuées régulièrement (0000, 0600, 1200, et 1800 UTC) et portent sur la hauteur et la période visuellement estimées de la mer et de la houle. Un sérieux problème des statistiques sur les vagues, basées ces relevés visuels, est le biais dû au mauvais temps. Les hauteurs, périodes et directions observées visuellement correspondent respectivement à la hauteur significative H_s , à la période significative et la direction principale de propagation de la houle. Des formules de calibration ont été proposées pour convertir les mesures visuelles de la hauteur et de la période en H_s et T_s .

L'évaluation de la précision des mesures visuelles par plusieurs auteurs (Drapp 1984, Soares 1986) a montré que les directions des vagues observées étaient bonnes, les hauteurs pouvaient être considérées comme satisfaisantes mais que les périodes étaient de moins bonne qualité.

Plusieurs atlas globaux ou régionaux basés sur des observations visuelles ont été publiés (par exemple l'atlas global de Hogden, Dacunha et Ollivier - 1986)

Les bouées ou houlographes (scalaires ou directionnelles) sont les plus largement utilisés. Les données issues de ces capteurs sont des séries temporelles de l'évolution de la surface de la mer desquelles sont disponibles, par des analyses spectrales ou temporelles, les hauteurs et périodes. Suivant les capteurs utilisés, les paramètres directionnels peuvent être mesurés. Ces données directionnelles peuvent également être obtenues par recoupement des données d'un réseau local de capteurs. La mesure des directions peut également être obtenu par des enregistrements vidéo.

Les capteurs in situ peuvent soit stoker les données, soit les émettre vers un centre sur terre via un câble, les radio communications ou un satellite.

Les capteurs de pression ou les sondes p,u,v immergés au fond peuvent être plus précis que les bouées mais leur usage est limité à des zones peu profondes (environ 20m de profondeur) à cause de l'atténuation sur la verticale de la perturbation due aux vagues, avec une échelle de l'ordre de la moitié de la longueur d'onde.

La sélection des systèmes dépend de la profondeur, de l'accès, des conditions météorologiques du site (vagues et courants), des données demandées et naturellement des conditions de mise en œuvre (prix, transports, moyens humains, logistiques et techniques...).

Plusieurs méthodes de **téledétection** sont applicables pour la mesures de l'état de la mer : utilisation de laser et radar à partir de la terre, d'avions, bateaux et satellites. Les plus utilisés sont les radars altimétriques installés à bord des satellites qui permettent d'obtenir des mesures précises de la hauteur significative des vagues et de la vitesse du vent de surface.

L'altimétrie mesure la hauteur de la mer, mais ce n'est pas la seule grandeur que l'on peut retirer des satellites altimétriques. L'une de ces grandeurs mesurées par les radars altimètres est la hauteur des vagues. Celle-ci est déduite de la façon dont l'onde radar s'est réfléchi sur la surface de la mer. En effet, l'onde réfléchi (l'écho) est captée par le radar altimètre qui l'avait émis, mais l'intensité et

les variations de celle-ci dans le temps sont différentes. Pour une mer parfaitement plate (cf. figure 3.1-1 a), on observerait une augmentation au cours du temps très brusque de l'amplitude de l'onde réfléchie, correspondant au moment où l'onde radar a touché l'eau. Mais en cas de mer plus houleuse (cf. figure 3.1-2 b), l'onde touche d'abord la crête d'une vague, puis de quelques autres, etc. : on voit ainsi une augmentation de l'amplitude de l'onde réfléchie plus progressive. Ceci permet de déduire la hauteur des vagues, car la pente de la courbe représentant l'amplitude de l'onde réfléchie en fonction du temps est proportionnelle à cette hauteur.

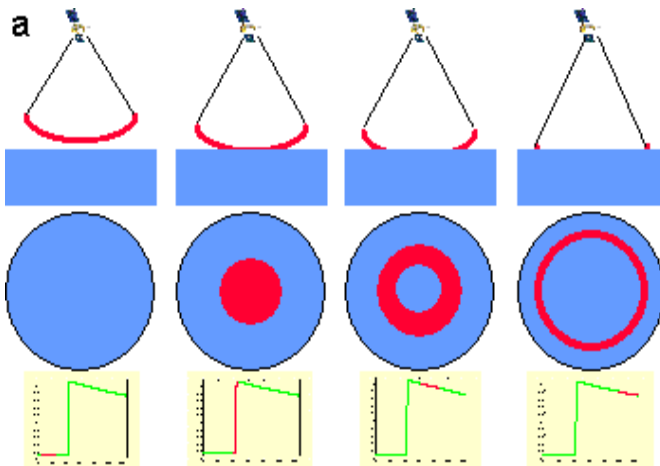


Figure 3.1-1 : Echo renvoyé par une mer idéalement plate

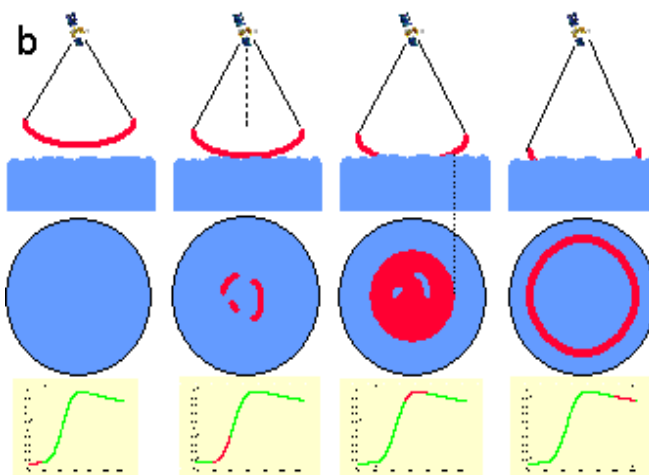


Figure 3.1-2: Echo renvoyé par une mer formée de vagues (Credits Cnes)

Après le lancement en 1985 du satellite Géosat, une série de satellites transportant des radars altimétriques ont permis d'obtenir presque en continu (un trou entre 1989 et 1991) les mesures de hauteur de vagues et de vents pour tous les océans du monde. Il y a eu les satellites de l'Agence Spatiale Européenne ERS-1 et 2 remplacés récemment par ENVISAT, et le satellite franco-américain TOPEX/Poseidon remplacé par JASON. En plus de ces radars altimétriques, certains de ces satellites possèdent un Synthetic Aperture Radar (SAR) grâce auquel un spectre directionnel de la mer peut être obtenu. Cependant l'analyse des données nécessite des calculs scientifiques complexes et doivent toujours être améliorés.

Ces satellites suivent une route orbitale précise et périodique (cf. figure 3.1-3) c'est-à-dire que le satellite reprend exactement la même trajectoire après une période de l'ordre de 10 à 40 jours. Cela limite fortement les données disponibles sur une zone spécifique. Leur enregistrement n'est pas affecté par les conditions climatologiques.

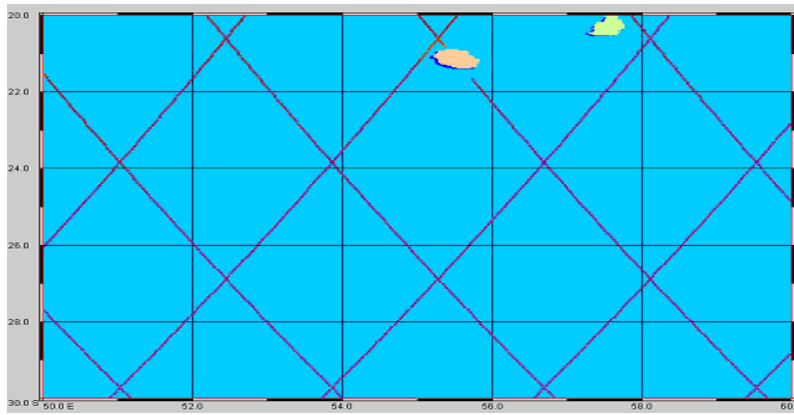


Figure 3.1-3: trace terrestre autour de La Réunion

Depuis 1986, outre les programmes internationaux d'étude des océans et du climat à l'échelle globale (Woce, WCRP, Clivar, Goos), ou ceux dédiés au phénomène El Niño (Toga), des projets de prévisions océaniques se mettent en place comme Godae, et Mercator. Tous ces programmes demandent, entre autres, des mesures altimétriques de qualité, et les combinent à d'autres données afin d'obtenir la vision la plus large possible des mécanismes en jeu.

Dans le but de prévoir l'état de la mer à quelques jours, les scientifiques ont assimilé ces données satellitaires dans des modèles de prévision océaniques ou climatiques pour créer « l'océanographie opérationnelle ». L'océanographie opérationnelle permettra demain de prédire l'état de la mer comme on prédit celui de l'atmosphère en météorologie.

Elle s'appuie sur des **modèles numériques** : les modèles vent-vagues. Ces modèles numériques intègrent l'équation de l'énergie qui exprime les variations de l'énergie des vagues sur une zone de l'océan, souvent représentée par un réseau de points, et sur un intervalle de temps. Ces modèles prennent comme entrée les champs de vents calculés par des centres météorologiques sur la zone d'étude. Ils calculent le spectre directionnel sur un maillage couvrant la zone. De tels modèles ont été améliorés au travers de trois générations de modèle, en s'appuyant sur une sophistication du modèle et des équations représentant la physique des phénomènes et sur une précision accrue des champs de vents utilisés comme entrée du modèle. En pratique, pour des études spatialement étendues, seul les deuxième et troisième générations sont considérées comme satisfaisantes. Le modèle « WAM » (groupe WAMDI, 1988) a été le premier modèle troisième génération à être implanté dans une routine d'un centre météorologique, le « European Centre for Medium-Range Weather Forecasts » (ECMWF). Le modèle WAM est maintenant largement implanté dans les centres météorologiques dans le monde.

La plupart des erreurs dans l'estimation des vagues grâce aux modèles vent-vagues proviennent des erreurs au niveau de l'entrée des champs de vent. Sur une étude réalisée par Pontes & al (1996) dans le nord-est de l'atlantique, le modèle WAM a surestimé, en moyenne, la hauteur de vague de moins de 20cm (moins de 10% de la valeur moyenne), la période principale a été également surestimé de moins de 5%! Depuis 1994, date des mesures, la précision a augmenté de façon significative.

Les modèles vent-vagues peuvent être utilisés sur trois modes. Les prévisions sont obtenues en utilisant les champs de vents prévus. La prévision peut aller jusqu'à dix jours en pleine mer mais cette période peut très vite décroître en fonction des zones.

Ensuite, le modèle tourne en utilisant les vents analysés et comparés aux mesures.

Le troisième mode est le calcul après coup, c'est-à-dire estimer les conditions de vagues en ayant les conditions climatologiques de la période. Cela a été réalisé pour de nombreuses zones et périodes.

Ces calculs nommés « réanalyses » ont été effectués par le centre européen sous le nom ERA-15 et ERA40.

Afin de connaître les effets de la bathymétrie sur la propagation des vagues, de nombreux modèles sont développés par les universités et les bureaux d'études. Certains se basent sur la méthode de « tracé de rayons » et permettent d'appréhender les phénomènes de réfraction, d'autres se basent sur des descriptions plus mathématiques de l'évolution des vagues et permettent une connaissance des pertes d'énergies et des effets de réfraction réflexion.

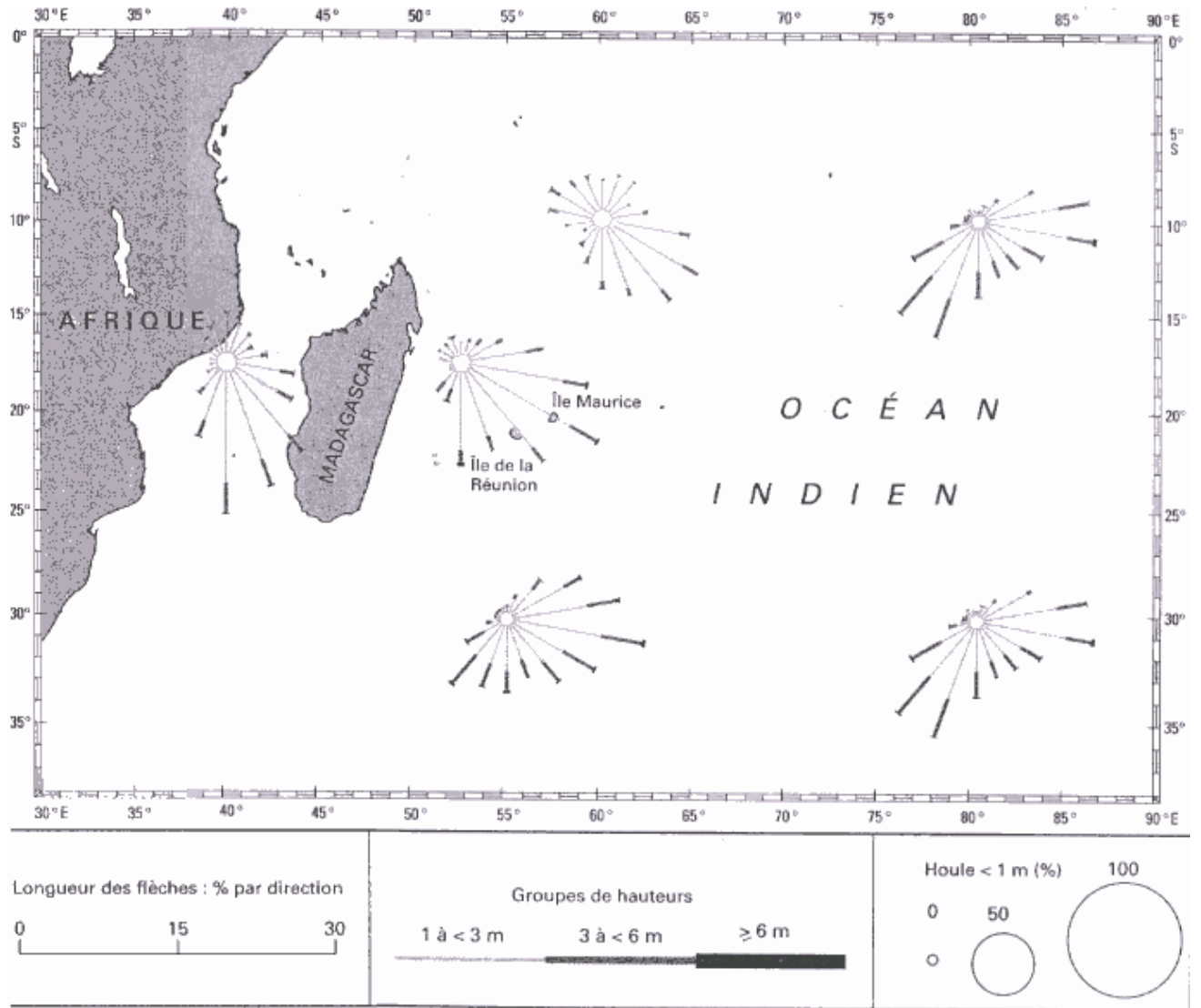
3.2 Etude de la ressource réunionnaise : réalisation d'un atlas du potentiel

Une méthodologie générale pour évaluer et caractériser la ressource en énergie des vagues a été développée par l'Union Européenne (Pontes & al, 1993). Cette méthodologie, que nous avons globalement suivie, est à deux niveaux : elle distingue l'étude de la ressource en pleine mer (offshore) et celle de la ressource côtière.

3.2.1 Etude de la ressource offshore

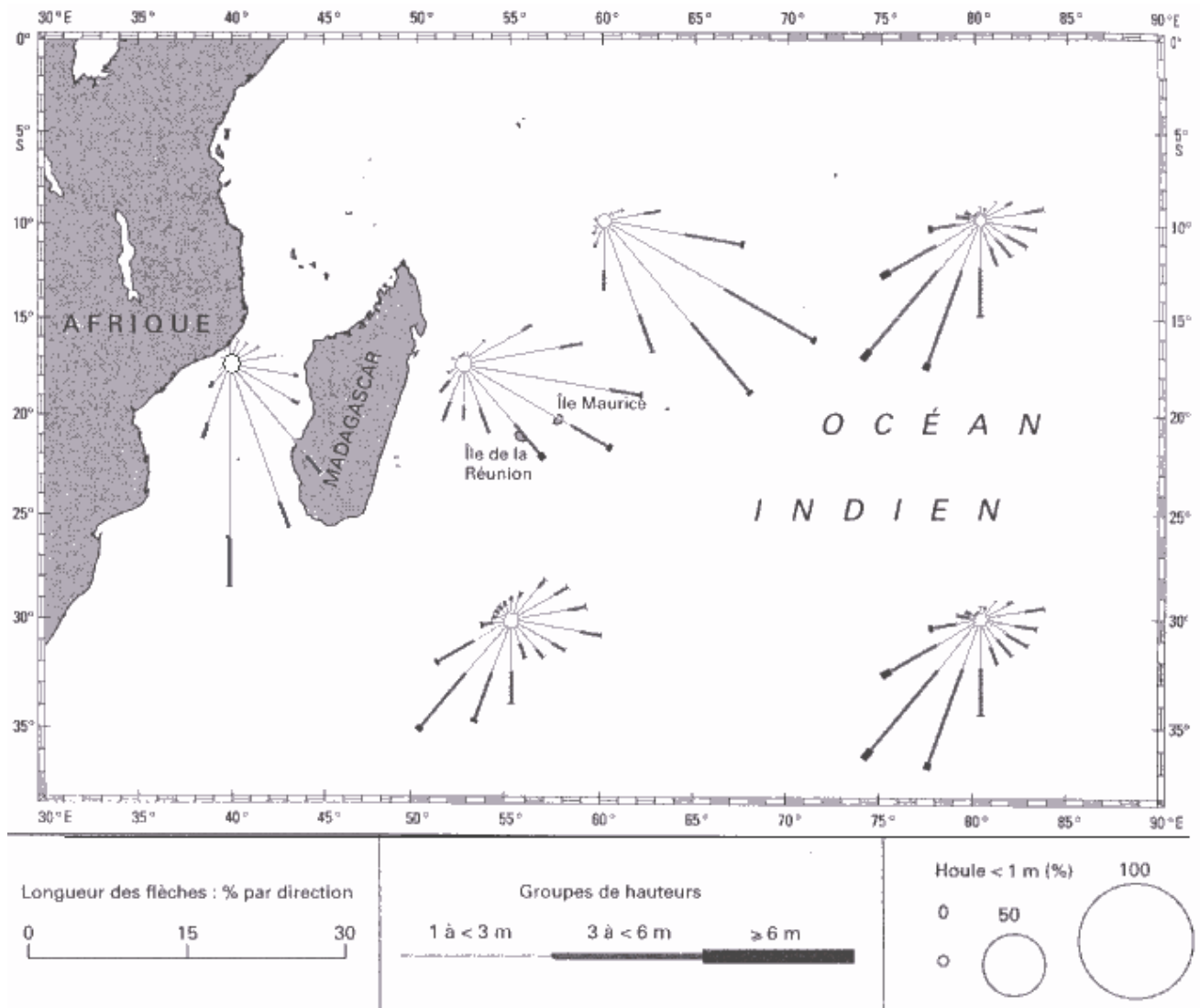
La Réunion, de même que la zone sud ouest de l'Océan Indien n'a jamais été réellement étudiée du point de vue de l'océanographie physique. Aucune étude précise ne permettait d'avoir des informations suffisantes pour une analyse de la ressource. Seule une description globale de la zone a été effectuée par le SHOM et MétéoFrance.

Les roses des houles pour les mois de février et août dans la zone sud ouest de l'océan indien sont représentées sur les figures 3.2-1 et 3.2-2.



Roses des houles dans la partie Sud de l'Océan Indien. Mois de février.

Figure 3.2-1: rose des houles OI Février



Roses des houles dans la partie Sud de l'Océan Indien. Mois d'août.

Figure 3.2-2: rose des houles OI Août

Entre autres données, celles-ci nous permettent de déterminer le système global de houle présent dans la zone océanique de La Réunion. Celui-ci 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 sud-est. Elles affectent principalement les côtes Nord, Est et Sud de l'île en épargnant en général la côte Ouest sous le vent.
- 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. Ces phénomènes, houles cycloniques et cyclones, feront l'objet d'un chapitre spécifique.
- Les houles australes
Ces houles de grandes longueur d'onde, modérées à fortes, se forment loin au 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 que les côtes Ouest et Sud de l'île.

L'objectif de l'étude de la ressource offshore a été de définir précisément l'état de la mer dans une zone autour de l'île de La Réunion.

Seuls les modèles numériques vent-vagues calibrés avec les mesures satellitaires permettent d'obtenir des données suffisamment précises sur des zones aussi étendues.

Les premiers contacts ont été établis avec le centre européen ECMWF, source initiale des données et des « réanalyses ». Ils ont permis de définir une **zone d'étude** en adéquation avec le maillage du modèle. Les points de calcul du modèle correspondent aux nœuds du maillage rouge de la figure 3.2-3.

La zone d'étude s'étend donc de 13.5°S à 27°S en latitude et de 46.5°E à 60°E en longitude avec un pas de maillage de 1,5°. Le nombre de points est donc de 100, numéroté de 1 à 100 en commençant par le point le plus au Nord-ouest et en privilégiant la direction Ouest-Est à Nord-sud. (cf. numérotation sur la carte 3.2-3)

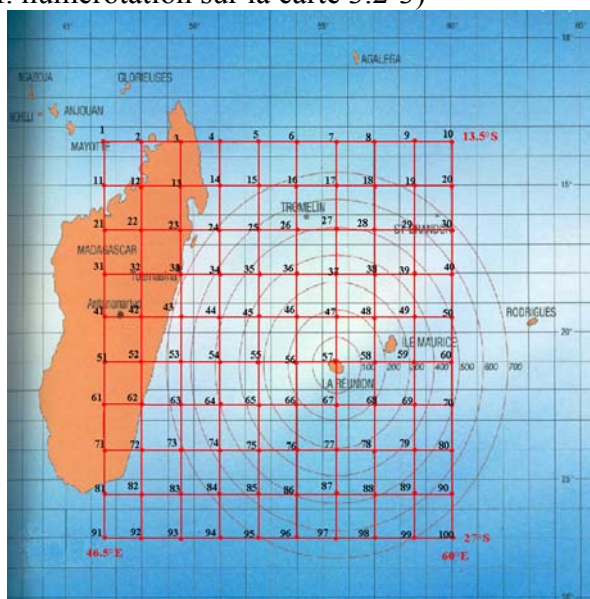


Figure 3.2-3: zone de l'étude offshore

Dans le cadre d'un partenariat avec MétéoFrance, l'extraction des données a finalement été demandée au centre MétéoFrance de Toulouse, qui est en relation directe avec le centre européen CEP.

L'étude a porté sur les caractéristiques suivantes :

- ✓ hauteur significative des vagues de la mer du vent et de la houle (SWH)
- ✓ direction moyenne des vagues (MWD)
- ✓ période moyenne des vagues (MWP)
- ✓ hauteur significative des vagues de la mer du vent (SHWW)
- ✓ direction des vagues de la mer du vent (MDWW)
- ✓ période moyenne des vagues de la mer du vent (MPWW)
- ✓ hauteur significative de la houle primaire (SHPS)
- ✓ direction de la houle primaire (MDPS)
- ✓ période moyenne de la houle primaire (MPPS)
- ✓ hauteur significative de la houle secondaire (SHSS)
- ✓ vitesse du vent à 10 m (FF 10m)

Les paramètres direction de la houle secondaire (MDSS), période moyenne de la houle secondaire (MPSS) et direction du vent à 10 m (DD 10m) n'étaient pas disponibles.

Les séries de données débutent le 1 janvier 1992 et finissent le 31 décembre 2001 soit dix années de données.

Leur étude, dans le cadre de l'étude du potentiel en énergie des vagues sur La Réunion, n'a porté que sur les points 46, 47, 48, 56, 58, 66, 67 et 68 au plus proche de l'île.

Les calculs statistiques ont essentiellement porté sur le champ global de vagues, c'est-à-dire les paramètres SWH, MWD et MWP, et ont eu comme objectif, pour chaque point :

- ✓ de définir les valeurs moyennes *
- ✓ de définir le potentiel moyen*
- ✓ de définir les valeurs moyennes mensuelles *
- ✓ de définir le potentiel moyen mensuel afin de connaître les variabilité saisonnière de la ressource *
- ✓ la fréquence d'occurrence de Hs*
- ✓ la fréquence d'occurrence de Ts*
- ✓ de définir la rose de vagues *
- ✓ de définir la fréquence d'occurrence du couple (Hs,Ts), en pourcentage et en potentiel **
- ✓ de définir la fréquence d'occurrence du couple (Direction, Potentiel) en pourcentage et en potentiel ***

* : cf. feuille de calcul excel *stat*

** : cf. feuille de calcul excel (*H,T*)

*** : cf. feuille de calcul excel (*Dir,Pot*)

Suivent ci-dessous les résultats pour le point 67 situé directement au sud de La Réunion et qui semble avoir l'état de mer le plus proche de celui de La Réunion.

Valeurs moyennes :

H1/3	direction	T1/3	H1/3 vagues de vent	direction de vagues de vent	Période de vagues de vent	H1/3 houle primaire	direction houle primaire	période houle primaire
2,29	159,99	9,83	0,60	114,81	3,60	2,15	165,79	10,30

Potentiels moyens :

Potentiels:	Champ global	houle principale	vagues de vents
total	25,9	23,8	0,65

Potentiels moyens mensuels :

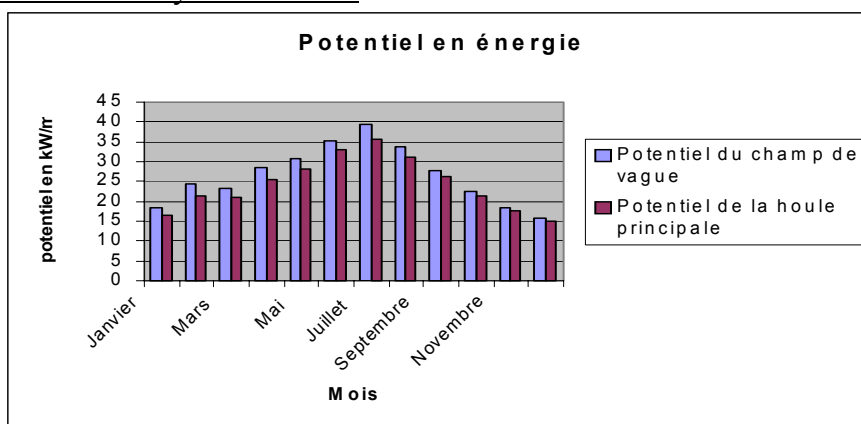


Figure 3.2-4 : potentiel moyen mensuel – point 67

Fréquence d'occurrence de Hs et Ts :

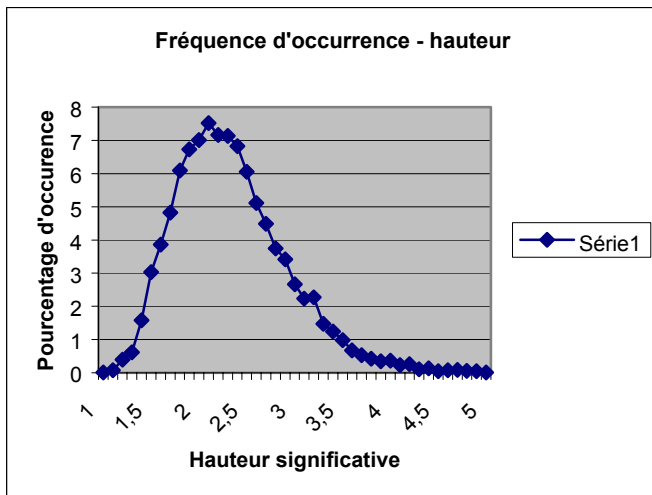


Figure 3.2-5 : fréquence d'occurrence de Hs

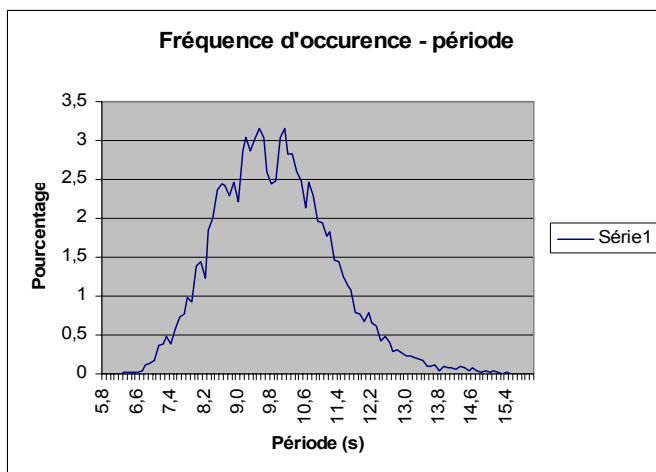


Figure 3.2-6 : fréquence d'occurrence de Ts

Rose des vagues :

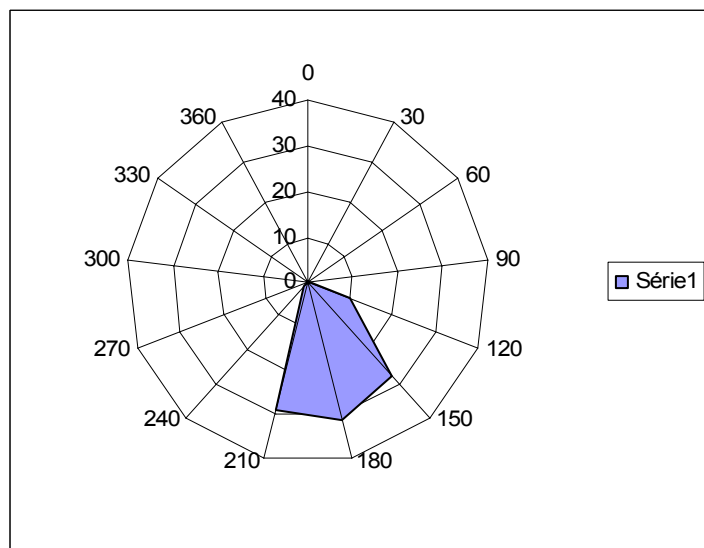


Figure 3.2-7 : Rose des vagues – point 67

Fréquence d'occurrence énergétique du couple (Hs,Ts):

Les graphiques ont comme axes la hauteur significative et la période significative. Pour chacun des couples est donné le potentiel du couple multiplié par sa fréquence d'occurrence.

Le couple principal est (2,10.5) mais le couple (2.25, 11) présente également une forte occurrence.

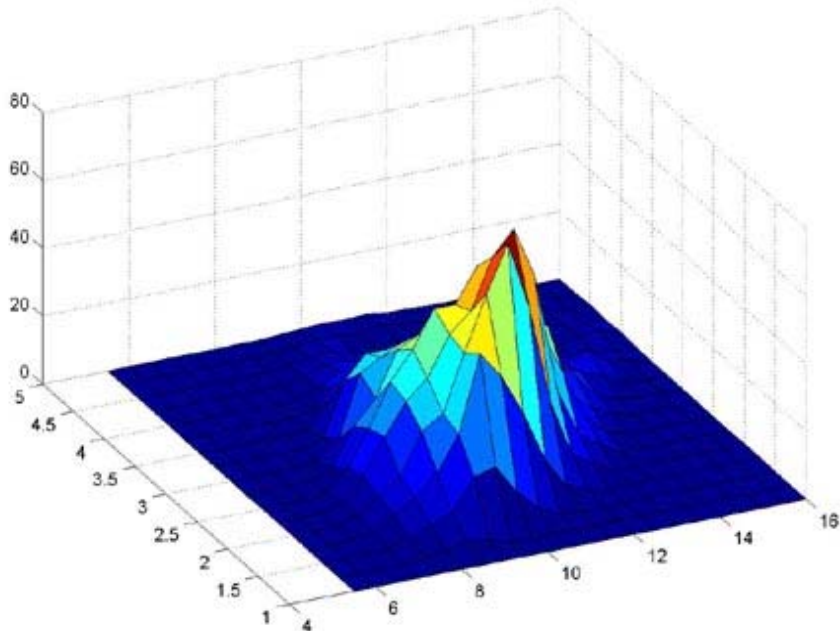


Figure 3.2-8 : fréquence d'occurrence énergétique de (Hs, Ts) - point 67

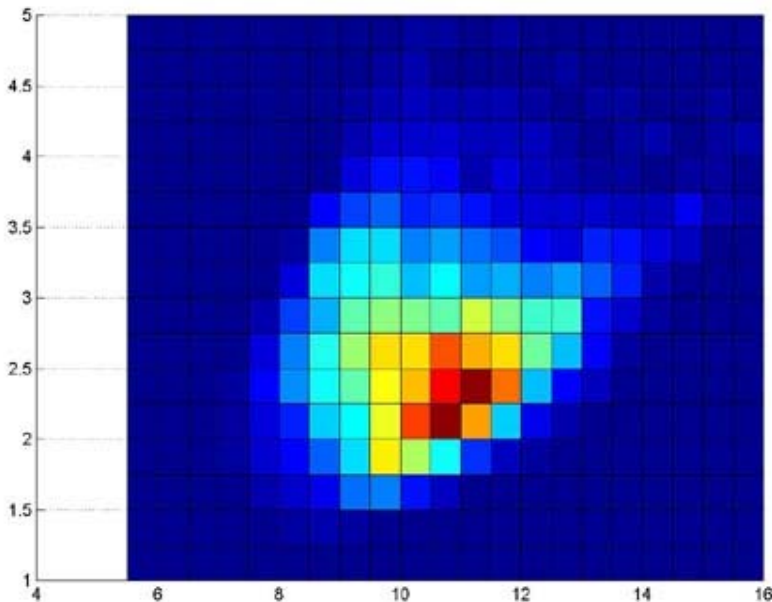


Figure 3.2-9 : fréquence d'occurrence énergétique de (Hs, Ts) - point 67

	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
1	0	0	0	0	0,0513	0,0547	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,25	0	0	0	0	0,3849	1,5739	2,8357	2,2326	0,0813	0	0	0	0	0	0	0
1,5	0	0	0	0,4311	2,5405	4,9271	7,4163	16,5366	18,2355	9,5463	3,7723	0,4517	0	0	0	0
1,75	0	0	0,2335	1,2574	5,5687	8,8141	15,0654	25,2207	47,5553	39,5196	27,6637	12,5145	3,443	1,2934	0	0
2	0	0	0,2669	2,1077	6,7748	11,1681	23,3833	27,0992	43,8171	59,9466	73,4346	53,295	23,9239	7,3907	3,4216	0
2,25	0	0	0,1001	2,0478	8,661	18,9694	27,8767	33,5352	45,3449	50,6569	65,3151	72,4902	57,016	22,172	8,276	3,603
2,5	0	0	0	0,3593	6,8005	17,2449	29,5199	38,0312	48,5954	48,5869	58,5609	51,7519	48,5954	35,5163	22,2405	8,4514
2,75	0	0	0	0	2,964	13,7001	20,7948	33,7046	36,8285	36,3204	33,9869	41,8155	35,7088	31,8415	31,9921	10,0305
3	0	0	0	0	0,6159	5,9125	24,2558	27,715	30,815	22,3773	27,3763	19,6469	21,7204	18,2303	20,273	15,4794
3,25	0	0	0	0	0,1668	2,1351	17,7701	24,6202	24,509	18,2372	19,6161	16,3912	14,3229	9,0741	6,3941	10,9868
3,5	0	0	0	0	0	0,1916	8,1434	12,7181	15,7001	10,5386	12,5744	9,2212	5,7842	5,1735	5,6884	5,2932
3,75	0	0	0	0	0	0	1,0906	6,4668	9,9954	10,0082	8,8919	3,1051	6,1974	3,6953	2,5662	1,3444
4	0	0	0	0	0	0	0,2327	2,7099	5,7209	4,9271	4,5986	3,9143	4,407	3,6132	1,3686	1,0675
4,25	0	0	0	0	0	0	0	1,5705	3,3155	4,0717	2,443	2,5594	3,0102	1,396	0,7271	1,5124
4,5	0	0	0	0	0	0	0	0,5543	1,7553	2,4636	0,3233	0,6775	1,0624	0,3695	1,5397	0,8007
4,75	0	0	0	0	0	0	0	0,2925	0,6176	1,9503	1,3652	1,0727	2,2429	0,7801	0,8126	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3251	0,6843	1,0778	0,7528	1,1805	0,4106	0,4277	0

Figure 3.2-10: fréquence d'occurrence énergétique de (Hs, Ts) - point 67

Fréquence d'occurrence du couple (Direction, Potentiel) en potentiel :

Les graphiques ont comme axes la direction et le potentiel. Pour chaque point, il est donné sa fréquence d'occurrence multipliée par son potentiel.

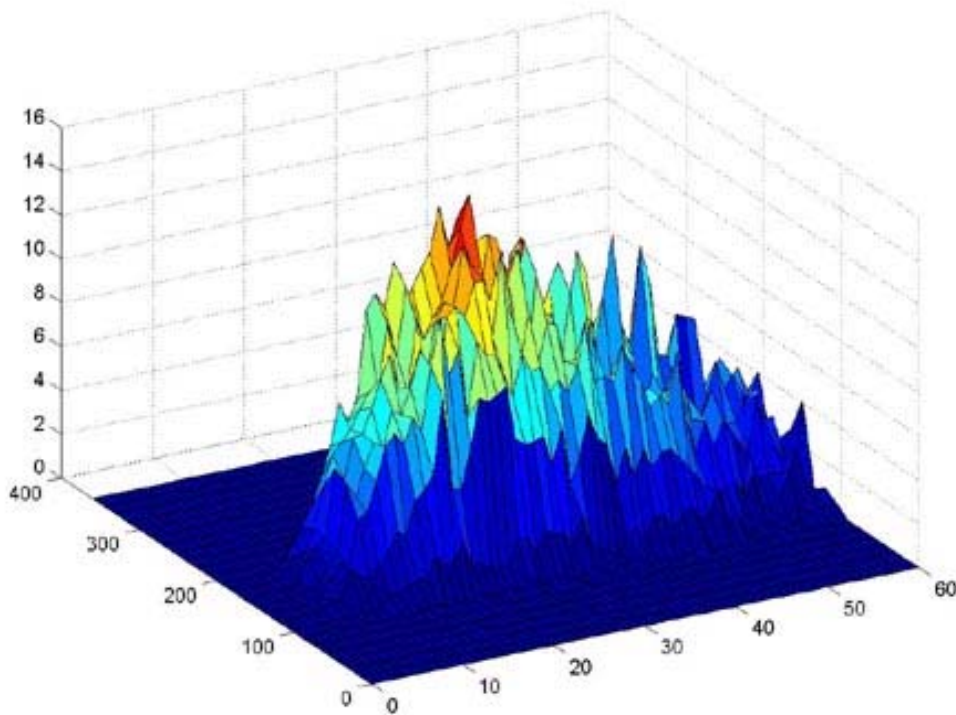


Figure 3.2-11 : fréquence d'occurrence énergétique de (direction, potentiel) - point 67

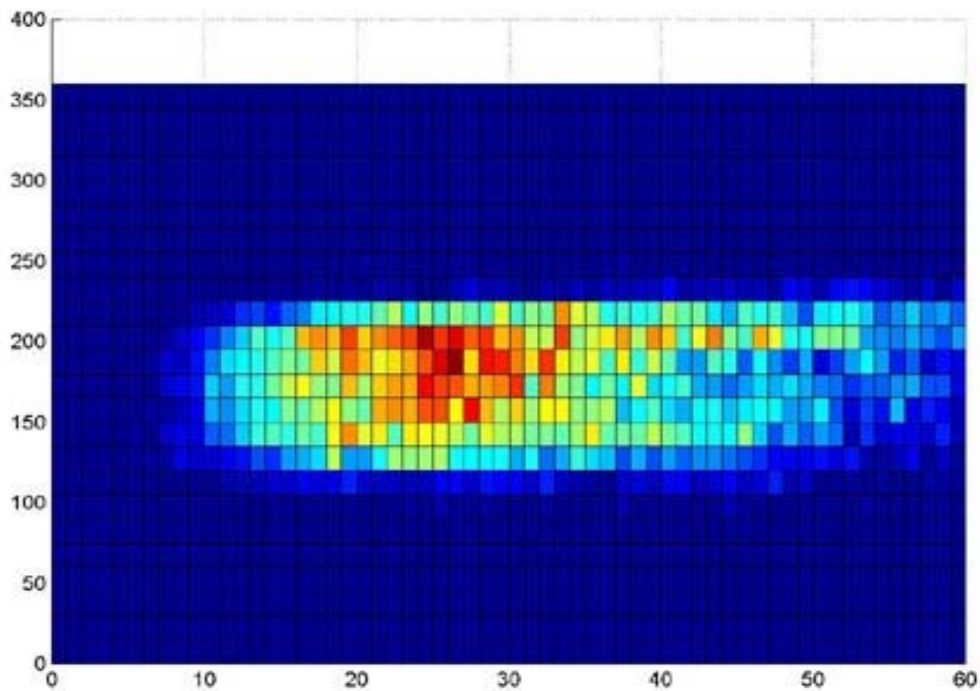


Figure 3.2-12 : fréquence d'occurrence énergétique de (direction, potentiel) - point 67

21	22	23	24	25	26	27	28
0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0,1848	0
45	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0,1711	0	0	0
90	0,1506	0,3148	0	0,5132	0,1779	0	0,3832
105	0,9033	0,787	0,8212	1,8819	1,9572	1,1086	2,1077
120	8,2803	8,0271	8,2119	8,554	6,0494	5,7278	5,7483
135	7,0759	10,388	9,69	9,5805	8,7183	7,5754	9,3889
150	11,743	11,175	12,6463	12,66	9,9637	13,8575	10,9218
165	11,5924	11,3324	13,9602	13,0021	12,8105	11,2708	11,4966
180	10,5386	11,175	12,6463	14,3708	15,8352	10,5317	13,7959
195	12,4957	13,0637	15,1098	13,1732	14,4118	12,5642	13,2211
210	8,4308	6,1384	8,0476	6,8432	8,0066	7,3907	6,898
225	0,3011	0,3148	0,1642	0	0,7117	1,4781	0,5748
240	0	0	0,1642	0,1711	0	0	0
255	0,1506	0	0	0	0	0	0
270	0	0,1574	0	0	0	0	0
285	0	0	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0	0	0
315	0	0	0	0	0	0	0
330	0	0	0	0	0	0	0
345	0	0	0	0	0	0	0
360	0	0	0	0	0	0,1848	0
	71,6623	72,8736	81,4617	80,9211	78,6423	71,8744	74,5363

Figure 3.2-13: fréquence d'occurrence énergétique de (direction, potentiel) - point 67

Le secteur directionnel le plus énergétique est le secteur 180° à 195°. Le potentiel le plus représenté est 24kW/m.

Les résultats obtenus pour tous les points de l'étude sont récapitulés dans le tableau suivant :

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

Figure 3.2-14

Par extrapolation des résultats obtenus pour le point 67 (21°S/55.5°E) au large des côtes réunionnaises, nous pouvons conclure que le potentiel en énergie des vagues est d'environ **25KW/m**. Les houles les plus énergétiques et les plus représentées ont des caractéristiques (hauteur, période) situées entre (2,10.5) et (2.25, 11). Le secteur directionnel le plus énergétique étant le secteur Sud/Sud-Ouest entre 180° et 195°.

3.2.2 Etude la ressource côtière (onshore)

Il est important de noter que, comme nous l'avons vu dans le chapitre sur l'océanographie, la perte d'énergie des vagues est surtout liée au phénomène de friction lorsque la vague se propage en profondeur d'eau faible. Celle-ci peut alors perdre près de la moitié de son énergie.

Cependant la différence de puissance des vagues entre le large et la côte est faible lorsque le fond est relativement lisse et que les eaux profondes sont proches de la côte, ce qui est le cas de la plupart des îles volcaniques comme La Réunion.

Néanmoins, l'étude de la ressource onshore reste importante pour l'implantation de centrales onshores.

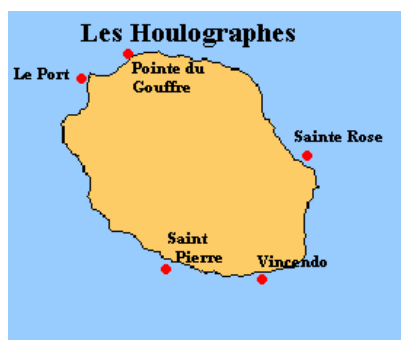


Figure 3.2-15: positionnement des houlographes

Sur l'île de La Réunion, la DDE et certaines communes ont installé des houlographes.

Ils sont situés à :

- ✓ Sainte Rose
- ✓ Saint Vincenzo
- ✓ Saint Pierre
- ✓ La Pointe du gouffre
- ✓ Le Port

à des profondeurs de **25 mètres** environ.

Le matériel utilisé est un houlographe à accéléromètre type « DATAWELL ». La réception s'effectue sur « DIWAR ».

Les paramètres enregistrés sont :

- ✓ Dates et heures
- ✓ Durée de l'enregistrement
- ✓ Hauteur et période max
- ✓ $H_{1/3}$ et $T_{1/3}$
- ✓ $H_{1/10}$ et $T_{1/10}$
- ✓ Hauteur et période moyenne
- ✓ Nombre de vague enregistrée

Pour rappel, $H_{1/3}$ et $T_{1/3}$ (resp. $H_{1/10}$ et $T_{1/10}$) sont respectivement la hauteur et la période moyennes du tiers (du dixième) des plus hautes vagues d'un groupe de vagues considéré.

Les cadences d'enregistrements sur PC sont :

- ✓ 17 minutes toutes les 3heures lorsque $H_{1/3} \leq 3m$
- ✓ 17 minutes toutes les heures lorsque $H_{1/3} > 3m$

On obtient pour chaque mois les données numériques et les graphes de $H_{1/3}$ et $T_{1/3}$ suivants :

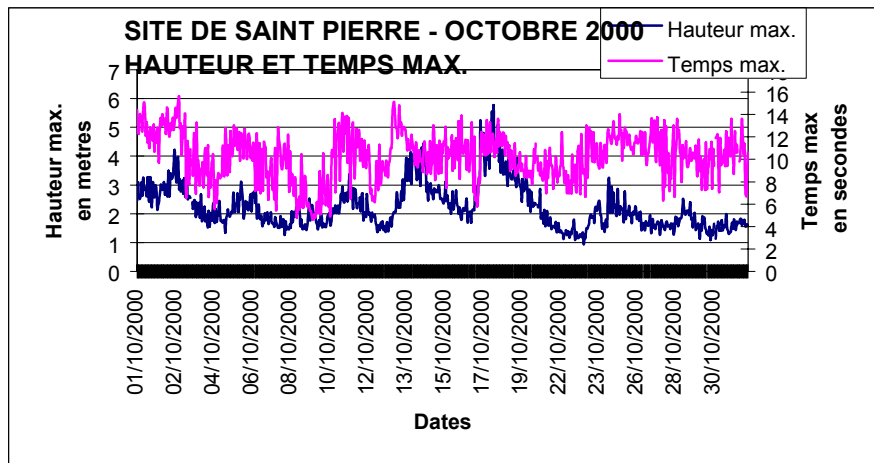


Figure 3.2-16

La moyenne des données mensuelles et sur les années disponible permet d'extraire le potentiel de chaque site.

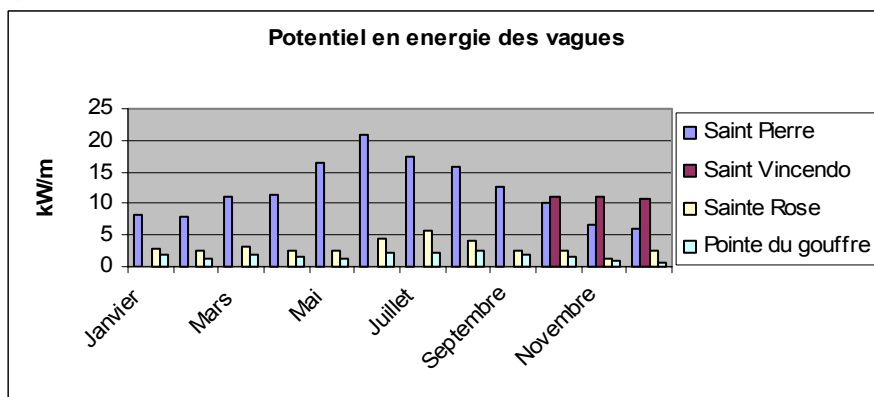


Figure 3.2-17: potentiels onshore

On remarque très nettement les variations saisonnières de la puissance de la houle. Celle-ci allant, par exemple, de 21kW/m en Juin à 6kW/m en décembre pour le site de Saint Pierre.

Soit un potentiel annuel en kW/m de:

Saint Pierre	12,0848802
Saint Vincendo	17,4702542
Sainte Rose	3,05299644
Pointe du gouffre	1,65628656

Le potentiel du site de Saint Vincendo a été calculé par proportionnalité avec celui de Saint Pierre. En effet les données disponibles sur ce site ne portent que sur les mois de Octobre à Décembre 2002 et ne permettent donc pas le calcul direct du potentiel sur une année.

Le potentiel du site du Port est inférieur à celui de la pointe du Gouffre, c'est-à-dire négligeable.

Afin de connaître plus précisément le potentiel en énergie des vagues sur toutes les côtes réunionnaises, il semble adéquat, d'un point de vue méthodologique, de s'appuyer sur les outils de modélisation numérique de la propagation des vagues en eau peu profonde.

La méthode développée divise la côte réunionnaise en 8 entités définies par une orientation azimutale.

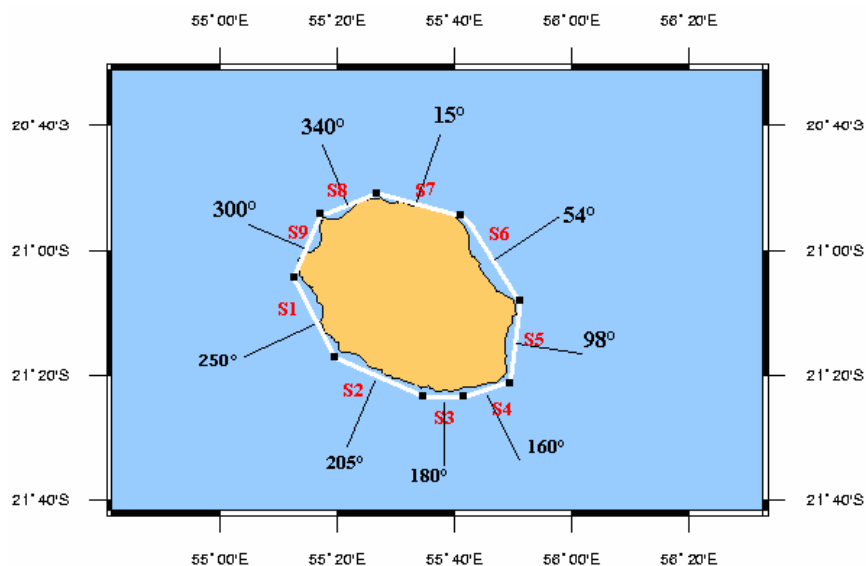


Figure 3.2-18: Zones de l'étude onshore

Segment	Description	Longueur	Azimet d'exposition
S1	De Pointe des Aigrettes Saint Gilles à Pointe de l'Etang Salé	22.4km	250°
S2	Pointe de l'Etang Salé à Piton Grand Anse	22.2km	205°
S3	Piton Grande Anse à Pointe Marcelin	9.4 km	180°
S4	Pointe Marcelin à Pointe de la Table	13 km	160°
S5	Pointe de la Table à Pointe de Bellevue	19.5km	98°
S6	Pointe de Bellevue à Bois Rouge	26.5 km	54°
S7	Bois Rouge à Barachois, Saint Denis	19 km	15°
S8	Barachois à la Pointe des Galets	15 km	340°

S9	Pointe des Galets à Pointe des Aigrettes	14.3 km	300°
----	--	---------	------

Description	Longitude	Latitude
Pointe des Aigrettes, Saint Gilles	55°13.1'E	21°02.2'S
Pointe de l'Etang Salé	55°20'E	21°16.2'S
Piton Grand Anse	55°32.9'E	21°22.4'S
Pointe Marcellin	55°40.2'E	21°23'S
Pointe de la Table	55°48.5'E	21°19.9'S
Pointe de Bellevue	55°49.5'E	21°8.6'S
Pointe de Bois Rouge	55°39'E	21°55'S
Pointe des Jardins/Barachois, Saint Denis	55°26.9'E	21°52.3'S
Pointe des Galets	55°17.3'E	21°55.2'S

Dans cette méthodologie, les phénomènes de réfraction et diffraction sont considérés, par approximation et à grande échelle, comme uniformes le long d'un segment. A un segment correspond donc globalement un potentiel en énergie des vagues et celui-ci peut être considéré comme constant le long de ce segment.

Le choix du nombre de segments est arbitraire mais repose néanmoins sur des considérations géographiques et pratiques. Le nombre de segments doit être suffisant pour que ceux ci « collent » au maximum aux côtes réunionnaises et aient une réalité face au phénomène étudié mais ne doit pas être trop important et augmenter sans raison les temps de manipulation et de calcul.

Le cahier des charges de l'appel d'offre des simulations numériques de la propagation des houles offshore sur ces segments est fourni en annexe 1.

Ces simulations devront permettre de déterminer les segments les plus favorables énergétiquement. Elles nous permettront d'appréhender, à une échelle locale c'est-à-dire sur un segment, les phénomènes de réfraction et diffraction de la houle représentative, résultat de l'étude offshore. Suivant la finesse des simulations, elles nous permettront également de déterminer un ou plusieurs sites très favorables de part leur position géographique (orientation azimutale) et la bathymétrie de leurs fonds (fonds convexes). Les phénomènes créant ces sites à fort potentiel sont expliqués ci-après.

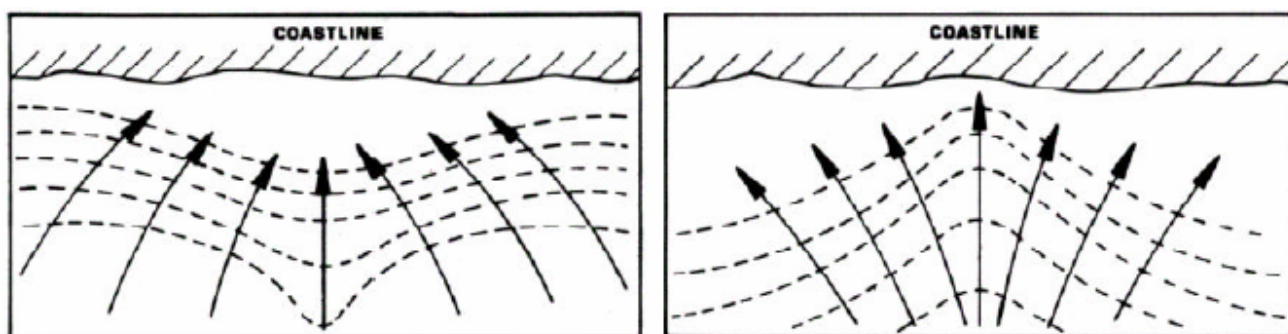
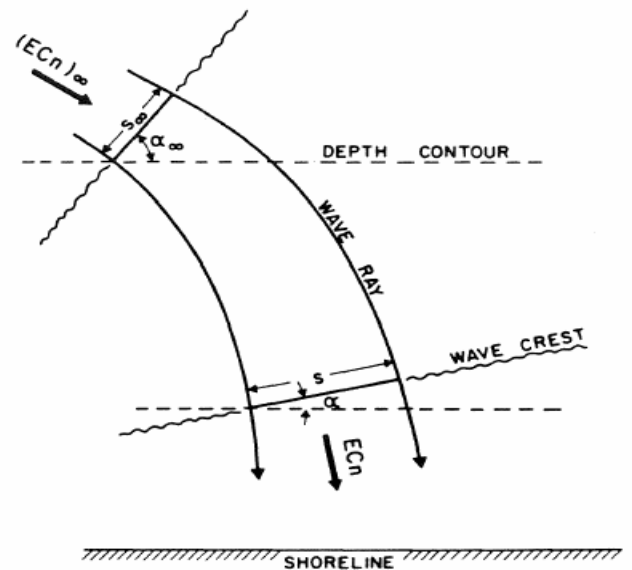
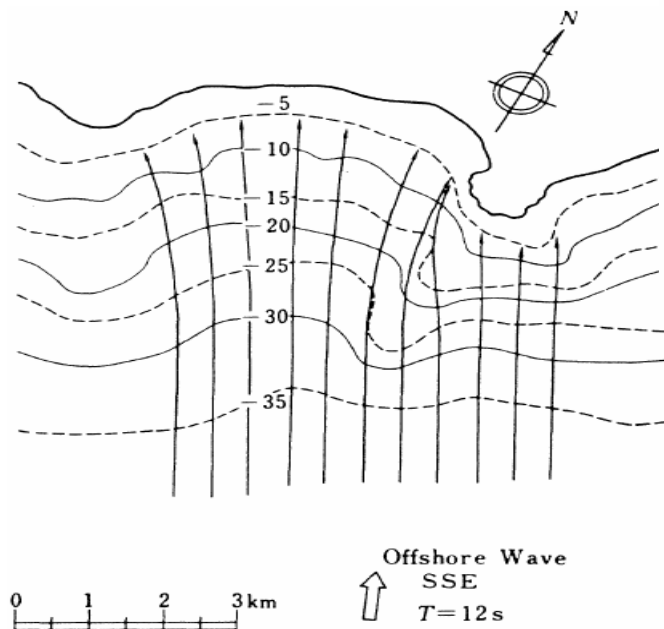


Figure 3.2-19

Cn représente la vitesse de transfert de l'énergie. E est l'énergie de la houle. Le flux d'énergie $E.Cn$ est toujours conservé entre deux rayons de houle. Lorsque la réfraction étale les rayons de houle, comme sur la figure ci-contre, le flux d'énergie par unité de largeur diminue.



A contrario, si le phénomène de réfraction fait converger les rayons, le flux d'énergie augmente. Ils existent donc naturellement des sites à fort potentiel énergétique.

Sur la figure ci-contre, les rayons s'étalent sur la baie mais convergent à l'ouest de la pointe rocheuse.

3.2.3 Pose de houlographes

Une fois les sites à fort potentiel déterminés grâce à l'étude précise de la réfraction, l'étape suivante est la pose de houlographes sur ces sites.

Ce houlographe devra, suivant la profondeur locale, être directionnel ou non et nous permettra de connaître exactement l'état de la mer sur une année de mesure.

Les spectres directionnels moyens de la mer et leurs probabilités d'occurrence seront disponibles tout au long de la campagne de mesure. Ils permettront aux développeurs d'estimer, de façon réaliste, la production de leur usine houlomotrice.

Ce houlographe permettra aussi d'avoir une idée des vagues extrêmes pouvant arriver sur le site. Cependant une étude plus précise de ces vagues extrêmes doit être faite car, d'une part, il est parfois reproché au houlographe de « rater » les vagues extrêmes en « glissant » dessus et, d'autre part, les vagues extrêmes ont des périodes d'occurrence bien plus grande que l'année.

L'installation des bouées sur le Domaine Public Maritime est soumise à une Autorisation d'Occupation Temporaire délivrée par le Service Exploitation et Gestion de la DDE.

3.2.4 Etude des vagues extrêmes et des épisodes cycloniques

A La Réunion, les vagues extrêmes sont associées aux houles cycloniques et donc aux épisodes cycloniques.

La connaissance des cyclones dans l'Océan Indien s'est considérablement améliorée depuis l'utilisation des satellites Meteosat (satellite géostationnaire européen) et les différents NOAA (satellites à défilement américains).

Le cyclone tropical est une perturbation atmosphérique associée à une dépression très creuse, générant des vents tourbillonnaires violents dépassant le seuil des 117km/h (force 12) en vitesse moyenne sur 10 minutes près du centre. Les dépressions se forment durant l'été dans la Zone de Convergences Intertropicale siège de conflit entre l'alizé austral de sud-est et l'alizé boréal de nord-est, généralement entre le 10^{ème} et le 20^{ème} parallèle.

Les cyclones s'accompagnent généralement de pluies diluviennes et d'une très forte houle dite cyclonique. Leur déplacement peut être très rapide (de 700 à 1000km/h).

Plus on se rapproche de l'œil du cyclone, plus les vents et les précipitations se renforcent, atteignant des conditions paroxysmiques au niveau du « mur de l'œil » : le gradient de pression y est maximal et les rafales de vent peuvent dépasser les 300km/h. La masse nuageuse associée au phénomène, à un diamètre, en général de quelques centaines de kilomètres mais peut atteindre dans certains cas, 1000 voir 1500km. L'œil à un diamètre variant, en moyenne, de 20 à 50km.

Les trajectoires

Dans le sud-ouest de l'Océan Indien, les trajectoires sont souvent « chaotiques ». Trois types de trajectoires sont relativement classiques : type parabolique (Albertine), débutant généralement au nord-est de la réunion pour finir vers le sud-est, type zonal est-ouest (Bonita), type méridien nord-sud (Bellamine). Les trajectoires peuvent être beaucoup plus surprenantes (Hyacinthe très chaotique ou Odile avec des remontées vers le Nord)

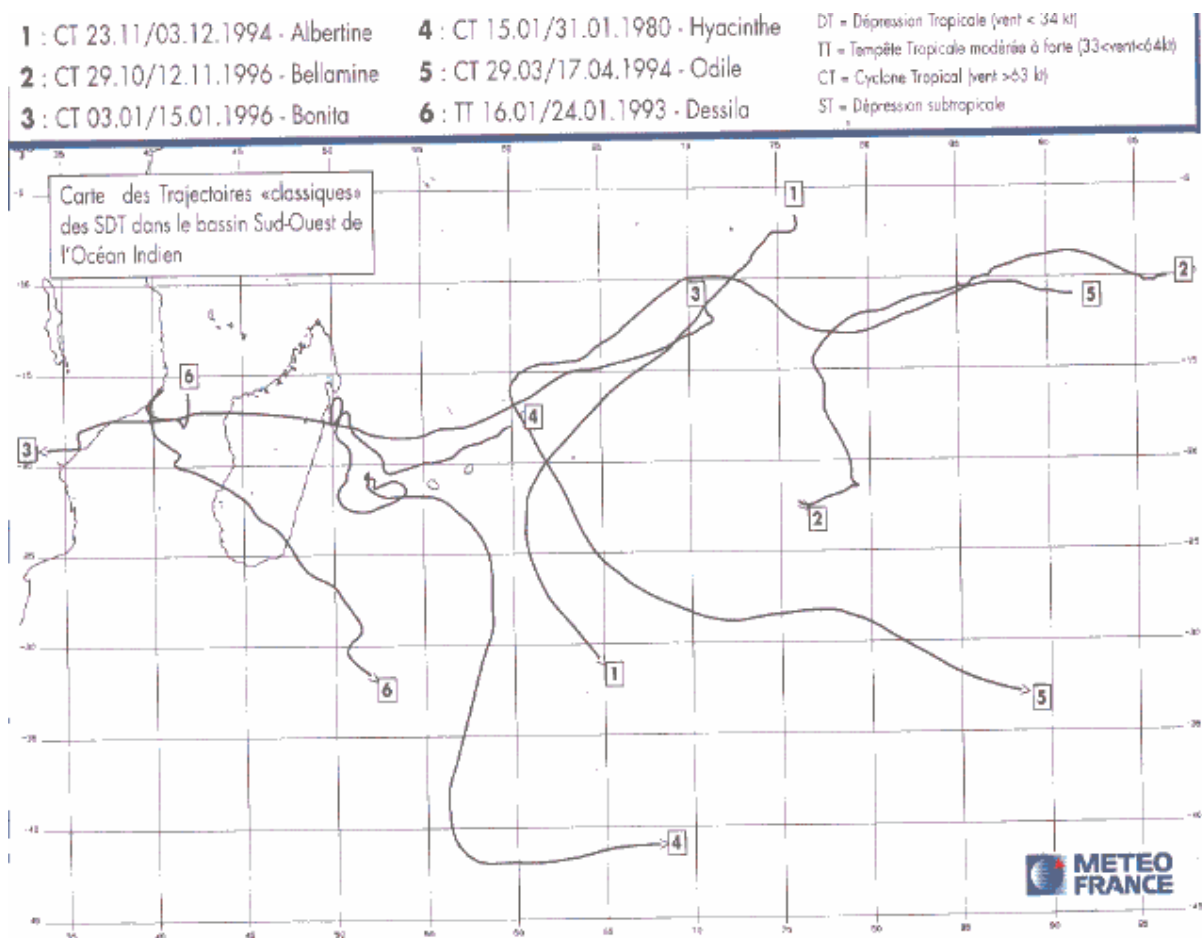


Figure 3.2-20

Les phénomènes associés

Un cyclone met en jeu une énergie considérable qui peut égaler 5 fois la puissance de la bombe d'hiroshima par seconde. Les trois dangers majeurs cycloniques sont liés à l'action du vent, de la pluie, et de la mer (houle cyclonique et marée de tempête).

Le vent et les précipitations

La force du vent et les changements brutaux de direction peuvent occasionner des dégâts considérables. Son pouvoir destructeur est proportionnel au carré de sa vitesse. Au centre du cyclone, dans l'œil, les vents sont faibles. Dès que l'œil passe, les vents redeviennent aussi violents qu'auparavant mais soufflent alors dans le sens contraire.

Les précipitations sont très variables suivant les cyclones (cyclones à « vents » ou à « pluie »).

La houle cyclonique

Au cœur du cyclone, les vents très forts génèrent par frottement des vagues de grandes amplitudes. Cette houle qui peut atteindre une dizaine de mètres (maximum de 25 à 30m), se déplace généralement plus rapidement que le cyclone qui l'a engendrée. Elle est donc un signe précurseur de la dépression.

A La Réunion, cette houle cyclonique touche généralement le Nord-est de l'île, à l'inverse des houles polaires formée par les profondes dépressions du sud, qui frappent le sud-ouest.

La marée de tempête

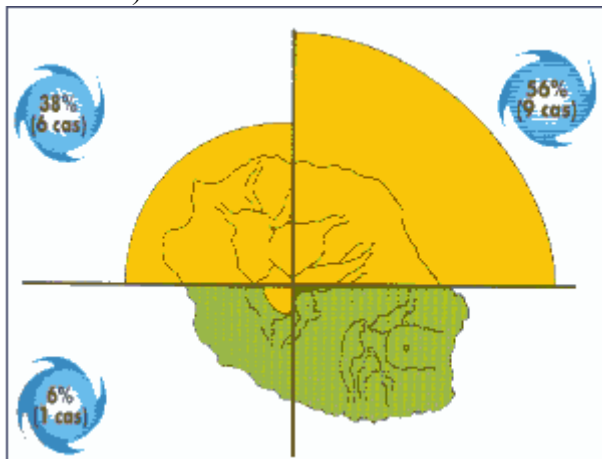
Il s'agit d'une élévation anormale et brutale du niveau moyen de la mer associée au passage du cyclone. En effet, les très basses pressions provoquent une surcote du niveau de la mer. Cette onde s'ajoute à la marée astronomique. Cette surélévation peut atteindre 0.5 à 1.5m. Associée aux effets destructeurs de la houle, cette marée peut entraîner des inondations dans les régions basses du littoral. Heureusement, ces régions sont peu nombreuses à La Réunion.

Statistiques sur les cyclones

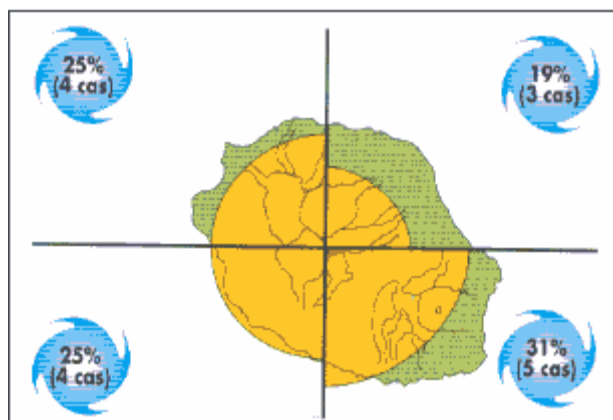
Dans le monde, on observe en moyenne chaque année près de 85 tempêtes tropicales dont environ 45 atteignent le stade de cyclone tropical.

Dans le bassin sud-ouest de l'Océan Indien, une douzaine de systèmes dépressionnaires tropicaux sont observés en moyenne par an. Neuf atteignent au moins le stade de tempête tropicale modérée et sont donc baptisées ; quatre d'entre eux atteignent le stade de cyclone tropical. Mais la variabilité interannuelle est très importante.

La saison cyclonique s'étend habituellement du mois de novembre au mois d'avril, avec une concentration de risques entre janvier et mars. Parfois, des perturbations tropicales peuvent se former en dehors de ces dates, voire même en plein hiver austral (cas de la dépression tropicale observée en août 1996).



Secteur d'origine à 300km des côtes réunionnaises des tempêtes et cyclones tropicaux étant passés à moins de 100km de La Réunion de 1967 à 1997



Secteur d'atterrissage (passage au plus près) de La Réunion des Tempêtes et Cyclones Tropicaux étant passés à moins de 100km de La Réunion de 1967 à 1997.

Une étude spécifique des vagues extrêmes doit donc être réalisée. Elle ne peut se faire que sur les séries de données disponibles c'est-à-dire sur les données extraites du modèle vent-vagues du centre européen. Une extrapolation des hauteurs et périodes maximales devra être réalisée à partir des hauteurs et périodes significatives. Cette étude ne reposera cependant pas sur des mesures. Les seules mesures disponibles étant les mesures des houlographes. Le 23 janvier 2002, une vague de 11.2m a été enregistrée sur le site de Saint Pierre.

Voici une liste des épisodes cycloniques depuis 1993, pendant lesquels une étude des vagues extrême doit être effectuée.

Cyclone	Dates de début	Dates de fin
Hary - Dina	05/03/2002	15/03/2002
Charly	17/01/2001	01/02/2001
Bindu	03/01/2001	22/01/2001
Ando	31/12/2000	13/01/2001
Innocente	11/04/2000	24/04/2000
Eline	07/02/2000	29/02/2000
Astride	23/12/1999	03/01/2000
Evrina	30/03/1999	10/04/1999
Davina	02/03/1999	19/03/1999
Alda	14/01/1999	19/01/1999
Donaline	04/03/1998	12/03/1998
Anacelle	06/02/1998	14/02/1998
Josie	05/02/1997	17/02/1997
Grettelle	19/01/1997	31/01/1997
Daniella	02/12/1996	11/12/1996
Bellamine	29/10/1996	11/11/1996
Jenna	01/05/1996	06/05/1996
Edwige	19/02/1996	29/02/1996

Bonita	03/01/1996	09/01/1996
Kylie	07/03/1995	15/03/1995
Albertine	23/11/1994	03/12/1994
Litane	07/03/1994	18/03/1994
Hollanda	06/02/1994	15/02/1994
Colinna	13/01/1993	20/01/1993

Les données disponibles portent également sur les vents à 10 mètres durant ces périodes. Les développeurs doivent en effet prendre en compte les vents extrêmes (plus de 300km) dans le design des structures, notamment si elles sont flottantes.

3.2.5 La Bathymétrie

L'île de La Réunion est un volcan de 3000m d'altitude au dessus du niveau de la mer et de 50km de rayon, mais il est en fait haut de plus de 7000m au dessus du plancher océanique sur lequel son rayon avoisine les 125km.

Les fonds marins de La Réunion sont, à l'instar des flancs du volcan, très pentus et remontent très vite. On constate l'absence de plateau continental comme autour de l'Europe. Les vagues arrivent donc sur les côtes de La Réunion avec toute leur puissance, les pertes par friction avec le sol étant minimales. Cette caractéristique est donc un plus pour La Réunion du point de vue énergétique.

Cela permettra aussi une diminution des coûts de câblage d'une usine houlomotrice offshore. Celle-ci, ancrée à une profondeur comprise entre 50 et 100m, sera relativement proche de la côte (quelques kilomètres). Mais à contrario ce positionnement aura un impact visuel plus important

3.3 Assistance au maître d'ouvrage Région Réunion

3.3.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans la présentation du contexte énergétique de l'île de La Réunion, le pouvoir politique actuel encourage fortement le développement des énergies renouvelables.

Une délégation réunionnaise constituée de N.Picou (ARER), R.Huitelec (ARER) et E.Espérance (Région Réunion) est partie, en Octobre 2002, participer au colloque « Renewable Realities » à Orkney (Ecosse) et visiter l'usine houlomotrice LIMPET.

Après quelques mois de latence, la Région Réunion a décidé de lancer des études pour connaître le potentiel en énergie des vagues de l'île, objet du stage et d'une partie de ce rapport. Cette phase nommée « Aide à la décision pour l'investissement, filière énergie des vagues à La Réunion » débuta début juillet. Le but de cette phase était la réalisation d'un atlas de la ressource.

Une enveloppe budgétaire de 85000€ a été allouée à cette phase sur la base d'une fiche envoyée en Avril 2003 au Comité de Maîtrise de l'Énergie (CME), organisation chargée de la gestion du budget du Programme Régional de Maîtrise de l'Énergie (PRME).

Principal interlocuteur de l'île sur ce sujet, il m'a été demandé d'assurer la transition de mon stage avec la phase d'aide à la décision qui, en fait, se chevauchait. Plus qu'assurer la transition, j'ai proposé la méthodologie générale pour la réalisation de cette phase d'aide à la décision.

Une étape dans la démarche a été ajoutée : l'étude des sites terrestres susceptibles d'accueillir les installations d'une usines houlomotrice (onshore ou offshore) du point de vue environnemental, réglementaire et de proximité des réseaux routier et électrique.

La création d'un comité de pilotage a également été préconisée pour le suivi des études.

3.3.2 Méthodologie générale

La méthodologie générale de la phase « Aide à la décision pour l'investissement, filière énergie des vagues à La Réunion » et ces coûts associés sont présentés ci après.

Réalisation d'un atlas de la ressource

Etude de la ressource offshore (effectuée d'ici septembre 2003)

Type d'étude	Recueil, analyse et interprétation des caractéristiques du champ de vagues offshore
Objectif	Caractériser le potentiel offshore
Evaluation du coût	0 € hors coût de fonctionnement ARER
Acteurs Mise en place	ARER et Météo France Accord partenarial

- Etude de la ressource côtière pour toute l'île de La Réunion

Etude de la houle côtière par simulations numériques

Type d'étude	Simulations numériques et interprétation des caractéristiques du champ de vagues et des phénomènes de réfraction diffraction sur les côtes réunionnaises
Objectif	Carte du sud de La Réunion présentant les caractéristiques de la ressource sur les côtes
Acteurs Mise en place	Bureau d'Etudes Techniques Appel d'offres
Evaluation du coût	25000 €

Détermination de sites éventuels d'implantation de convertisseur du point de vue environnemental, des servitudes terrestres et de la connexion au réseau

Type d'étude	Etude environnementale, des servitudes terrestres, du réseau électrique
Objectif	Détermination d'un nombre fini de sites adéquats pour l'implantation d'un convertisseur onshore ou offshore
Acteurs Mise en place	Bureau d'Etudes Appel d'offres
Evaluation du coût	15000 €

Etude in situ de la houle côtière

Type d'étude	Pose d'un houlographe Mesures des amplitudes et périodes des vagues
Objectif	Caractériser précisément le potentiel sur les sites à très fort intérêt
Acteurs	DDE, Entreprise spécialisée

Mise en place	Appels ou location auprès de la DDE ou déplacements de certains houlographes déjà existants
Evaluation du coût	35000 €/an /site
Nombre de sites	De 1 à 3

Constitution d'un comité de pilotage et technique

La gestion de la filière Energie des océans peut faire l'objet de plusieurs scénarii. La Région Réunion peut la prendre totalement en charge. Compte tenu du suivi déjà réalisé, il semble que la poursuite d'une collaboration entre l'ARER et la Région Réunion soit appropriée.

- Création d'un poste d'**Assistant à Maître d'Ouvrage**

La durée de l'intervention de l'assistant devra être précisée. Son intervention devra porter sur le suivi scientifique des études d'ores et déjà engagée, sur le lancement des appels d'offres et sur le suivi scientifique de ces études.

Evaluation du coût : 15000€

- Intervenants locaux

Région Réunion	A déterminer
Conseil général	A déterminer
ARER	Christophe Rat
ARER	Nicolas Picou
LSTUR	A déterminer
DDE	De Langlard, A confirmer

- Intervenants extérieurs

IFREMER Bretagne	A déterminer
------------------	---------------------

Etude des fonds marins réunionnais

NB : Ces études s'effectueront sur les zones les plus intéressantes du point de vue ressource énergétique, proximité servitude terrestre et accessibilité au réseau d'électricité.

Les deux dernières études pourraient faire l'objet de cofinancements vu le manque de connaissances fondamentales dans ces domaines (IFREMER, BRGM, LSTUR...). Ces études proposées ne peuvent évidemment pas rentrer dans l'enveloppe financière allouée mais sont les étapes suivantes de la phase d'aide à la décision.

Cartographie des fonds marins

Type d'étude	Intensification de la bathymétrie numérique
--------------	--

Objectif	Numériser les données bathymétriques disponibles au SHOM
Acteurs Mise en place	SHOM et sous traitants Partenariat
Evaluation du coût	Evaluation à demander officiellement mais sans engagement auprès du SHOM
Durée	?

Cartographie acoustique des fonds marins

Type d'étude	Etude sonar : bathymétrie et identification de la nature sédimentaire
Objectif	Affiner les données bathymétriques Appréhender la nature des fonds sous marins
Acteurs Mise en place	Ifremer, DDE ou autre entreprise spécialisée Appel d'offres
Evaluation du coût	30000 €/jour
Durée	De 2 à 5 jours

- Etude géotechnique sur les sites à très fort potentiel

Type d'étude	Etude géotechnique : carottage ou dragage des sites à très fort potentiel
Objectif	Caractérisation précise de la nature des fonds marins
Acteurs Mise en place	Ifremer, BRGM ou autre entreprise spécialisée Appel d'offres
Evaluation du coût	?

3.3.3 Les moyens disponibles et les coûts associés à cette méthodologie

L'étude de la ressource offshore a été réalisé durant le stage et fait l'objet d'une partie de ce présent rapport. Elle a été réalisée en partenariat avec MétéoFrance Réunion qui a pris à sa charge le coût de l'extraction des données auprès du CEP et le coût de mise en forme électronique des données. Le coût d'une telle étude en BET est de l'ordre de 5000€.

L'étude de la ressource onshore par simulations numériques se soustraite à un bureau d'étude technique ou à une école d'ingénieurs.

Parmi les bureaux d'études susceptibles de réaliser ce genre de travail, on trouve, en métropole Optimer (<http://www.optimer.fr/>) Météomer (<http://www.meteomer.com/>) Sogréah (<http://www.sogreah.fr/>) EDF / LNHE (Michel Benoit: Michel.Benoit@edf.fr , qui peut aussi être intéressé par l'application énergétique)

A l'étranger, on trouve en Norvège Oceanor (www.oceanor.no), Au RU Hr Wallingford (www.hrwallingford.co.uk) et en Australie (www.energetech.com.au).

Les écoles utilisant les mêmes moyens numériques au cours de leurs enseignements sont :

- ✓ Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var (ISITV)
- ✓ Ecole nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique, d'hydraulique de Toulouse (ENSEEIH)

Le coût d'une simulation est de l'ordre de 2000€.

La pose d'un houlographe non directionnel par la DDE coûte en location environ 20000€ par an. Le coût de la pose d'un houlographe directionnel est beaucoup plus élevé car ce type de matériel n'est pas disponible à La Réunion. Il est entre 40000€ et 65000€ par an.

Intensifier la numérisation des données bathymétriques doit faire l'objet d'une demande officielle de la part de la Région Réunion auprès du SHOM :

"Monsieur l'ingénieur général de l'armement
 Directeur de l'établissement principal du SHOM
 13 rue du Chatelier BP 30316 29603 BREST cedex"

Son coût dépend des données disponibles. Un bilan des relevés qui sont nécessaires pour couvrir au mieux le littoral devra donc être réalisé par le SHOM sur demande.

En ce qui concerne l'affinage des données bathymétriques sur un site donné, la DDE Réunion est compétente.

Pour ce qui est des études géotechniques, un bateau océanographique, le Marion Dufresne, géré par les Terres Australes et Antarctiques Françaises, est régulièrement sur la zone de La Réunion. Il pourrait aussi bien réaliser des études sonars que des carotages ou des draguages afin de connaître la nature des fonds. Les données sur la nature des fonds ne sont ni disponibles à l'université (LTSUR), ni au BRGM ou tout autre organisme. Une thèse contenant quelques éléments serait disponible à l'université de Clermont Ferrand. Une journée d'utilisation du Marion Dufresne pourrait être de l'ordre de 50000€.

3.3.4 Cahiers des charges

Les cahiers des charges associés aux études sur :

- ✓ Etude de la houle côtière de l'île de La Réunion par simulations numériques
- ✓ Détermination de sites éventuels d'implantation d'une usine houlomotrice du point de vue environnemental, réglementaire, et de proximité des réseaux
- ✓ Etude in situ de la houle côtière

sont respectivement en annexe 1,2,3.

Ils précisent exactement ces études et les résultats attendus.

Bibliographie :

- Principe de l'altimétrie : http://www.jason.oceanobs.com/html/alti/principe_fr.html
- Description détaillée du modèle WAM : Komen & al 1994
- Ocean Waves : Energy Resource Assessment" Journal Marine Technology Society Vol36, N°4 Pontes&al
- Atlas climatique de la Réunion - MétéoFrance
- "Wave energy assessment resource and economic assessment for the state of Hawaii" George Hagerman
- "Southern New England Wave Energy Resource Potential" George Hagerman

4 Veille technologique et contraintes associées

4.1 Les usines houlomotrices

4.1.1 Introduction

Nous avons vu tout au long des chapitres précédents que les vagues étaient une grande réserve d'énergie. La problématique de ce chapitre est donc de connaître les moyens et les technologies permettant de convertir cette énergie mécanique en énergie électrique. La grande diversité des technologies qui ont été ou qui sont en développement nous pousse à penser que la meilleure technologie n'a pas encore été clairement identifiée.

Trois caractéristiques des vagues sont utilisées pour la conversion de l'énergie :

- ✓ La courbure des vagues
- ✓ L'oscillation sinusoïdale de la surface
- ✓ Le déferlement des vagues

Certaines technologies se basent sur deux de ces caractéristiques pour convertir un maximum d'énergie.

D'après Hagermann, l'ensemble des technologies et processus de conversion de l'énergie des vagues peut être classé à partir d'un nombre fini de critères.

Ces critères énumérés ci-après portent sur les caractéristiques des vagues utilisées, le type d'absorbeur, le type de point de réaction et sur le type du fluide travaillant.

L'absorbeur et le point de réaction sont deux points de l'usine houlomotrice entre lesquels il existe un mouvement. C'est ce mouvement relatif qui est utilisé pour mettre en mouvement un fluide, le fluide travaillant.

Caractéristiques des vagues utilisées :

- ✓ La courbure des vagues
- ✓ L'oscillation sinusoïdale de la surface
- ✓ Le déferlement des vagues

Utiliser la courbure des vagues revient à utiliser la forme des vagues pour créer un couple mécanique autour d'un axe. Le mouvement créé par l'oscillation de la surface est un mouvement vertical contrairement au mouvement créé par le phénomène de déferlement qui est horizontal.

Absorbeurs :

- ✓ Surface libre de la mer
- ✓ Structure fabriquée rigide ou flexible

Points de réaction :

- ✓ Structure fixe (structure béton avec fondation ou sol terrestre)
- ✓ Structure ancrée au sol (ancrage gravitaire ou avec pieux)
- ✓ Structure à inertie

Fluide travaillant :

- ✓ Air
- ✓ Eau de mer

✓ Fluide hydraulique

L'ensemble des technologies peut être résumé dans le tableau suivant :

COURBURE				
COURBURE ET OSCILLATIONS				
OSCILLATIONS				
OSCILLATIONS ET DEFERLEMENT				
DEFERLEMENT				
ABSORBEUR	STRUCTURE RIGIDE OU FLEXIBLE			SURFACE LIBRE
POINT DE REACTION	STRUCTURE A FORTE INERTIE	STRUCTURE ANCRÉE	STRUCTURE FIXE	STRUCTURE FIXE OU A INERTIE

Figure 4.1-1

Entre deux technologies appartenant à une même classe de ce tableau, les différences peuvent être nombreuses et portent sur le design des structures, les turbines ou pompes utilisées, les matériaux, les techniques de mise à l'eau...

Dans la suite de ce chapitre, nous allons essayer de caractériser chaque technologie en fonction de ces critères, mais la présentation se fera sur le critère de la localisation. Les usines pouvant être soit sur la côte (onshore ou shoreline), soit près de la côte (nearshore) ou au large des côtes, en pleine mer (offshore).

4.1.2 Les technologies shoreline

Les usines houlomotrices implantées sur la côte sont les technologies de conversion de l'énergie des vagues qui ont été les plus testées de part le monde et ceci depuis une vingtaine d'années. Elles présentent donc le niveau de développement le plus important à cette heure.

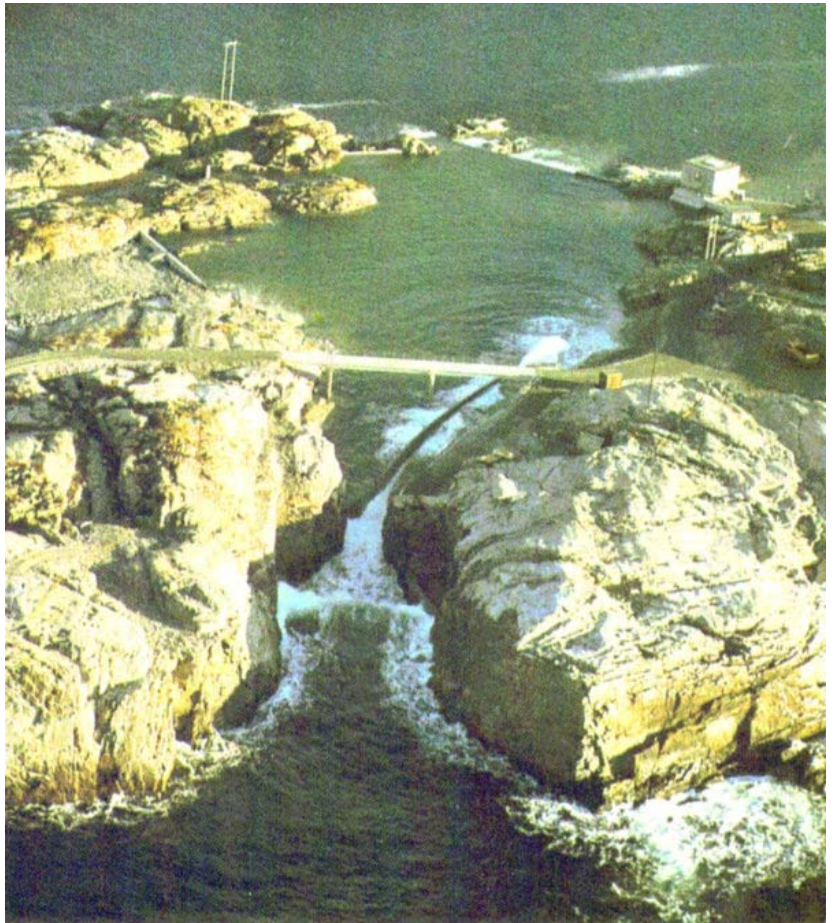
✓ Les Tapchan

Le « TAPered CHANnel » ou Tapchan, c'est-à-dire un canal convergent, est l'une des premières technologies de conversion de l'énergie des vagues à avoir été mise en service en Europe.

Cette technologie est du type 12. L'absorbeur est la surface libre de la mer tandis que le point de réaction est constitué du canal convergent et du réservoir construits sur la côte donc fixes.

La forme du canal focalise les vagues incidentes de façon à concentrer l'énergie et augmente le phénomène de « shaoling » ou gonflement au maximum. Les vagues déferlent dans un réservoir surélevé. L'énergie potentielle initialement contenu dans les vagues est ainsi piégée et est transformée en électricité en passant dans une turbine de type Kaplan.

Toftestallen-Norvège (1986-350kW)



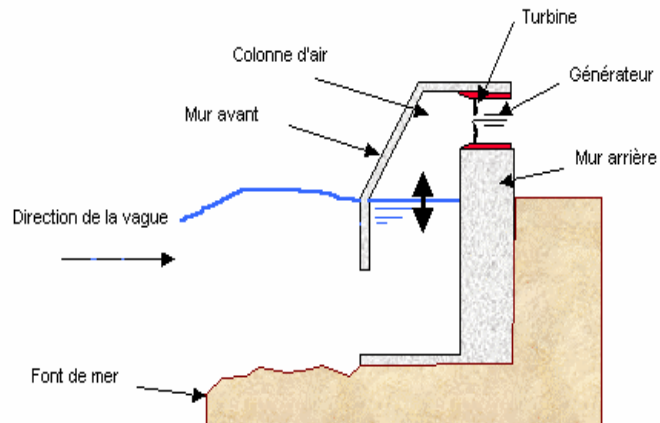
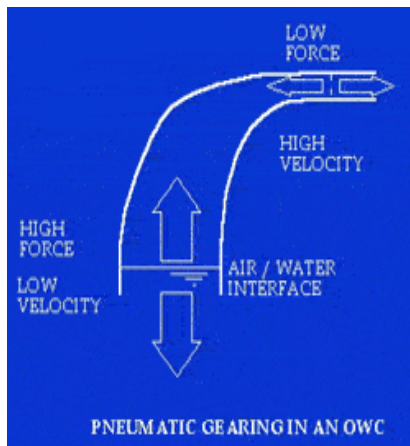
L'application de cette technologie en Europe est néanmoins limitée car le marnage dans la zone d'installation doit être inférieur à un mètre et les côtes adaptées. Une île, aux hauts fonds proche de la côte semble adaptée à l'installation d'un tel système : les plans d'un Tapchan de 1.1MW ont par exemple été réalisés pour Baron, JAVA. Mais aucune autre installation n'a été réalisée.

Ayant peu de parties en mouvement, toutes comprises dans le système turbine/alternateur/générateur, le Tapchan présente des coûts d'entretien réduits et une fiabilité

élevée. Il est également capable de fournir de l'électricité à la demande, son réservoir pouvant être capable de stocker l'énergie.

✓ La colonne d'eau oscillante ou Oscillating Water Column (OWC)

Le principe



Une usine houlomotrice basée sur le principe de la colonne d'eau oscillante (type 11) présente une chambre profilée semi submergée, d'un coté largement ouverte vers la mer de façon à laisser entrer l'eau librement et de l'autre ouverte vers l'atmosphère au travers d'une turbine.

L'oscillation du niveau de la mer, provoquée par la propagation des vagues, entraîne un flux et un reflux de la colonne d'air située dans la chambre. L'énergie des vagues est transformée ainsi en énergie pneumatique puis en énergie mécanique lorsque la colonne d'air passe, dans un sens ou dans l'autre, à travers la turbine à air.(cf. chapitre sur les turbines).

La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique se fait classiquement par l'utilisation d'un alternateur et d'un générateur.

Il existe plusieurs techniques pour transformer le flux d'air bidirectionnel en une rotation unidirectionnelle nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Un système de valves et de clapets permet de rendre le flux d'air unidirectionnel lors du passage dans la turbine.

La turbine Wells permet de part sa symétrie une rotation unidirectionnelle quelque soit la direction du flux. Finalement, la turbine Deniss-Auld, à pales orientables permet également une rotation unidirectionnelle quelle que soit la direction du flux.

Les installations

Cette technologie a été la plus développée dans le monde, les Anglais et Japonais s'y étant intéressés dès les années 1970.

Voici un tableau récapitulatif des différentes installations réalisées dans le monde :

Localisation	Type, Désignation usuelle	puissance	Largeur	Profondeur	Période d'opération
Isle of Islay, Scotland	Coastal OWC, ISLAY 2, LIMPET	500 kW	ø: 12 m	D: 7% m	depuis 2000

Pico Island, Azores	Coastal OWC,	500kW	W:12m	D:6m	depuis 1999
Trivandrum, India	Breakwater OWC, VIZHINJAM	75 kW, 150kW	W: 8 m	D: 10 m	1990-1995, depuis 1996
Dawanshan, China	Coastal OWC,	3kw	W:4m	D:10m	depuis 1990
Isle of Islay, Scotland	Coastal OWC, ISLAY 1	75 kW	W: 17 m	D: 3 m	depuis 1988
Sakata, Japan	Breakwater OWC	75 kW, 60 kW	W: 20 m	D: 18 m	depuis 1988
Kujukuri, Japan	OWC with pressure storage	30 kW	10 elements ø: 2 m	D: 2 m	depuis 1987
Niigata, Japan	Breakwater OWC (head)	40 kW	B: 13 m	D: 6,5 m	1986-1988
Toftestallen, Norway	Coastline OWC	500 kW	10 m	D: 70 m	1985-1988
Sanze, Japan	Coastal OWC	40 kW	W: 17 m	D: 3 m	1983-1984

L'île de Islay (Ecosse)

En 1988, un prototype de système d'exploitation de l'énergie des vagues, ISLAY1, de 75kW, a été installé à Islay par le département d'ingénierie civile de la Queen's University de Belfast (QUB). Le prototype a fonctionné pendant 8 ans. A la fin de ce projet, la QUB et Wavegen ont reçu un financement de l'Union Européenne de £950 000 pour installer à la place un site démonstratif de la technologie LIMPET alias ISLAY2, développée par les 2 partenaires. Wavegen a également fourni un financement propre de £750 000 et dirigé le consortium industriel du projet comprenant Kirk McClure Morton (consultants), Instituto Superior Tecnico de Portugali (partenaire technique) et Applied Research and Technology (ART). ART est la maison mère de Wavegen et s'est chargée de la réalisation des parties mécanique et électrique du projet. De plus, l'entreprise exploite le système qui est connecté au réseau de l'île d'Islay.

Deux turbines Well contrarotative, chacune couplée à un générateur électrique de 250kW, assurent la transformation de l'énergie pneumatique et une puissance nominale de 500kW.

Les performances du site démonstratif sont moindres que celles prévues (de l'ordre de 100kW) à cause d'un potentiel énergétique plus limité (15.9 kW/m) et de la présence de débris d'excavation à l'entrée de la chambre.



Figure 4.1-2 : Photo LIMPET

Extraction technology	Pneumatic chamber and air turbine
Description and dimensions of significant parts exposed to loading	Inclined OWC with an angle of 40° to the horizontal, the lower 3 m of the lip slightly more inclined towards vertical. The reinforced concrete front wall is 0.75 m strong, on the lower 3 m forming towards a round lip of 1.5 m diameter. The cross-section of collector (chamber) is divided into three separate columns, each
	6 m. Total span of roof is 21 m.
Phase of plant development	plant finalised and operative; prototype status
General remarks on device and the interpretation of extreme loads/survivability	<p>The roof span of 21 m would be too large to be economically efficient, which was one reason for the three modules. In the design phase for the structure, several aspects were considered, among them arch geometries, compressive membrane action of thin concrete plates and the possibility of a protective foil for the front wall. The front wall was designed to withstand a frontal wave pressure of 6 bar (600 kN/m²) over the entire width of 21 m, or a peak internal pressure of 1 bar (100 kN/m²).</p> <p>The inclination of the front wall is expected to reduce breaking wave impact loading significantly.</p>
Water depth at the plant site	Nominally 6 m at the lip of the collector stepping up to 4-5 m in the gully.
Design wave height	Hs max: 4.4 m
Design wave period	Tz max : 13.4
Return period of design wave	Not specified
Maximum design wave pressure	<p>No overall design wave pressure was specified but a number of load cases developed from model test data and from literature studies were studied via finite element analysis as follows—</p> <p>1) Wave impact pressure on the sloping front wall in a triangular load distribution with a peak of 600 kPa spread over 6 m height of wall and over the full width of the structure. Three analysis were performed with the peak load was centred at 3 m, 6 m and 9 m down the slope from the wave return wall.</p> <p>2) Wave impact pressure on the sloping front wall in a triangular load distribution with a peak of 600 kPa spread over a 6 m height of wall and across 2/3 of the width of the structure. The peak load was centred at 6 m and down the slope from the wave return wall. This modelled the effect of an incident wave impacting on one side of the structure allowing for the delayed impact of an oblique wave attack.</p> <p>3) Air suction pressure of 20 kPa on the internal surfaces of the top sloping face.</p>

Figure 4.1-3

L'île de Pico (Canaries, Portugal)

Une « centrale pilote européenne », d'une capacité nominale de 400kW, est installée et fonctionne depuis 2001 sur l'île de Pico, aux Canaries. Cette usine ne possède qu'une chambre et une turbine Well couplée à un générateur synchrone. La salle des machines a été conçue pour l'installation d'un deuxième système turbine-générateur.

Peu d'informations sont disponibles sur ce projet financé par l'Union Européenne dans le cadre du programme Joule, par la Région des Açores, ainsi que par des industriels portugais. Le projet Joule a été porté par Efacec Sistemas de Electronica. Le Instituto Superior Tecnico ainsi que le Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (INETI) ont également participé au projet.

En plus de réaliser une évaluation du potentiel en énergie des vagues à l'échelon national, l'INETI coordonne actuellement deux projets européens visant à :

- développer une méthodologie commune pour l'évaluation et la caractérisation de la ressource,
- produire un atlas européen de l'énergie des vagues pour la ressource offshore.

Extraction technology	Pneumatic chamber and air turbine
Description and dimensions of significant parts exposed to loading	30°-sloped front wall above MSL and vertical lip wall have a free span of 12 m. The crest height of the massive concrete structure is about 12 m above MSL. The vertical part (lip) of the front wall is 2 m thick, whereas the inclined part has a thickness of 1,5 m.
Phase of plant development	Prototype/demonstration plant; civil construction concluded in 1996; first test runs absolved.
General remarks on device and the interpretation of extreme loads/survivability	The civil structure design for the Pico plant was sub-contracted by the Portuguese consulting company PROFABRIL S.A., which is why written details about the structural design procedure are not available at IST. The solution of a massive in-situ concrete structure was preferred due to the lack of a shipyard for appropriate caisson construction. The strong exposure of the plant to wave attack by breaking waves led to the decision for a quite conservative design, since the economic factor was not focus at this stage. The negative chamber pressure was included in the design. The total design load over the front wall was considered to be a combination of: i) wave breaking on front wall and ii) extreme pressure loads inside the chamber.
Water depth at the plant site	7-8 m
Design wave height	7,5 m (depth-limited maximum individual wave height; from analysis of data measured in harbour).
Design wave period	ca. 12 s.
Return period of design wave	not specified
Maximum design wave pressure	700 kN/m ² (recorded from meeting notes)

Figure 4.1-4 : Caractéristiques techniques PICO

Sakata (Japon)

C'est le seul exemple d'une intégration totale dans des aménagements portuaires, en l'occurrence au niveau d'une digue.

Les conditions de réalisation d'un tel projet étaient bonnes car le port industriel de Sakata possédait toutes les ressources techniques nécessaires et les digues japonaises sont une succession de caissons placés côte à côte. L'usine s'est donc parfaitement inscrite dans la digue remplaçant simplement un caisson.

La puissance de la turbine est de 60kW.

Extraction technology	Pneumatic chamber and air turbine
Description and dimensions of significant parts exposed to loading	OWC structure seamlessly integrated in vertical caisson breakwater; caisson width 20 m, 5 compartments of 4 m each, chamber length 7 m; caisson crest height 12.5 m above MWL. Front wall 45° inclined from crest to ca. SWL, below vertical; thickness of front wall ca. 45cm
Phase of plant development	Plant decommissioned after several years of operation (inauguration 1989), without structural damage.
General remarks on device and the interpretation of extreme loads/survivability	The caisson is apparently considered to be more stable against wave forces than a conventional caisson.
Water depth at the plant site	14.5 m
Design wave height	$H_{max} = 15.3$ m; $H_{1/3} = 10.2$ m (for wave attack angle=25°)
Design wave period	$T_{1/3} = 14.5$ s
Return period of design wave	not specified (during the term of experiments, several recordings of $H_{1/3} > 7$ m were made, reaching a maximum of $H_{1/3} = 8.67$ m, corresponding to $H_{max} = 14$ m, $T_{1/3} = 12.88$ s)
Maximum design wave pressure	1.0 x salt water density x design wave height from impulsive pressures by breaking waves 0.5 x salt water density x design wave height for negative internal pressure due to air expansion 1.0 x salt water density x design wave height for (positive) internal air pressure

Figure 4.1-5 : caractéristique techniques SAKATA



Figure 4.1-6 : usine de Sakata



Figure 4.1-7 : Sakata en construction

Toftestallen

A quelques centaines de mètres du Tapchan, une usine houlomotrice OWC est installée. Elle a une puissance nominale de 500kW.



Figure 4.1-8 : vue aérienne de Toftestallen

4.1.3 Les technologies near shore

La technologie de la « colonne d'eau oscillante » s'intègre dans les ports ou dans la côte elle-même. Elles peuvent également se positionner en pleine mer comme nous le verrons dans les technologies offshore mais aussi près des côtes (nearshore), souvent, comme c'est le cas dans les deux technologies suivantes, devant une digue portuaire.

Vizhinjam (Kerala, Inde)

Les recherches sur l'exploitation de l'énergie des vagues ont commencé en Inde en 1983. Elles sont menées au National Institute of Ocean Technology, Indian Institute of Technology de Madras (Tamil Nadu). De nombreux systèmes présentant des caractéristiques techniques différentes

ont été testés dans les années 80. Une première centrale d'une capacité nominale de 150kW a été installée en 1991 à Vizhinjam et a fonctionné jusqu'en 1995. Une autre centrale d'une capacité de 75kW a été installée sur le même site en 1996.

Les tests effectués en Inde ont été très utiles pour le développement ultérieur des systèmes à « colonne d'eau oscillante ». Cette usine n'a pas été intégrée directement dans la digue car il n'y avait pas de projet de réhabilitation de la digue. Il s'agit également des seuls tests de la technologie réalisés dans l'Océan Indien. Peu d'informations sont disponibles sur l'état actuel de la recherche indienne dans le domaine.

Le coût du kilowatt par heure est estimé à 0.05€ si l'on ne prend en compte que les coûts associés aux infrastructures en plus de la digue portuaire. Il monte à 0.165€ en prenant en compte les coûts totaux de production de l'énergie (il est à noter que les coûts de main d'oeuvre, de machinerie,... sont moindre qu'en Europe).



Figure 4.1-9 : Vizhinjam (Kerala, Inde)

<http://www.niot.res.in/m1/mm1.html>

Energetech – Port Kembla (Australie)

Energetech développe un nouveau type d'usine houlomotrice à colonne d'eau oscillante à Port Kembla au sud de Sydney.

La structure est placée, comme en Inde, devant la digue portuaire mais a la caractéristique d'intégrer dans son design un mur parabolique servant à concentrer les vagues dans la chambre et permettant de multiplier par 3 l'amplitude des vagues incidentes.

Cette usine utilise également la turbine Deniss-Auld ayant un meilleur rendement que la turbine Wells.

Caractéristiques techniques :

Puissance de 300KW à Port Kembla avec une ressource en énergie de 8kW/m

Efficacité maximum (vague-réseau) : 40-45%

Dimensions : 40m de large, 20m de long, distance focale du mur de cinq mètres

Longueur d'onde utilisable : 50 à 200m

Profondeur d'implantation: 6 à 20m

Amplitude maximale : 8m

Prix : Investissement : 1 à 2 M \$ US

Coût de revient : 5-10c\$ US

Connexion réseau : triphasé 415V à 50Hz

www.energetech.com.au

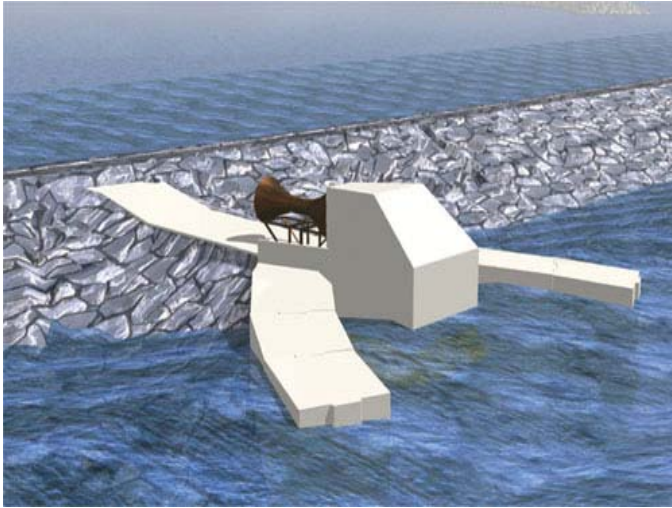


Figure 4.1-10 : illustration de la technologie Energetech



Figure 4.1-11 : illustration de la technologie Energetech

4.1.4 Les technologies offshore

Ce sont les technologies positionnables à quelques kilomètres des côtes à une profondeur généralement supérieure à 50 m. Certains considèrent que les technologies reliées directement aux fonds marins font partie des technologies nearshore. Ceci ne sera pas fait ici.

✓ Les colonnes d'eau oscillantes de type 10

The Mighty Whale

La «Mighty Whale », la plus grande usine houlomotrice offshore, a été lancée en juillet 1998 par le Centre Japonnais de Science et Technologie Marine (JAMSTEC). Le prototype à échelle réelle a été opérationnel et testé sur une période de deux ans à l'embouchure de la baie Gokasho face à l'océan pacifique.

Cette « puissante baleine » converti l'énergie des vagues en utilisant le principe de la colonne d'eau oscillante. C'est un système flottant de 50m de long pour 30m de large. Il possède trois unités turbine à air/générateur, la première avec une puissance de 50kW, les deux autres avec une puissance de 30kW.

De part le fait qu'elle absorbe une partie des vagues, la Migthy Whale crée une mer calme derrière elle.

Table 1: Design Conditions		
Steady wind speed	(10 minute average)	36.4 m/sec
	(1 minute average)	42.2 m/sec
	(1 hour average)	34.2 m/sec
Current speed		
		1.2 m/sec
Wave height and period	Max 1/3 significant height	8.0 m
	Max 1/3 significant period	10–15 sec
Water depth		
		40.4 m
Tidal range	High water level	1.859 m
	Low water level	0.029 m

Figure 4.1-12

Table 2: Main specifications		
Mighty Whale Hull	Length	50 m
	Breadth	30 m
	Depth	12 m
	Draught	8 m
	Displacement	4,380 tonnes
	Light weight	1,290 tonnes
Air Turbines	Type	Wells
	Configuration	Tandem
	Blades	NACA0021 (8 blades)
	Diameter	1.7m
	Material	Corrosion resistant Al alloy
	Weight	480 kg (approx.)
Generators	Max RPM	1,800 RPM
	Type	3-phase induction
	Rated output	(50 kW + 10 kW) x 1; 30 kW x 2
	Cooling	Forced air cooled
	Operation RPM	300–1,800 RPM
	Voltage	AC200V, 3-phase
Air Compressor	Type	Air cooled oil-less
	Rated output	7.5 kW
	Max Pressure	7 kgf/cm ² (approx.)
	Input voltage	AC200V
Table 3: Measured Parameters		
Environment	Incident wave height and direction	
	Wind speed and direction	
	Atmospheric temperature/ pressure	
	Wave dissipation characteristic	
Hull dynamic response	Hull motion	
	Drift motion	
Primary energy conversion	Water displacement in and outside air chamber	
	Machinery-generated noise	
Secondary conversion	Differential pressure, RPM, torque	
	Safety valve	
Generator output	Voltage, current, power	
Air compression	Flow rate, delivery pressure, air tank pressure	
Mooring system	Hull absolute position	
	Mooring line force	
On-board power supply	Voltage, current	

Figure 4.1-13

Extraction technology	Pneumatic chamber and air turbine
Description and dimensions of significant parts exposed to loading	<p>Floating body: Length 50.0 m, Breadth 30.0 m, Depth 12.0 m , draft 8.0 m, Front wall 2.0 m, Displacement 4,380 ton, Light weight 1,290 tons.</p> <p>Air chamber : L x B x D = 10.0 m x 8.0 m x 12.0 m; No. of air chambers: 3 air chambers.</p> <p>Mooring system: type: catenary mooring; No. of mooring lines: 6 lines (weather side: 4 lines , lee side: 2 lines).</p> <p>Specification of mooring line; weather side (total length: 265 m each); Chain diameter and length: 160 mm, 165 m join with 130 mm, 100 m; Intermediate weight: 14 ton x 2; Anchor: 165 ton in water (concrete anchor) Lee side: Chain diameter and length: 81 mm, 207 m; Intermediate weight: 14 ton x 2; Anchor: 125 ton in water (concrete anchor)</p>
Phase of plant development	<p>Detail design : 1995. 4 – 1996. 3</p> <p>Construction : 1997. 7 – 1998. 5</p> <p>Mooring operation : 1998. 6 – 1998. 7</p> <p>Adjustment of measuring instrument : 1998. 8 – 1998. 9</p> <p>Open sea tests : 1998. 9. 10 – now</p>
General remarks on device and the interpretation of extreme loads/survivability	Survivability was main design criteria.
Water depth at the plant site	40 m
Design wave height	Max. significant wave height = 8 m .
Design wave period	Max. significant wave period : 10 – 15 sec .
Return period of design wave	50 years.

Figure 4.1-14

ORECon

Cette société anglaise basée à Plymouth développe le concept de colonnes d'eau oscillante multiples. L'idée est d'intégrer dans une même structure plusieurs colonnes de dimensions différentes qui permettent de répondre et donc répondant différemment aux sollicitations externes des vagues.

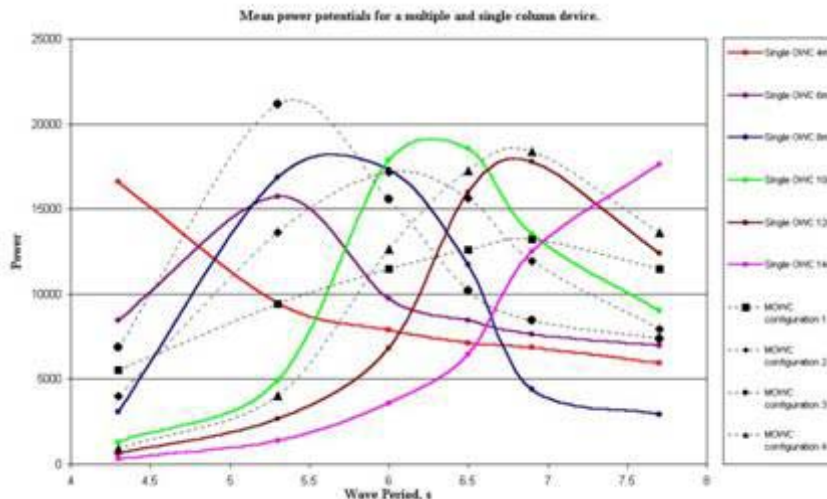


Figure 4.1-15 : résonance de ORECon

La figure précédente présente la puissance de chaque colonne en fonction de la période des vagues. A chaque colonne correspond une période de puissance maximale.

Le premier prototype déployé en 2001 était à l'échelle 1/6^{ème} et incluait une turbine de 5kW. Pesant 12.5 tonnes, il faisait 12m de hauteur et possédait trois colonnes oscillantes.

Après cinq mois de test, l'usine a été, provisoirement, enlevée pour des modifications structurelles et une mise à jour des instruments de mesure.

La puissance principale fournie par une colonne a été enregistrée se situerait entre 100W et 800W. La combinaison de plusieurs colonnes permet d'atteindre une fourchette de 800W à 2kW.

Le projet futur est de trouver un site durable sur la côte anglaise pour l'implantation d'une structure pouvant produire 1MW.



Figure 4.1-16 : Bouée ORECon à la mise à l'eau

<http://www.orecon.com/>

✓ Les bouées (type 6)

L'entreprise **AquaEnergy Group** (USA) développe deux bouées permettant de convertir l'énergie des vagues : l'AquaBuoy et l'IPS Buoy.

<http://www.aquaenergygroup.com/home.htm>

The WavePump

Un développeur norvégien IDEUTVIKLING, propose la bouée Wavepump.

De 1992 à 1995, des prototypes ont été testés en Norvège (Hustadvika, Froya, Lindesnes).

En 200/2001, des tests ont été effectués par le Danish Maritime Institute sur les valves, le mouillage et l'ancrage. Trois WavePump ont été installées en 2001 au Danemark et sont toujours opérationnelles.

Cette bouée utilise des matériaux très standards, fiables, relativement légers.

Avec une puissance nominale de 30kW, elle convertit l'énergie des vagues relativement modestes mais plus fréquentes.

Wave pump:

Installed capacity, 100 kW

Yearly energy absorption, 403.450 kWh

Yearly electricity production 326.700 kWh

Material:

Steel ,10 ton

Ballast concrete, 60 ton

Anchoring via pipes to the seabed

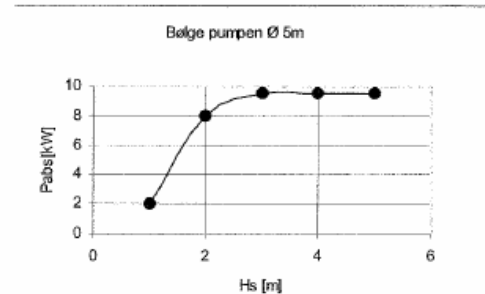


Figure 4.1-17 : WavePump à la mise à l'eau

Description	Cost
Preliminaries - Fees; permitting; insurance; applications etc.	\$46,500
Abutment - Core to rock; grout injection; form, reinforce and cast; balustrading; security lighting	\$103,125
Access Bridge - Bridge structure; decking; balustrading; security	\$210,300
Caisson - Form, reinforce and cast support caisson, chamber, and walls; prepare bed; transport to site and placement; sand fill caissons; install pressure doors and vents, security lights and gates	\$1,122,500
Turbine Support - Supply, fabricate, coat, transport to site, and erect framework and maintenance stairs for turbine	\$46,500
External Works - Navigation Buoys; excavate trench for power cabling from generator to control building, construct control building on shore near to site; installed video camera	\$101,250
Electrical Works - Install 11kV cable, switch and control gear in control building, and link cable to substation	\$72,200
Turbine and Generator - Supply and install turbine and generator to device, and isolation/control equipment to caisson	\$195,000
Total	\$1,897,375

Figure 4.1-18 : répartition du coût d'une WavePump

The Archimede Wave Swing

L'Archimede Wave Swing (AWS) est également une bouée mais 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, son volume diminue, la force d'Archimède diminue et le ballon descend. A contrario, dans le creux de la vague, l'air du ballon, dépressurisé, s'expand et fait remonter le ballon. Le mouvement oscillatoire du ballon par rapport au fond est ainsi créé.

Un prototype de 2MW a été construit au Portugal en 2001 mais a du faire face a des problèmes lors de sa phase de mise à l'eau. Peu d'informations sont disponibles depuis.

Une deuxième génération est déjà élaborée.

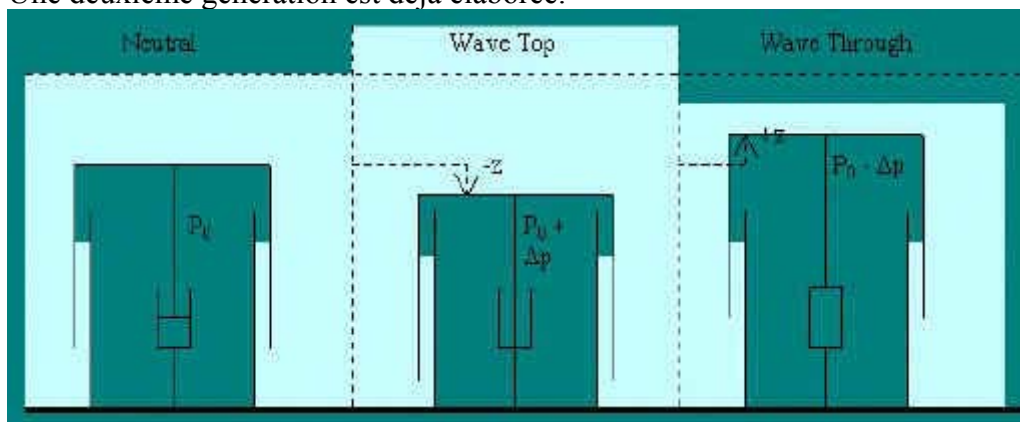


Figure 4.1-19 : principe de AWS

Extraction technology	Conversion of heaving motion with linear generator
Description and dimensions of significant parts exposed to loading	Submerged device, therefore not subject to surface waves. 34 m high and 9 m wide outer cylinder on 48 m x 28 m pontoon placed on seabed.
Phase of plant development	10/2001: 2 MW pilot plant is ready to be towed and sunk into place offshore Viana do Castelo/Portugal.
General remarks on device and the interpretation of extreme loads/survivability	The concept resulted from demanding high survivability of the device; survivability has always been important factor in the design but the dimensions of the device were not determined by this criteria. Survivability is critical to determine the range of waves within which the device may operate. There is a survivability mode of operation for the case of extreme sea states.
Water depth at the plant site	42 m
Design wave height	20 m
Design wave period	9-14 s
Return period of design wave	100 years
Maximum design wave pressure	not specified
Maximum design wave load	34 mN lateral forces produced by waves

Figure 4.1-20 : caractéristique techniques de AWS



Figure 4.1-21 : AWS entre deux eaux

<http://www.waveswing.com/index/index.html>

✓ Des structures flottantes de type 5

Mc Cabe Wave Pump

La Mc Cabe Wave Pump, conçue et développée par Dr Mc Cabe, est constituée de trois barges flottantes reliées entre elles par des pistons. Ce système sert aussi bien à la production d'électricité que d'eau potable.

Un prototype de 40m de long pour 4m de large a été installé à l'embouchure du Shannon (Irlande).



Figure 4.1-22 : La McCabe Wave Pump à l'embouchure du Shannon

<http://wave-power.com/>

Le Pelamis

Basés sur le même principe que la Mc CABe Wave Pump, ce système est constitué de caissons ou boudins semi-submergés reliés entre eux par des joints articulés. Les vagues créent un mouvement de ces joints qui pompent de l'huile sous pression vers un moteur hydraulique. Ce dernier entraîne à son tour un générateur producteur d'électricité. Un contrôle de la résonance des joints peut être effectué en fonction de l'état de la mer.

L'usine est ancrée au sol par un mouillage souple ce qui lui permet de s'orienter perpendiculairement aux crêtes des vagues.

De nombreux prototypes ou modélisations ont été réalisés (à l'échelle 1/33, 1/20 et 1/7^{ème}).

Quelques chiffres :

Puissance nominale	750kW
Longueur	150m
Diamètre	3.5m
Poids	Env. 700t

Production annuelle	2.7GWh
Emission de CO2	0



Figure 4.1-23: prototype de Pelamis à l'eau

<http://www.oceanpd.com/>

- ✓ Les technologies offshores de type Tapchan

WaveDragon

Les vagues incidentes sont concentrées par deux bras fixes de forme parabolique et guidées vers le bassin surélevé du WaveDragon. L'eau s'y accumule avant de s'écouler par des turbines pour retrouver le niveau moyen de la mer (figure 4.1-24). Il est lié au fond par un système d'ancrage « slack moored ». Le développement du WaveDragon s'appuie sur des technologies matures venant des industries offshores ou de l'hydraulique. Contrairement aux colonnes d'eau oscillantes, les turbines utilisées dans cette usine sont hydrauliques.

Pour une ressource énergétique de 24kW, une usine de 4MW pourrait être dimensionnée. Quelques caractéristiques techniques et la répartition du coût suivant les postes (hors coût de câblage) sont présentées en figure 4.1-25.

Le premier WaveDragon devrait coûter entre 6 et 8 Millions d'euro c'est-à-dire un coût au kW installé de 1500 à 2000€. Les coûts d'entretien seraient de l'ordre du centime d'euro du Kwh.

Un prototype de 20 kW est depuis Juin 2003 en test au Danemark. Dans une ressource de 0.4kW/m, il est large de 58m et long de 33m.

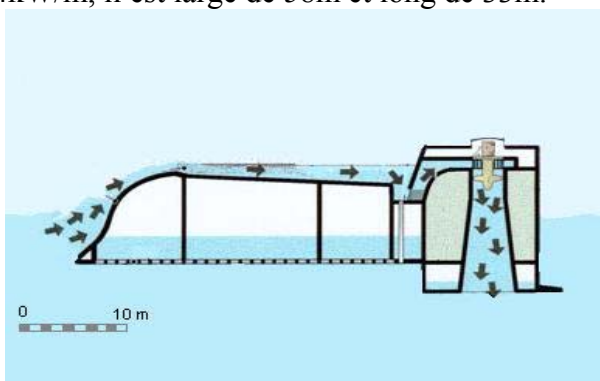


Figure 4.1-24: principe du WaveDragon

Corp principal, fer et beton armé	40%
Turbines	26%
Generateurs	3%
Systeme d'ancrage	20%
Design structurel	2%
Autres composants	1%
Systèmes hydraulique et flotabilité	4%
Système de controle et cablage à bord	4%
Total	100%

Figure 4.1-25: Répartition du prix d'un WaveDragon (hors câblage)

Poid, fer et/ou béton armé	22,000 t
Largeur et longueur en tout	260 x 150 m
Hauteur	16 m
Hauteur au dessus de la mer	3.5 –7.7 m
Reservoir	5,000 m ³
Nombre de turbines Kaplan	16
Generateurs	PMG 250kw
Puissance nominale	4 MW
Energie produite par an par unité	12 GWh/y
Profondeur de mer	> 20 m

Figure 4.1-26: caractéristiques techniques du WaveDragon de 4W



Figure 4.1-27 : Prototype de WaveDragon à l'eau

<http://www.wavedragon.net/>

SeaPower

Cette entreprise suédoise développe un système, le Floating Wave Power Vessel (FWPV), basé sur le même principe que le Wave Dragon.

Il a été testé pendant huit mois, notamment pendant l'hiver, au large des côtes ouest de la Suède sans aucun problème.

Ayant un contrat de 15 ans avec les autorités écossaises pour l'approvisionnement des îles Shetland, un FWPV devrait être installé en 2004 dans cette région.

<http://www.seapower.se/>

WavePlane

Le système WavePlane, développé par WavePlaneSolutions, utilise le déferlement des vagues grâce à sa plage artificielle mais aussi la vitesse de la vague. Il est ancré au fond et stabilisé par le vent et les vagues. Comme le WaveDragon, il ne doit pas glisser sur les vagues: son efficacité est améliorée si son mouvement oscillatoire vertical est limité.

Sa stabilisation verticale est assurée par une avancée immergée.

La vague incidente arrive sur la plage artificielle et croît (figure 4.1-28,1). Les entonnoirs inférieurs utilisent principalement l'énergie cinétique des vagues déferlantes (figure 4.1-28,2) tandis que les entonnoirs supérieurs sont remplis au passage de la vague et utilisent l'énergie potentielle des vagues (figure 4.1-28,3). Les entonnoirs supérieurs ont une capacité de stockage. L'énergie de l'eau est utilisée une fois que la crête de la vague est passée (figure 4.1-28,4).

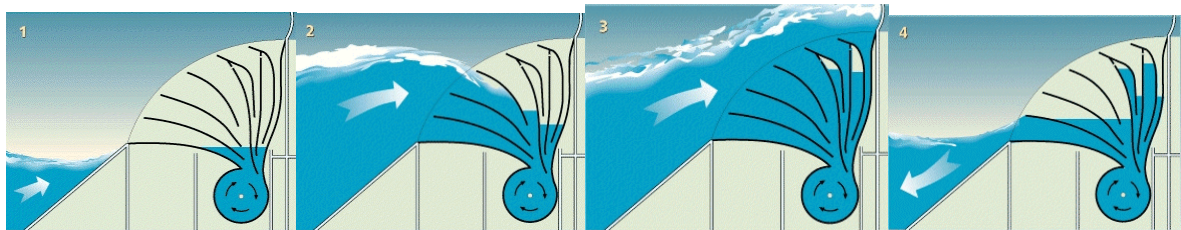


Figure 4.1-28 : principe du WavePlane

Utiliser à la fois l'énergie cinétique et potentielle des vagues permet d'obtenir avoir des bons rendements de l'ordre de 60%.

Le système WavePlane, ancré dans la mer du nord au large de la côte ouest de Juland, est large de 25m et serait, selon le développeur, capable de produire 1800MWh.

Produit en séries, le coût du WavePlane est estimé entre 500.000 et 650.000€. Le coût de production serait de l'ordre de 0,028€ par kWh.

En cas de conditions climatiques extrêmes, ce système peut être submergé comme un sous-marin via un contrôle à distance.

<http://www.waveplane.com/index.htm>

Liens :

<http://www.poemsinc.org/links.html> site relativement complet sur les technologies utilisant l'énergie des océans

<http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/wave/wave.asp> site du World Energy Council

<http://www.wavepowerjobs.com/index.htm> Qu'est ce qui est à l'eau et qui marche? , Liens vers les développeurs

<http://www.wave-energy.net/> site du réseau européen de l'énergie des vagues

<http://www.uni-leipzig.de/~grw/welle/wenergie.html> site en allemand présentant de nombreux prototypes

<http://acre.murdoch.edu.au/refiles/wave/text.html> petit site australien (OWC, Tapchan)

http://hidrox.ist.utl.pt/maretec/wave_energy_old/index.htm#Project%20'2nd%20generation%20WC site de l'institu superior tecnico – Portugal

4.2 Impact environnemental des usines houlomotrices

4.2.1 Introduction

Il est important de noter la diversité des technologies de conversion de l'énergie des vagues : les principes, les locations, les matériaux de fabrication, les technologies associées dépendent de chaque technologie.

De plus, il n'existe que très peu de retour d'expérience sur l'utilisation de telles technologies. Une des solutions est de s'inspirer des technologies voisines un quelque peu plus mûre comme l'éolien offshore.

Dans ce contexte, évaluer l'impact sur l'environnement de ces technologies, vues globalement est un exercice difficile. Certains impacts potentiels sur l'environnement ont néanmoins pu être dégagés.

4.2.2 Impacts biologiques

✓ Sur les mammifères marins

L'île de La Réunion abrite surtout deux espèces de mammifères marins : les dauphins et les baleines.

Les dauphins sont présents dans les eaux de l'île toute l'année contrairement aux baleines qui viennent mettre bas dans les eaux réunionnaises plus chaude durant l'hivers australe.

Aucune étude scientifique n'a été réalisée sur ces populations à l'île de La Réunion. L'association Globice étudie depuis deux ans les populations de baleines pour essayer de mieux connaître ces individus et leurs habitudes.

Devant le manque d'étude des impacts que peut avoir l'homme sur ces animaux marins, certains impacts négatifs éventuels ont été listés :

- Perte de l'habitat due aux perturbations surtout liées à l'émission de bruit par l'usine houlomotrice ou lors de sa construction, maintenance (bateaux, hélicoptères...).
- Affectation du système sonar des mammifères due aux vibrations dans les infrasons
- Influence possible de l'émission de sons basse fréquence et de champs électromagnétiques dans les câbles (cependant une étude a montré que le champ magnétique produit par un câble enfoui à 1m de profondeur est inférieur au champ magnétique terrestre)
- Accidents possibles entre les usines ou bateaux de maintenance et les mammifères marins (cependant ces mammifères évitent les objets sous-marins dangereux)
- Changement dans la chaîne alimentaire

Les effets des usines houlomotrices sur les mammifères marins devraient être relativement restreints mais doivent être néanmoins étudiés lors du développement des projets. Pour quantifier plus précisément ces effets, il serait nécessaire de réaliser des études scientifiques sur les effets du bruit, des champs magnétiques et de l'impact visuel sur les mammifères.

✓ Sur les poissons

Quelques effets de l'installation d'usines houlomotrices peuvent être positifs.

- La création d'une zone d'interdiction de pêche au chalut autour des usines peut permettre une croissance des populations de poissons. A La Réunion, cette industrie est cependant peu présente ; l'absence de plateau continental empêche la présence des populations de poissons.
- La réalisation des fondations des usines pourrait servir de récifs artificiels constituant ainsi un support à un écosystème local.

Quelques effets négatifs sont possibles :

- Effets de l'émission de bruit sur la vie des poissons. Ceux-ci devraient être limités et comparable aux effets existants
- Les changements sur la sédimentation et la turbidité de l'eau peuvent affecter les poissons, notamment dans les eaux peu profondes. Ces changements devraient être néanmoins limités dans le temps lors de la pose du câble et des fondations et comparables aux effets naturels d'une tempête.
- Influence du champ magnétique créé par le câble sur les poissons et leur alimentation. Aucune étude n'a été réalisée sur ce sujet.

✓ Sur les sols marins et les populations animales y vivant

Les effets de l'installation sur ces éléments seront restreints aux phases de construction et de démantèlement et relativement temporaires. Les impacts éventuels peuvent être :

- Perte de leur habitat pour certains individus. Cet impact reste temporaire
- L'installation de fondation peut changer les chaînes alimentaires des populations vivant au fond

✓ Sur l'hydrodynamique et la sédimentation côtière

L'installation d'usines, notamment offshore, pourrait avoir des impacts sur l'hydrodynamique. En effet, en captant une partie de l'énergie des vagues, ces usines diminuent la puissance des vagues arrivant sur la côte diminuant ainsi l'érosion des côtes, les courants récifaux...

Ces impacts peuvent être négatifs comme positifs, ceux-ci dépendant fortement de la localisation. Ils doivent être étudiés lors du fonctionnement des usines. Ils dépendront fortement du nombre d'usines installées.

✓ Sur les oiseaux

L'impact sur les oiseaux pourrait être un dérangement dans leurs zones d'alimentation et d'habitation.

Les effets sur leur habitat peuvent être dus à la phase de construction (effets temporaires et limités), aux changements d'écosystèmes autour des usines (poissons...) aux bruits liés au fonctionnement et à la maintenance des usines.

4.2.3 Impacts liés aux accidents

Ces impacts seraient dus soit à un accident des véhicules de maintenance (bateaux, hélicoptère...), soit à la collision d'un cargo avec l'usine.

Les conséquences peuvent être très variables selon les éléments accidentés. Le pire étant la collision d'un pétrolier ou d'un chimiquier avec l'usine.

Ces impacts peuvent être limités en minimisant les risques de collision : les usines ne devraient pas être installées, à La Réunion, sur les routes maritimes (qui sont loin au large) et elles doivent être marquées correctement. Des procédures d'urgence devront également être mises en place.

4.2.4 Impact visuel

L'impact visuel dépend de quatre facteurs :

- ✓ La distance offshore d'installation
- ✓ La hauteur de l'usine au dessus du niveau de la mer
- ✓ Les conditions météorologiques
- ✓ La hauteur au dessus du niveau de la mer du point d'observation

Cet impact sera un des points sensibles du développement des usines à La Réunion car :

- ✓ Une grande majorité des Réunionnais habitent à moins d'une dizaine de kilomètre de la côte.
- ✓ Les usines, même offshore, seront relativement proches de la côte (moins de 3km)
- ✓ L'île est un jeune volcan dont le point culminant est à 3071m. De presque tous les hauts de l'île, la mer est visible. Les points d'observation en altitude sont très nombreux.

Il est à l'heure actuelle très difficile de quantifier l'impact visuel, celui dépendant très fortement de la technologie employée.

Lors du développement des projets, afin de minimiser les résistances du public, il est conseillé de suivre quelques recommandations :

- ✓ Les usines doivent être installées aussi loin que possible de la côte et des aires récréationnelles ou touristiques
- ✓ Une évaluation de l'influence sur l'économie (tourisme) doit être réalisée
- ✓ L'implication des populations locales aux prises de décision est essentielle

4.2.5 Impact sonore

L'impact sonore dépendra fortement de la localisation de l'usine.

Les installations offshore devraient avoir un impact sonore très limité sur l'homme.

L'impact sonore aérien et sous marin sur la vie biologique est certain, c'est son niveau qui est actuellement inconnu.

4.2.6 Emissions

Contrairement aux énergies fossiles, la conversion de l'énergie des vagues ne produit aucun gaz à effet de serre ou autres polluants atmosphériques.

Les émissions interviennent dans les autres processus tels que la fabrication, le transport, l'installation...

Pour une usine houlomotrice, les principales étapes du cycle de vie sont :

- ✓ Extraction des ressources primaires
- ✓ Transport des ressources primaires
- ✓ Fabrication des matériaux
- ✓ Fabrication des composants
- ✓ Transport des composants
- ✓ Construction de l'usine
- ✓ Installation de l'usine
- ✓ Utilisation de l'usine
- ✓ Démantèlement de l'usine
- ✓ Recyclage ou destruction des matériaux

La phase durant laquelle les émissions sont maximales est la phase de fabrication des matériaux.

En conclusion, les recommandations générales sont :

- ✓ Concernant les poissons, oiseaux et mammifères marins d'identifier et par conséquent d'éviter les zones sensibles, d'éviter les travaux sur site durant les périodes sensibles, de

minimiser les niveaux de bruit durant la construction, l'utilisation et le démantèlement de l'usine, et de minimiser les effets des structures et du câblage sur les réserves de poissons.

- ✓ Concernant les sols marins et la vie biologique associée, de minimiser la sédimentation et la turbidité artificielle
- ✓ Concernant l'hydrodynamique côtière, d'analyser les effets sur les courants littoraux, le climat de houle et l'érosion des côtes.
- ✓ Concernant la qualité des eaux, d'éviter l'utilisation de produits chimiques polluants pour protéger les installations contre les biosalissures (cf. chapitre suivant).
- ✓ Concernant le bruit, de limiter au maximum les émissions.

4.2.7 Impact de l'environnement sur les usines houlomotrices

Les impacts de l'environnement sur les usines houlomotrices vont dépendre fortement du type d'usine et de sa localisation.

Cinq aspects de ces impacts vont être développés ci-après : la sensibilité aux courants, au vent, aux biosalissures, aux dépôts et à la corrosion.

Sensibilité aux courants :

Pour les usines offshore, les courants ne devraient pas être un problème. Les usines sur ou près de la côte seront plus sensibles.

Sensibilité au vent :

Ce sujet ne devrait pas être une barrière puisque le comportement aérodynamique des structures, notamment flottantes, peut être pris en compte lors du design. La Réunion étant soumise régulièrement à des épisodes cycloniques, l'occurrence de vents violents doit être pris en compte. Une étude précise de ces épisodes et des vents associés va être menée et est décrite dans le chapitre « Vagues extrêmes et cyclones ».

Sensibilité aux bio-salissures :

Ce sujet est un thème important de recherche, pour ce qui concerne les biosalissures dans les turbines mais aussi en général. Les systèmes doivent être traités et maintenus pour éviter une perte de rendement au cours du temps.

Les mesures doivent être développées et pourront inclure des peintures anti-fouling connues dans les industries navales, ou des injections de biocides type chlore. Il n'est pas certain que l'injection de telles substances, qui seront diluées en pleine mer, ait un impact néfaste mais il s'agit de faire attention à ce que le chlore ne réagisse pas pour former des éléments chlorés pouvant s'accumuler dans des organismes vivants. D'autres technologies sont à l'étude notamment à l'Ifremer Bretagne.

Sensibilité aux dépôts sédimentaires et autres

L'intrusion de corps étranger dans les parties en mouvement de l'usine ou dans les conduits peut entraîner une perte de rendement important. La sensibilité des usines aux dépôts est donc importante. Des mesures relativement simples doivent être mises en place.

Sensibilité à la corrosion

En utilisant des technologies offshore standard les effets de la corrosion peuvent être calculés. En suivant des normes instaurées dans les constructions offshore, les problèmes dus à la corrosion peuvent être évités.

4.3 Matériaux et technologies utilisées

4.3.1 Matériaux

Les développeurs d'usines houlomotrices s'attachent à utiliser des matériaux standards.

Ils s'inspirent aussi bien des techniques de la construction navale que des industries offshore.

Les matériaux les plus utilisés dans les usines houlomotrices sont l'acier, le béton et les plastiques traditionnels. Le fer présente des avantages en termes de coût, de disponibilité, et de facilité d'utilisation. Néanmoins, des problèmes certains existent notamment dus à la corrosion. Le béton armé présente de nombreux avantages face à ce problème.

L'ouverture et la croissance des marchés de l'énergie des vagues dépend fortement de la capacité à construire localement les usines houlomotrices qui doivent être relativement simple à construire et doivent utiliser des matériaux disponibles dans la majorité des pays.

4.3.2 Les turbines et générateurs

Selon les technologies, la transformation de l'énergie des vagues passe par :

- ✓ Des turbines à air (système OWC)
 - Turbine Well
 - Turbine Deniss-Auld
- ✓ Des turbines hydrauliques
 - Turbines Kaplan, généralement
 - Turbine Pelton (AquaEnergy Group)

Une turbine est un moteur rotatif entraîné par une veine d'eau qui transforme la plus grande partie de l'énergie hydraulique en énergie mécanique.

La turbine Pelton est utilisée pour des hautes chutes (10 à 500 m) et des faibles débits (20 à 1000 l/s). Elle est équipée d'augets en forme de cuillère qui sont placés autour de la roue et reçoivent l'eau par l'intermédiaire d'un ou plusieurs injecteurs.

Ces injecteurs permettent de régler l'arrivée de l'eau même en cas de fortes variations du débit et de conserver à l'ensemble un rendement très appréciable. Sa vitesse de rotation est comprise entre 500 et 1500 tr/min ce qui a l'avantage de permettre une liaison directe entre la turbine et la génératrice et d'avoir ainsi un encombrement réduit.

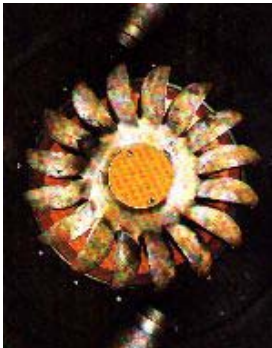


Figure 4.3-1: Turbine Pelton

Les turbines Kaplan et hélices sont les plus appropriées pour le turbinage des faibles chutes (moins de 10 m) et des débits importants (300 à 10 000 l/s). Elles se caractérisent par leur roue qui est similaire à une hélice de bateau dont les pales sont réglables en marche (Kaplan) ou fixes

(hélices). L'eau est dirigée vers le centre de la roue par un distributeur orientable ou fixe. A la sortie un aspirateur permet de limiter les effets de turbulence. Ces turbines dont la vitesse de rotation est faible présente l'avantage d'avoir de très bons rendements.



Figure 4.3-2: turbine Kaplan

Une fois mise en mouvement une turbine entraîne, directement ou par l'intermédiaire d'un multiplicateur, un générateur de courant, qui transforme l'énergie mécanique disponible sur l'arbre en énergie électrique. Il existe trois types de générateurs.

La génératrice à courant continu

La production de courant continu n'est envisageable que dans peu de cas. Bien sûr elle est à exclure lorsqu'il y a vente au réseau EDF. Par contre, si l'énergie est produite pour un usage domestique, elle est envisageable pour le chauffage et l'éclairage. Le principal avantage de la génératrice à courant continu, outre son faible prix, est que sa production peut être stockée dans des batteries. Enfin il est à noter qu'on peut convertir du courant continu en alternatif avec un onduleur, mais cet appareillage est généralement coûteux.

La génératrice synchrone

Cette génératrice de courant est aussi appelée alternateur. Sa caractéristique vient du fait que la fréquence du courant produit est imposée par la vitesse de rotation du rotor, qui doit donc rester constante pendant la période d'exploitation. Cette machine est généralement utilisée lorsque l'installation est conçue pour de l'autoconsommation. Pour ce type d'installation, en effet, son système de réglage des caractéristiques du courant (tension, fréquence...) est bien adapté. Enfin la génératrice synchrone a de bons rendements, mais son prix pour les faibles puissances est moins intéressant que celui des autres types de générateurs.

La génératrice asynchrone

C'est la génératrice la plus répandue, car elle est simple de construction, robuste et d'un coût avantageux. Elle est essentiellement utilisée lorsque la centrale est prévue pour une vente à EDF, car dans ce cas elle est pilotée par le réseau qui régule la fréquence et la tension du courant produit. Enfin il est à noter que les rendements de la génératrice asynchrone sont moins intéressants que ceux de l'alternateur.

5 Enjeux et intérêts de l'énergie des vagues sur l'île de La Réunion

5.1 Les contraintes réglementaires : le cas d'un projet d'implantation en mer

Tout projet d'implantation d'unités de production d'électricité est soumis au respect d'un certain nombre de procédures administratives. Cette note, qui ne peut en aucun cas être considérée comme exhaustive et ne préjuge en rien des décisions en opportunité, vise à rappeler les démarches administratives principales à respecter en particulier sur le domaine public maritime¹.

Les points liés aux règles d'urbanisme sont donnés à titre indicatif et sous toute réserve. Cette note est indissociable de l'annexe 5 qui donne une brève présentation de la consistance du domaine public maritime, ainsi que des principes applicables à sa gestion.

5.1.1 Procédures sur le domaine public maritime (DPM)

Une brève présentation de la consistance du DPM est donnée en annexe. Cette présentation rappelle en particulier les principes applicables à la gestion du DPM.

Titre d'occupation domanial, redevance, assentiment du préfet maritime

Dans le cas d'une d'implantation sur le domaine public maritime, l'opération devra impérativement faire l'objet d'un titre domanial d'occupation, assorti d'une redevance.

Ce titre concerne aussi bien les pylônes que leur raccordement à terre. Compte tenu du caractère durable de l'installation et de son intérêt général, la concession d'endigage et d'utilisation des dépendances du domaine public maritime est sans doute la formule la mieux adaptée au projet (décret n° 79-518 du 29 juin 1979).

Le préfet est compétent pour délivrer les titres d'occupation sur le domaine public maritime. Il faut cependant noter que le préfet n'est jamais tenu d'accorder un tel titre.

La demande de concession est instruite par le service maritime, ou le directeur du port autonome si l'installation se situe dans la circonscription d'un tel établissement public, et ceci avant même le dépôt du permis de construire au titre de l'urbanisme. Les demandes de concessions sont généralement soumises à enquête publique. Ce titre, s'il est accordé, s'accompagne d'une redevance, fixée par le directeur des services fiscaux sur proposition du service gestionnaire (ou par le directeur du port autonome, dans la circonscription portuaire).

Il conviendra de prévoir dans le cahier des charges, dans la mesure où le projet aboutit, l'enlèvement des installations et la remise du site dans son état initial, lorsqu'il sera mis fin à l'exploitation. Des garanties financières peuvent être exigées par l'Etat à cet effet. Le cahier des charges du titre d'occupation domaniale devra prévoir également un dispositif de suivi et de contrôle des prescriptions (Ex : vérification annuelle de l'enfouissement des câbles, etc.)

Selon les dispositions de l'article R152-1 du code du domaine de l'Etat, l'assentiment du préfet maritime est requis.

Urbanisme

Les dispositions valables à terre s'appliquent en mer : « Quiconque désire entreprendre ou implanter

¹ Cette note ne traite pas de la question des raccordements aux réseaux RTE ou EDF.

une construction à usage d'habitation ou non, même ne comportant pas de fondations, doit, au préalable, obtenir un permis de construire. Ce permis n'est pas non plus exigé pour les ouvrages qui, en raison de leur nature ou de leur très faible dimension, ne peuvent être qualifiés de constructions au sens du présent titre. »²

De plus, dans la mesure où il s'agit généralement d'ouvrages de production d'énergie pour revente, la décision relative à l'occupation du sol et au certificat de conformité est prise par le préfet selon les dispositions de l'article R 490-3 du code de l'urbanisme³. La demande est instruite par le service de l'Etat chargé de l'urbanisme dans le département.

Sur le domaine public maritime, le titre d'urbanisme comme l'autorisation domaniale doivent respecter les règles d'urbanisme, qu'il s'agisse des règles contenues dans le document d'urbanisme en vigueur ou des règles générales d'urbanisme. (Application de la jurisprudence SCHWETZOFF, Conseil d'Etat, 30 mars 1973 -Concession d'endiguage et concession d'un port de plaisance à Bormes-les-Mimosas non compatibles avec le programme approuvé).

Enfin, selon des interprétations concordantes de l'arrêt du Conseil d'Etat Saint Quay Portrieux, 20 février 1981, le territoire des communes se poursuit bien en mer.

Le maître d'ouvrage doit respecter les règles d'urbanisme :

· S'il y a un plan local d'urbanisme (PLU, ex POS), celui-ci doit prévoir les conditions dans lesquelles les constructions peuvent être autorisées (Articles R123-1 et suivants) ;

En l'absence de PLU, les articles R111-1 et suivants du code de l'urbanisme s'appliquent.

5.1.2 Urbanisme - Sites et paysages

L'article R111-21 du code de l'urbanisme⁴ a une portée très générale. Les constructions de par leur dimension peuvent être concernées. L'application de cet article peut conduire le préfet à édicter des dispositions spéciales dans certains cas, voire à refuser le permis.

Etude d'impact et enquête publique

Les dispositions valables à terre en matière d'études d'impact s'appliquent en mer. Si le coût du projet

² Article L421-1 (Extraits)

³ (inséré par Décret n° 83-1261 du 30 décembre 1983 art. 39 Journal Officiel du 7 janvier 1984 date d'entrée en vigueur 1 avril 1984)

Les décisions relatives aux autorisations d'occupation ou d'utilisation du sol et le certificat de conformité concernant l'édification d'ouvrages de production, de transport, de distribution et de stockage d'énergie ainsi que les travaux effectués sur ces ouvrages sont prises, sous réserve des dispositions de l'article R. 490-4 :

1° Par le commissaire de la République, au nom de l'Etat, lorsque cette énergie n'est pas destinée, principalement, à une utilisation directe par le demandeur de l'autorisation ou de l'acte sollicité ;

2° Dans les autres cas, par l'autorité compétente pour statuer au nom de la commune, de l'établissement public de coopération intercommunale ou de l'Etat, dans les conditions de droit commun.

⁴ Article R111-21 du code de l'urbanisme : « Le permis de construire peut être refusé ou n'être accordé que sous réserve de l'observation de prescriptions spéciales si les constructions, par leur situation, leur architecture, leurs dimensions ou l'aspect extérieur des bâtiments ou ouvrages à édifier ou à modifier, sont de nature à porter atteinte au caractère ou à l'intérêt des lieux avoisinants, aux sites, aux paysages naturels ou urbains ainsi qu'à la conservation des perspectives monumentales. »

est supérieur à 1,9M€, il devra faire l'objet d'une étude d'impact (loi n° 76-629 du 10 juillet 1976 - décret n° 77-141 du 12 octobre 1977) qui examinera notamment les aspects liés aux ressources halieutiques et à leur exploitation. Les projets d'un montant inférieur sont dispensés de la procédure d'étude d'impact ; le maître d'ouvrage est dans ce cas tenu de fournir une notice indiquant les incidences éventuelles du projet sur l'environnement et les conditions dans lesquelles l'opération projetée satisfait aux préoccupations d'environnement.

En matière d'enquêtes publiques, les projets en mer entrent généralement dans des rubriques existantes du décret du 23 avril 1985 dit « décret Bouchardeau » (Par exemples : rubrique 14°, rubrique 35° b).

Loi littoral

Outre les dispositions d'urbanisme de la loi littoral, des dispositions particulières s'imposent tant sur le domaine public maritime, que sur le rivage.

En tant qu'il modifie substantiellement l'utilisation d'une zone du domaine public maritime, le projet sera soumis, aux termes de l'article L. 321-5 du code de l'environnement (Ex article 25 de la loi « littoral »), à enquête publique (Enquête publique dite loi Bouchardeau) suivant les modalités de la loi n° 83-630 du 12 juillet 1983 relative à la démocratisation des enquêtes publiques et à la protection de l'environnement (articles L 123-4 à L 123-16 du code de l'environnement).

Sur le rivage de la mer (Domaine public maritime naturel), l'article 27 de la loi littoral (devenu l'article L321-6 du code de l'environnement 8) prohibe, sauf pour quelques exceptions, de porter atteinte à l'état naturel du rivage.

Dispositions particulières d'urbanisme -SMVM

Les Schémas de Mise en Valeur de la Mer (SMVM) ont été institués par la loi du 7 janvier 1983, complétée par l'article 18 de la « loi littoral » du 3 janvier 1986. Leur contenu et la procédure de leur élaboration ont été précisés par un décret du 5 décembre 1986.

Les SMVM portent sur une partie de littoral qui présente une unité géographique et maritime : un bassin ou une rade par exemple. Ils ont pour objet de préciser la vocation de cet espace et d'assurer la cohérence entre ses différents usages et notamment entre la protection de l'environnement et le développement économique.

La loi a donné une place relativement importante à ces instruments dans la hiérarchie des normes juridiques qui se traduit par un décret en Conseil d'Etat ; ils ont les mêmes effets que les Directives Territoriales d'Aménagement (DTA).

Les Schémas d'Aménagement Régionaux (SAR) concernant les Départements d'Outre-mer et la Corse comportent un chapitre individualisé valant Schéma de Mise en Valeur de la Mer.

Loi sur l'eau

Ces travaux sont éventuellement soumis, en fonction de critères de surfaces et de seuils financiers ou d'impact sur le milieu, à la nomenclature mer de la loi sur l'eau (Rubriques 3.3.1. et 3.3.2. du décret modifiant la nomenclature mer du 23 février 2001, JO du 27 février 2001).

La loi sur l'eau a été codifiée dans le code de l'environnement et notamment dans ses articles L. 214-1 à L. 214-6 et L. 218-42 à L. 218-58 .

Commission nautique

En mer, le projet doit être examiné par la commission nautique locale (décret n° 86-606 du 14 mars 1986) notamment sous l'aspect des dispositifs de signalisation à prévoir. Dans certains cas, la grande commission nautique doit également être consulté (dimension du chantier de construction, localisation à proximité d'un port, haute densité de trafic).

Circulation maritime, sécurité générale

Le Préfet Maritime est compétent pour étudier la compatibilité des installations en mer avec la navigation et prendre les décisions réglementaires qui s'imposent (décret n° 78-272 du 9 mars 1978 relatif à l'organisation des actions de l'Etat en mer). Ainsi, toute installation pouvant gêner la circulation de la navigation est interdite, d'une façon générale, dans les dispositifs de trafics séparés et aux abords des accès aux ports (chenaux, passes). Elle n'est admise qu'avec beaucoup de précautions ailleurs. En cas d'autorisation, il sera nécessaire de :

- prévoir une zone d'interdiction des mouillages et des pêches (arrêté du préfet maritime), autour et à l'intérieur du quadrilatère d'implantation.
- Respecter toutes les servitudes maritimes (câbles sous-marins, zones non déminées, gazoducs.).

Baliser la zone, au regard de la navigation (de commerce et de pêche) et des activités nautiques de loisirs.

Suivant les cas, le maître d'ouvrage peut être amené à prendre l'attache des instances de la Marine nationale et de l'aviation civile compte tenu de perturbations éventuelles causées aux radars et aux émissions radioélectriques par la centrale éolienne qui risquent de porter atteinte à la sécurité du passage maritime ou de la circulation aérienne dans la zone considérée.

Procédures en mer en dehors des eaux territoriales

En préambule, outre les aspects liés à la sécurité maritime, le câble de raccordement au territoire français (qui sera donc enfoui dans le DPM) devra faire l'objet d'un titre domanial d'occupation, assorti d'une redevance.

Les implantations au-delà des 12 milles en mer peuvent se faire en ZEE (Zone Economique Exclusive ; zone économique pouvant s'étendre depuis la limite des eaux territoriales jusqu'à 188 milles marins au-delà de cette limite), sur le plateau continental au delà de la ZEE ou même en l'absence de ZEE sur un plateau continental dépendant de la France.

La convention des Nations unies sur le droit de la mer, faite à Montego Bay le 10 décembre 1982, est entrée en vigueur en France le 11 mai 1996. Cette convention précise notamment les droits et obligations des Etats-membres dans cette ZEE, qui ne peut s'étendre à plus de 200 milles marins des lignes de base à partir desquelles est déterminée la mer territoriale.

Pour sa part, la République Française s'était dotée par la loi n°76-655 du 16 juillet 1976, d'une zone économique large de 188 milles marins s'étendant à partir et au-delà de la mer territoriale dont la largeur a été fixée à 12 milles marins. Dans cette zone, la République Française exerce des droits

souverains en matière d'exploration et d'exploitation des ressources naturelles, biologiques et non biologiques du fond de la mer, de son sous-sol et des eaux sur jacentes.

Les dispositions de la loi 68-1181 du 30 Décembre 1968 relative à l'exploration du plateau continental et à l'exploitation de ses ressources naturelles 10 ainsi que son décret d'applications n° 71-360 du 6 Mai 1971 portant application de la loi n° 68-1181 du 30 décembre 1968 relative à l'exploration du plateau continental et à l'exploitation de ses ressources naturelles trouvent à s'appliquer sur les plateaux continentaux. La loi 76-655 du 16 Juillet 1976 relative à la zone économique au large des côtes du territoire de la République s'applique en ZEE.

Le décret régit également la question de la « signalisation des installations et dispositifs » et la « transmission des informations nautiques ».

5.2 La production possible

Donner d'ores et déjà l'estimation possible de la production électrique à partir de l'énergie des vagues en 2025 est un exercice périlleux. Très peu de retour d'expériences sur des technologies dimensionnées à des ressources comme celles de La Réunion sont disponibles. Les usines houlomotrices actuelles ne seront matures que d'ici cinq à dix ans.

Cependant on peut imaginer l'installation d'une dizaine ou vingtaine d'usine offshore de 2MW au large de Saint Phillippe et Saint Joseph.

Une puissance installée de 40 à 60 MW à l'horizon 2025 est une perspective qui semble réalisable mais sujette à de nombreux aléas qu'ils soient politiques, financiers ou techniques.

5.3 Les secteurs d'activité liés à la filière

✓ Construction de l'usine

Les développeurs s'attachent à utiliser des matériaux standard dans la construction des usines

Les entreprises intéressées par la construction de l'usine devraient donc être des entreprises spécialisées dans la construction d'ouvrages en béton armé, en fer ou en plastique pour certaines usines.

Si la construction de l'usine doit se faire directement en mer (pour des usines near-shore par exemple) des entreprises de travaux maritimes devront être recommandées. A La Réunion, SGTPS et Hydrocast réalisent des ouvrages en mer.

✓ Déploiement en mer

Le déploiement en mer de l'usine (dans le cas d'une usine offshore) fait appel à des services portuaires et des entreprises de transports maritimes. Celles-ci existent dans les zones portuaires du Port

L'installation du câble sous-marin devra être réalisée par une entreprise spécialisée. La Réunion ne semble pas avoir de telles entreprises mais les entreprises de travaux maritimes sont peut être capable de réaliser cette installation.

✓ Production d'électricité

Les installations électriques et la connexion aux réseaux pourront être assurées par des entreprises réunionnaises spécialisées dans le génie électrique. Un accord avec le distributeur locale d'électricité, le SIDLEC ou avec RTE devra être signé pour la revente de l'électricité.

✓ Maintenance

La maintenance pourra être réalisées par les entreprises de génie électriques pour les parties électriques, des entreprises de mécaniques de précision pour ce qui est des turbines et par des entreprises de travaux maritimes.

5.4 La revente de l'énergie des vagues

Le seul texte qui existe est l' »Arrêté du 25 juin 2001 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie hydraulique des lacs, cours d'eau et mers ». Après renseignements auprès de la Commission de Régulation de l'Energie, il n'existe aucun tarif spécifique pour l'énergie houlomotrice. La CRE m'indique toute fois que d'après « L'arrêté hydraulique du 25 juin 2001 concernant les lacs, cours d'eau et mer, on peut effectivement en déduire qu'un projet "énergie des vagues" se verra appliqué le tarif correspondant. »

Le tarif de rachat de l'électricité serait donc de 5,49 à 6,1 c€/kWh (36 à 40 cF/kWh) selon la puissance, plus une prime comprise entre 0 et 1,52 c€/kWh (10 cF/kWh) en hiver selon régularité de la production. Des conditions spéciales peuvent s'appliquer aux DOM.

C'est aujourd'hui le seul élément de réponse que l'on ait.

Conclusion

L'île de La Réunion présente des avantages certains pour l'exploitation de la houle. Les fonds marins de l'île remontent très vite et évitent ainsi aux houles une déperdition d'énergie importante. A partir de données du centre européen de prévision issues de la « réanalyse » ERA40, la ressource offshore a été calculée statistiquement et s'est avérée être 26kW/m dans la zone sud de l'île. Ce chiffre, d'après les données actuelles des constructeurs permettrait l'installation d'usines de production d'électricité allant jusqu'à 4MW. L'île possède en outre des entreprises spécialisées pouvant s'adapter à la filière énergie des vagues et une forte volonté politique d'atteindre l'indépendance énergétique en 2025.

Reste aux développeurs de concrétiser, dans les années qui viennent, leurs projets d'usines houlomotrices avec les rendements, les puissances et les coûts annoncés. Ceci est sûrement le cap le plus dur à franchir pour la filière mais ne semble pas être une utopie. Les investisseurs, prenant en compte les études de La Région Réunion, s'intéresseront à l'île qui pourrait devenir une référence dans l'exploitation de l'énergie houlomotrice.

Annexe 1 : Cahier des charges Etude la houle côtière

Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et des Travaux

Aide à la décision pour l'investissement dans la filière Energie des Vagues à la Réunion

Etude de la houle côtière de l'île de La Réunion par simulations numériques
Cahier des charges

Version du 05/09/2003

SOMMAIRE

1. Introduction
2. Règles générales
3. Etats des lieux
4. Objectif de l'étude
5. Contenu de l'étude
6. Qualité de la prestation
 - Qualité du rapport
 - Qualité des méthodes de calcul
7. Devoir du maître d'ouvrage
8. Propriété des résultats
9. Coût de la prestation
10. Durée de l'étude
11. Maîtrise d'ouvrage de l'étude
12. Liste des documents joints

1. Introduction

L'océan représente une réserve extraordinaire d'énergie. Les technologies visant à convertir l'énergie des vagues se multiplient dans le monde, notamment dans les pays anglo-saxons et scandinaves. La bathymétrie des fonds réunionnais est particulière et laisse supposer un fort potentiel de La Réunion pour cette énergie.

La Région Réunion a affiché sa volonté de faire du développement durable un des points forts de sa politique, elle s'est notamment donnée comme objectif que toute l'énergie électrique produite sur l'île soit d'origine renouvelable à l'horizon 2025.

Afin de contribuer à cet objectif la région Réunion, avec la collaboration de la plateforme R&D de l'ARER, lance les études de la ressource locale en énergie des vagues.

En complément de l'étude des caractéristiques de la houle offshore, le présent cahier des charges définit l'étude numérique de la propagation de la houle jusqu'aux côtes réunionnaises.

2. Règles générales

L'étude devra être réalisée par un intervenant ci-après dénommé "le prestataire", ayant l'indépendance, la compétence nécessaire et les références attestant de cette compétence.

De plus, dans un souci de qualité, le prestataire s'attachera à respecter les règles suivantes :

- suivre une démarche rigoureuse explicitée et justifiée dans son rapport d'étude (notamment pour ce qui concerne le choix du modèle numérique);
- être exhaustif dans ses recommandations et fournir toutes les informations objectives nécessaires à la poursuite de l'étude de potentiel
- ne pas intervenir dans un établissement vis-à-vis duquel il ne présenterait pas toute garantie d'objectivité, notamment sur des installations conçues, réalisées ou gérées pour l'essentiel par lui-même ;
- n'adjoindre aucune démarche commerciale concernant des biens ou services (ayant un lien avec les recommandations) au cours de son intervention.

3. Etat des lieux

L'ARER a organisé au sein de sa plateforme R&D 2003 une analyse de la filière « Energie des vagues sur les côtes réunionnaises ».

En association avec MétéoFrance, l'ARER a réalisé l'étude de la ressource offshore. Sur une zone s'étendant de 19.5°S à 22.5°S et de 54°E à 57°E, en chaque points d'un maillage de pas en espace de 1.5°, les données relative aux hauteurs significatives Hs (Hs est une longueur), aux périodes Te (Te est un temps) et aux directions θ (exprimée en degré indique la direction d'origine) du champ de vagues général, de la houle primaire et des vagues de vents (paramètres météorologiques SWH, MWP, SHWW, MPWW, SHPS, MPPS, MWD, MDWW, MDPS)* seront analysées et interprétées pour faire ressortir les houles représentatives de la zone océanique de l'île de la Réunion.

* : cf annexe 1-glossaire

4. Objectifs de l'étude

La méthode retenue par la Région Réunion est le découpage de la côte réunionnaise en zones d'études modélisées par des segments. Chacun de ces segments présente une orientation azimutale propre et les phénomènes dispersifs (réfraction, shoaling,...), et par conséquent le potentiel en énergie des vagues, sont considérés, par approximation, comme uniformes le long de ces segments.

Le nombre de segments retenu est de 8, compromis entre réalité physique des approximations et coût de calcul.

Ces segments sont définis précisément en annexe 2.

L'étude a pour but de caractériser précisément la houle côtière et de formaliser les pertes d'énergie, les réflexions, réfractions et diffraction de la houle susceptible d'être induites par la remontée des fonds marins le long ces zones d'études. Cette étude de la réfraction et de la diffraction permettra de connaître des points chauds (hot spot) c'est-à-dire des points où l'énergie des vagues devrait être concentrée.

5. Contenu de l'étude

L'étude consiste en la réalisation de 6 simulations numériques.

Chaque simulation modélisera la propagation en eau peu profonde* d'une houle offshore sur un segment de côte.

(*: cf. glossaire)

La description précise de chaque segment de côte est donnée en annexe 2 de ce document

La bathymétrie associée à chaque segment de côte est donnée, en document joint, sous forme de fichier Excel donnant la profondeur pour un couple (latitude,longitude) donné.

Le prestataire devra représenter la bathymétrie chaque zone d'étude grâce aux données bathymétrique transmis au titulaire. Une modélisation de cette bathymétrie c'est-à-dire une extrapolation à partir des données fournies devra être réalisée par le prestataire. Le choix du pas en espace de la modélisation de la bathymétrie est laissé à l'appréciation du prestataire. Le pas choisi devra permettre au modèle numérique de propagation d'atteindre la précision nécessaire à l'obtention des informations demandées par le présent cahier des charges. Le pas devra être compris entre 100m et 1.5km.

Le modèle de propagation en eau peu profonde qui sera utilisé pour l'étude sera proposé par le prestataire dans son offre mais une préférence pour le modèle SWAN est faite.

Les paramètres de chaque simulation sont :

- ✓ la hauteur significative,

- ✓ la période significative
- ✓ et la direction de la houle que l'on souhaite propagée
- ✓ le numéro du segment sur lequel on veut connaître le potentiel en énergie des vagues.

L'ensemble des simulations devant être réalisées par le prestataire sont récapitulées dans le tableau suivant :

Simulation numérique n°	Houle offshore	Segment de côte n°
1	Hs=2 ; Te=10.5 ; $\Theta= 180^\circ$	1
2	Hs=2 ; Te=10.5 ; $\Theta= 180^\circ$	2
3	Hs=2 ; Te=10.5 ; $\Theta= 180^\circ$	3
4	Hs=12 ; Te=22 ; $\Theta= 200^\circ$	1
5	Hs=12 ; Te=22 ; $\Theta= 180^\circ$	2
6	Hs=12 ; Te=22 ; $\Theta= 160^\circ$	3

L'étude devra fournir au maître d'ouvrage les résultats complets de chacune des simulations numériques en s'attachant, au minimum, à préciser :

- les paramètres caractéristiques de la houle (Hs, Te, Θ)
- le potentiel en énergie des vagues
- les pertes d'énergie

en des points, situés sur un (au minimum) rayon de houle représentatif, à des profondeurs de 80m, 50m, 20m et 10m de profondeur d'eau.

Le prestataire devra également réaliser une analyse précise des phénomènes de réfraction et diffraction afin de proposer à la Région Réunion une liste de sites (latitude/longitude) à fort potentiel en énergie des vagues ou points chauds (hot spot).

6. Qualité de la prestation

Qualités du rapport

Il devra :

- Etre clair et lisible, la forme est importante, elle facilite la décision et incite aux travaux,
- Etre rédigé en français, une synthèse devra être remise en français et en anglais
- Etre utilisable informatiquement par un plus grand nombre de personnes. Le format Excel est exigé pour ce qui concerne le rendu des données numériques.
- Comporter, si nécessaire, des annexes techniques suffisamment complètes
- Faire l'objet d'une présentation en français devant le maître d'ouvrage,

Qualités des méthodes de calcul

Les méthodes et outils de calcul doivent être explicités:

- On donnera impérativement les références du modèle numérique utilisé, les justifications du choix de ce modèle, les hypothèses de calcul éventuellement prises.
- La réalité physique du modèle et des résultats doit être justifiée.
- Les méthodes de calcul des potentiels énergétiques et des pertes en énergie doivent être justifiées et explicitées.

7. Propriétés des résultats

Les résultats de l'étude seront la propriété de la REGION Réunion qui pourra les utiliser pour évaluer la pertinence des procédures ainsi que réaliser des suivis techniques. La REGION Réunion pourra utiliser librement les informations collectées en fiche de synthèse.

8. Devoir du maître d'ouvrage

Le maître d'ouvrage, demandeur de l'étude, a également des obligations à remplir; elles se situent, par rapport à la prestation :

Avant : bien connaître le cahier des charges et donc l'étendue de la prestation à exiger du professionnel, le choisir avec soin en ayant déjà rassemblé toutes informations et documents utiles.

Pendant : accompagner ou faire accompagner le prestataire par la ou les personnes impliquées au quotidien dans la gestion technique de l'étude.

A la remise du rapport : vérifier la conformité de la prestation au cahier des charges.

9. Coût de la prestation

Le prestataire établira un devis détaillé et justifié correspondant au coût de la prestation dans son ensemble, faisant apparaître le nombre de journées de travail, les coûts journaliers du ou intervenants ainsi que les frais annexes.

Le montant ainsi proposé sera forfaitaire, ferme et définitif, et inclura l'ensemble de la prestation telle que définie dans le présent cahier des charges.

Le candidat est autorisé à proposer des variantes par rapport au cahier des charges présenté, à condition qu'il propose également une offre pour la solution de base. Les offres complémentaires seront argumentées et justifiées par rapport à la solution de base.

Il devra fournir une note méthodologique présentant la méthode qu'il entend pour réaliser la mission.

10. Durée de l'étude

Le délai global de réalisation de l'étude est laissé à l'appréciation du prestataire. Un planning des différentes tâches sera fourni avec l'offre du candidat.

Ce délai devra toutefois être inférieur à 4 mois.

11. Maîtrise d'ouvrage de l'étude

Le maître d'ouvrage de l'étude est la Région Réunion, Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et des Travaux

12. Liste des documents transmis au titulaire

✓ **Fichiers Excel de la bathymétrie de La Réunion**

Données contenues dans les fichiers : latitude/longitude/profondeur

Données issues des cartes marines du SHOM :

Carte 7222 - La Réunion Partie Est - Pointe Rivière du Mât à Pointe Marcelin

Carte 7328 - La Réunion Partie Sud - Pointe des chateaux à Pointe Marcelin

Carte 7183 - La Réunion Partie Nord – Point Rivière du Mât à Pointe des Chateaux

Pas du maillage $\approx 1.5 \text{ km} = 0.8 \text{ mille nautique}$

Annexe 1 – Glossaire

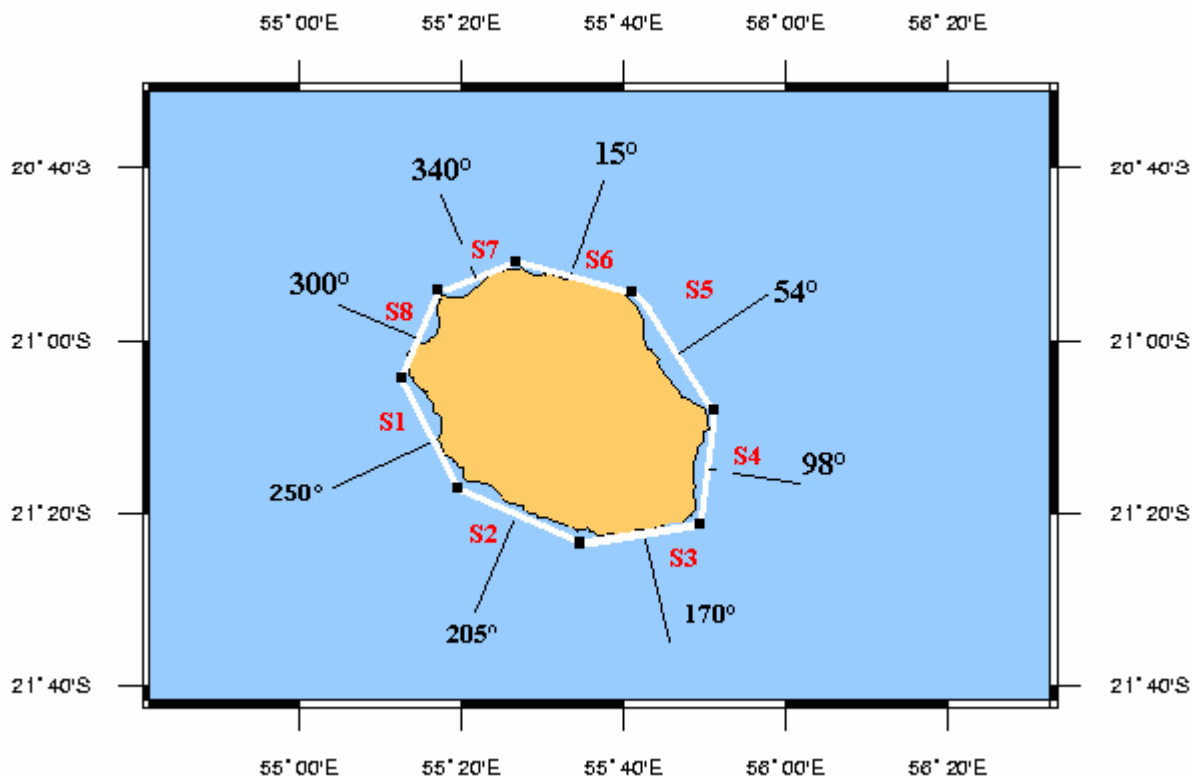
Paramètres :

- SWH: hauteur significative des vagues de la mer du vent et de la houle.
- MWD: direction moyenne des vagues.
- MWP: période moyenne des vagues.
- SHWW: hauteur significative des vagues de la mer du vent.
- MDWW: direction des vagues de la mer du vent.
- MPWW: période moyenne des vagues de la mer du vent.
- SHPS: hauteur significative de la houle primaire.
- MDPS: direction de la houle primaire.
- MPPS: période moyenne de la houle primaire.
- SHSS: hauteur significative de la houle secondaire.
- MDSS: direction de la houle secondaire.
- MPSS: période moyenne de la houle secondaire.
- DD 10m: direction du vent à 10 m.
- FF 10m: vitesse du vent à 10 m.

Eau peu profonde :

Les eaux peu profondes dépendent de chaque vague. Les eaux peu profondes commencent lorsque la vague « ressent le fond ». Dans le cadre de notre étude seront considérées comme peu profonde les eaux ayant une profondeur inférieure Il est commun de considérer les profondeurs d'eau inférieure à la moitié de la longueur d'onde de la vague comme peu profonde.

Annexe 2 : Description des zones d'études



Segment	Description	Longueur	Azimut
---------	-------------	----------	--------

			d'exposition
S1	De Pointe des aigrettes Saint Gilles à Pointe de l'étang Salé	22.4km	250°
S2	Pointe de l'étang salé à Piton Grand Anse	22.2km	205°
S3	Piton Grande Anse à Pointe de la Table	21 km	180°
S4	Pointe de la Table à Pointe de Bellevue	19.5km	98°
S5	Pointe de Bellevue à Bois Rouge	26.5 km	54°
S6	Bois Rouge à Barachois, Saint Denis	19 km	15°
S7	Barachois à la Pointe des Galets	15 km	340°
S8	Pointe des galets à Pointe des aigrettes	14.3 km	300°

Description	Longitude	Latitude
Pointe des aigrettes, Saint Gilles	55°13.1'E	21°02.2'S
Pointe de l'étang salé	55°20'E	21°16.2'S
Piton Grand Anse	55°32.9'E	21°22.4'S
Pointe de la Table	55°48.5'E	21°19.9'S
Pointe de Bellevue	55°49.5'E	21°8.6'S
Pointe de Bois Rouge	55°39'E	21°55'S
Pointe des jardins/Barachois, Saint Denis	55°26.9'E	21°52.3'S
Pointe des galets	55°17.3'E	21°55.2'S

Liste des documents joints :

✓ **Fichiers Excel de la bathymétrie de La Réunion**

Données contenues dans les fichiers : latitude/longitude/profondeur

Pas de maillage $\approx 1.5 \text{ km} = 0.8 \text{ mille nautique}$

Annexe 2 : Cahier des charges - Pré diagnostic environnemental et réglementaire

Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et des Travaux

Aide à la décision pour l'investissement dans la filière Energie des Vagues à la Réunion

- Détermination de sites éventuels d'implantation d'une usine houlomotrice du point de vue environnemental, réglementaire, et de proximité des réseaux

Cahier des charges

Version du 05/09/2003

SOMMAIRE

1. Introduction
2. Règles générales
3. Objectif de l'étude
4. Contenu de l'étude
5. Qualité de la prestation
 - Qualité du rapport
 - Qualité des méthodes
6. Devoir du maître d'ouvrage
7. Propriété des résultats
8. Coût de la prestation
9. Durée de l'étude
10. Maîtrise d'ouvrage de l'étude
11. Documents à disposition du prestataire

1. Introduction

L'océan représente une réserve extraordinaire d'énergie. Les technologies visant à convertir l'énergie des vagues se multiplient dans le monde, notamment dans les pays anglo-saxons et scandinaves. La bathymétrie (profondeur) des fonds réunionnais est particulière et laisse supposer un fort potentiel de La Réunion pour cette énergie.

La Région Réunion a affiché sa volonté de faire du développement durable un des points fort de sa politique. Elle s'est notamment donnée comme objectif que toute l'énergie électrique produite sur l'île soit d'origine renouvelable à l'horizon 2025.

Afin de contribuer à cet objectif la Région Réunion lance des études pour aider le développement de la filière « Energie des vagues » à la Réunion.

Des usines houlomotrices sont en développement dans le monde et pourraient s'appliquer à La Réunion.

La Région Réunion a donc lancé des études pour connaître le potentiel de l'île en énergie des vagues : il s'agit d'études sur les caractéristiques de la houle.

Elle souhaite parallèlement connaître les sites terrestres susceptibles d'accueillir les infrastructures liées à l'implantation d'une usine houlomotrice. Ce présent cahier définit donc cette étude : l'étude de la côte terrestre réunionnaise sur des critères environnementaux, réglementaires et de proximité des réseaux.

2. Règles générales

L'étude devra être réalisée par un intervenant ci-après dénommé "le prestataire", ayant l'indépendance, la compétence nécessaire et les références attestant de cette compétence.

De plus, dans un souci de qualité, le prestataire s'attachera à respecter les règles suivantes :

- suivre une démarche rigoureuse explicitée et justifiée dans son rapport d'étude (notamment pour ce qui concerne le choix du modèle numérique);
- être exhaustif dans ses recommandations et fournir toutes les informations objectives nécessaires à la poursuite de l'étude de potentiel
- ne pas intervenir dans un établissement vis-à-vis duquel il ne présenterait pas toute garantie d'objectivité, notamment sur des installations conçues, réalisées ou gérées pour l'essentiel par lui-même ;
- n'adjoindre aucune démarche commerciale concernant des biens ou services (ayant un lien avec les recommandations) au cours de son intervention.

3. Objectifs de l'étude

L'étude a pour but de déterminer un nombre fini de sites dont les caractéristiques environnementales, réglementaires et de proximité des réseaux routier et électrique permettraient l'implantation d'une usine houlomotrice (soit onshore, soit offshore).

Ces sites sont à définir en fonction de leur capacité à accueillir soit l'usine houlomotrice elle-même et le matériel de connexion au réseau dans le cas d'un système onshore, soit le matériel de connexion au réseau dans le cas de systèmes offshore (câble enterré, transformateur,...). L'étude consiste donc à déterminer des sites côtiers adéquats pour la construction de telles infrastructures.

4. Contenu de l'étude

L'étude portera sur trois points :

- L'environnement (milieu naturel, risques naturels, accueil du public...)
- La réglementation
- La proximité des réseaux routiers et de distribution d'électricité

Le prestataire devra établir une liste des critères pertinents permettant la discrimination des sites.

Ces critères seront organisés en deux classes :

- Les critères discriminants
- Les critères hiérarchisants

Les critères caractérisant, sans conditions, la faisabilité technique du projet d'installation d'une usine houlomotrice seront considérés comme discriminants (exemple, le critère d'appartenance à une ZNIEFF de type 1 est discriminant).

Les critères caractérisant, avec conditions, la faisabilité technique du projet ou caractérisant la facilité de mise en œuvre du projet seront considérés hiérarchisants.

Les critères relatifs à l'étude environnementale porteront sur les contraintes environnementales liées à l'état initial du site. Le prestataire devra s'attacher, a minima, à déterminer les contraintes liées à la faune, à la flore, au bruit, à l'eau et aux sols à partir des documents de référence et à ses visites sur le site. Une étude des risques naturels devra être réalisée. Une approche de l'impact négatif possible sur les aspects économiques (notamment tourisme) sera faite.

Les critères relatifs à la réglementation porteront à minima sur le SAR, la loi littorale, le SDAGE, le PLU des communes concernées, les servitudes terrestres et aériennes, le droit du sol.

Le prestataire pourra élargir l'étude réglementaire à d'autres documents de référence avec l'accord du maître d'œuvre.

L'étude ne portera pas sur une analyse précise du foncier.

Les critères relatifs aux réseaux porteront sur la proximité du réseau routier, sur sa capacité (taille et poids maximaux des véhicules), sur la proximité des points d'injection sur le réseau de distribution d'électricité et sur la capacité de celui-ci à recevoir de l'énergie supplémentaire. Ces critères seront hiérarchisants.

La zone d'étude est la zone côtière (jusqu'à 300m du rivage) comprise entre Saint Gilles (pointe des Aigrettes) et Sainte Phillippe (Pointe de la Table).

La taille d'un site est variable. Les limites de chacun des sites proposés seront déterminées par le prestataire.

L'étude devra comporter des visites des sites pour confronter la réalité physique aux critères retenus pour l'étude.

A la vue des critères proposés, l'étude devra fournir comme résultat une liste de sites appropriés à l'implantation de systèmes de conversion de l'énergie des vagues ainsi qu'une description de ces sites. Une note relative à l'impact visuel de l'implantation d'infrastructures sera mise en complément.

Une hiérarchisation de ce nombre fini de sites sera effectuée et les conditions de faisabilité et de facilité de mise en œuvre seront clairement explicitées.

5. Qualité de la prestation

Qualités du rapport

Il devra :

- Etre clair et lisible, la forme est importante, elle facilite la décision et incite aux travaux,
- Etre rédigé en français, une synthèse devra être remise en français et en anglais
- Etre utilisable informatiquement par un plus grand nombre de personnes. Le format Excel est exigé pour ce qui concerne le rendu des données numériques éventuelles.
- Présenter une carte SIG récapitulative de l'étude
- Comporter, si nécessaire, des annexes techniques suffisamment complètes
- Faire l'objet d'une présentation en français devant le maître d'ouvrage,

Qualités des méthodes de calcul

Les méthodes et outils d'analyse doivent être explicités:

- On donnera impérativement les références des documents utilisés
- La grille d'analyse doit être donnée et justifiée.

6. Propriétés des résultats

Les résultats de l'étude seront la propriété de la REGION Réunion qui pourra les utiliser pour évaluer la pertinence des procédures ainsi que réaliser des suivis techniques. La REGION Réunion pourra utiliser librement les informations collectées en fiche de synthèse.

7. Devoir du maître d'ouvrage

Le maître d'ouvrage, demandeur de l'étude, a également des obligations à remplir; elles se situent, par rapport à la prestation :

Avant : bien connaître le cahier des charges et donc l'étendue de la prestation à exiger du professionnel, le choisir avec soin en ayant déjà rassemblé toutes informations et documents utiles.

Pendant : accompagner ou faire accompagner le prestataire par la ou les personnes impliquées au quotidien dans la gestion technique de l'étude.

A la remise du rapport : vérifier la conformité de la prestation au cahier des charges, valider les hypothèses retenues.

8. Coût de la prestation

Le prestataire établira un devis détaillé correspondant au coût de la prestation dans son ensemble, faisant apparaître le nombre de journées de travail, les coûts journaliers du ou intervenants ainsi que les frais annexes.

Le montant ainsi proposé sera forfaitaire, ferme et définitif, et inclura l'ensemble de la prestation telle que définie dans le présent cahier des charges.

Le candidat est autorisé à proposer des variantes par rapport au cahier des charges présenté, à condition qu'il propose également une offre pour la solution de base. Les offres complémentaires seront argumentées et justifiées par rapport à la solution de base.

Il devra fournir une note méthodologique présentant la méthode qu'il entend pour réaliser la mission.

9. Durée de l'étude

Le délai global de réalisation de l'étude est laissé à l'appréciation de l'entreprise. Un planning des différentes tâches sera fourni avec l'offre du candidat.

Le rendu de l'étude devra être remis au plus tard 3 mois après obtention de l'offre.

10. Maîtrise d'ouvrage de l'étude

Le maître d'ouvrage de l'étude est la Région Réunion, Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et des Travaux

11. Documents à disposition du prestataire

Du point de vue environnemental, une étude des côtes réunionnaises sur la sensibilité des zones côtière est disponible à la DIREN, Saint Denis (contact Anne Liotto).

Les cartes 1/25000^{ème} du réseau de distribution de l'électricité sont disponibles au SIDELEC.

La description des différents systèmes de conversion est disponible à l'ARER.

Une étude sur l'impact environnemental des usines houlomotrices est disponible à l'ARER.

Annexe 3 : Cahier des charges – Etudes in situ de la houle

Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et des Travaux

Aide à la décision pour l'investissement dans la filière Energie des Vagues à la Réunion

- Etude in situ de la houle côtière

Cahier des charges

Version provisoire du 05/09/2003

SOMMAIRE

1. Introduction
2. Règles générales
3. Etats des lieux
4. Objectif de l'étude
5. Contenu de l'étude
6. Qualité de la prestation
 - Qualité du rapport
 - Qualité des méthodes
7. Devoir du maître d'ouvrage
8. Propriété des résultats
9. Coût de la prestation
10. Durée de l'étude
11. Maîtrise d'ouvrage de l'étude

1. Introduction

L'océan représente une réserve extraordinaire d'énergie. Les technologies visant à convertir l'énergie des vagues se multiplient dans le monde, notamment dans les pays anglo-saxons et scandinaves. La bathymétrie des fonds réunionnais est particulière et laisse supposer un fort potentiel de La Réunion pour cette énergie.

La Région Réunion a affiché sa volonté de faire des énergies renouvelables un des points fort de sa politique. Elle s'est notamment donnée comme objectif que toute l'énergie électrique produite sur l'île soit d'origine renouvelable à l'horizon 2025.

Afin de contribuer à cet objectif la région Réunion, avec la collaboration de la plateforme R&D de l'ARER, lance les études d'évaluation de la ressource locale en énergie des vagues et des sites réunionnais appropriés à la conversion de l'énergie des vagues

2. Règles générales

L'étude devra être réalisée par un intervenant ci-après dénommé "le prestataire", ayant l'indépendance, la compétence nécessaire et les références attestant de cette compétence.

De plus, dans un souci de qualité, le prestataire s'attachera à respecter les règles suivantes :

- suivre une démarche rigoureuse explicitée et justifiée dans son rapport d'étude ;
- être exhaustif dans ses recommandations et fournir toutes les informations objectives nécessaires à la poursuite de l'étude de potentiel ;
- ne pas intervenir dans un établissement vis-à-vis duquel il ne présenterait pas toute garantie d'objectivité, notamment sur des installations conçues, réalisées ou gérées pour l'essentiel par lui-même ;
- n'adjoindre aucune démarche commerciale concernant des biens ou services (ayant un lien avec les recommandations) au cours de son intervention.

3. Etat des lieux

La Région Réunion, en collaboration avec la plateforme R&D 2003 de l'ARER, a lancé les études de l'évaluation du potentiel réunionnais en énergie des vagues.

Dans un premier temps, une étude de la ressource offshore a été réalisée en collaboration avec Météo France. Cette étude a porté sur les caractéristiques statistiques de l'état de la mer dans une zone de l'océan indien comprenant l'île de La Réunion.

Ensuite, une étude de la ressource côtière en énergie des vagues a été lancée. Celle ci a consisté en six simulations numériques (propagation de la houle offshore sur les côtes réunionnaises) afin de caractériser précisément le potentiel des trois parties de la côte sud réunionnaises.

Parallèlement, un pré diagnostic environnemental et réglementaire a été réalisé et a permis de dégager un nombre fini de sites potentiellement adéquats pour accueillir un convertisseur en énergie des vagues

Le comité de pilotage de la filière « énergie des vagues », mis en place par la Région Réunion et l'ARER, a croisé ces deux dernières études et en a fait ressortir le (les 2 ou 3) site(s) le(s) plus intéressant(s) pour l'installation d'une usine houlomotrice.

4. Objectifs de l'étude

L'étude a pour but de caractériser exactement la houle sur ce(s) site(s).

5. Contenu de l'étude

Le(s) site(s) concerné(s) par l'étude sont précisés ci-dessous :

- Site1 : latitude1/ longitude1/ profondeur d'eau locale1
- (Site 2 : latitude2/ longitude2/ profondeur d'eau locale2
- Site 3 : latitude3/ longitude3/ profondeur d'eau locale3)

L'étude devra fournir les caractéristiques des vagues moyennées par heure. Les données fournies seront : - H_{1/10}, hauteur moyenne du dixième des plus hautes vagues

- T_{1/10}, période moyenne du dixième des plus hautes vagues
- H_{1/3}, hauteur moyenne du tiers des plus hautes vagues
- T_{1/3}, période moyenne du tiers des plus hautes vagues
- H_{max}, hauteur des plus hautes vagues
- T_{max}, période des plus hautes vagues
- N le nombre de vagues

L'étude ci-dessus décrite nécessite la pose d'un houlographe sur le(s) site(s) concerné(s). Le prestataire s'attachera autant que possible (suivant les contraintes du site) à installer le houlographe à l'emplacement précis du site.

Le prestataire devra obtenir les autorisations réglementaires, poser le houlographe, recevoir et traiter les données émises et enlever le houlographe à l'échéance de la prestation.

La durée de la campagne de mesure est de 1 an.

6. Qualité de la prestation

Qualités du rapport

Il devra :

- Etre clair et lisible, la forme est importante, elle facilite la décision et incite aux travaux,
- Etre utilisable informatiquement par un plus grand nombre de personnes. Le format Excel est exigé pour ce qui concerne le rendu des données numériques.

- Etre rédigé en français, une synthèse devra être remise en français et en anglais
- Comporter, si nécessaire, des annexes techniques suffisamment complètes
- Faire l'objet d'une présentation en français devant le maître d'ouvrage,

Qualités des méthodes

Les méthodes et outils de mesures doivent être explicités:

- On donnera impérativement les références des matériels utilisés
- Les problèmes techniques inhérents à l'utilisation de tels matériels sont fréquents. La durée de « non traitement » des données ne devra cependant pas dépasser 10% de la durée totale de l'étude soit 438 heures.

Ce dernier devra s'assurer de la fiabilité des outils installés dans la zone d'étude.

En cas de perte ou endommagement des outils de mesures, le prestataire assurera les réparations ou remplacements des outils nécessaires à l'étude dans un délai maximal de 30 jours.

7. Propriétés des résultats

Les résultats de l'étude seront la propriété de la Région Réunion qui pourra les utiliser pour évaluer la pertinence des procédures ainsi que réaliser des suivis techniques. La Région Réunion pourra utiliser librement les informations collectées en fiche de synthèse.

8. Devoir du maître d'ouvrage

Le maître d'ouvrage, demandeur de l'étude, a également des obligations à remplir; elles se situent, par rapport à la prestation :

Avant : bien connaître le cahier des charges et donc l'étendue de la prestation à exiger du professionnel, le choisir avec soin en ayant déjà rassemblé toutes informations et documents utiles.

Pendant : accompagner ou faire accompagner le prestataire par la ou les personnes impliquées au quotidien dans la gestion technique de l'étude.

A la remise du rapport : vérifier la conformité de la prestation au cahier des charges, valider les hypothèses retenues.

9. Coût de la prestation

Le prestataire établira un devis détaillé correspondant au coût de la prestation dans son ensemble, faisant apparaître le nombre de journées de travail, les coûts journaliers du ou intervenants ainsi que les frais annexes.

Le montant ainsi proposé sera forfaitaire, ferme et définitif, et inclura l'ensemble de la prestation telle que définie dans le présent cahier des charges.

Le candidat est autorisé à proposer des variantes par rapport au cahier des charges présenté, à condition qu'il propose également une offre pour la solution de base. Les offres complémentaires seront argumentées et justifiées par rapport à la solution de base.

Il devra fournir une note méthodologique présentant la méthode qu'il entend pour réaliser la mission.

10. Durée de l'étude

Le délai global de réalisation de l'étude est laissé à l'appréciation de l'entreprise. Un planning des différentes tâches sera fourni avec l'offre du candidat.

11. Maîtrise d'ouvrage de l'étude

Le maître d'ouvrage de l'étude est la Région Réunion, Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et des Travaux

Annexe 4 : Le Domaine Public Maritime (DPM)

En quoi consiste le DPM ?

On distingue le DPM naturel qui est constitué :

- du sol et sous sol de la mer, compris entre la limite haute du rivage, c'est à dire celle des plus hautes mers en l'absence de perturbations météorologiques exceptionnelles (« bord et rivage de mer, grève » à l'époque de Colbert), et la limite, coté large, de la mer territoriale, des étangs salés en communication naturelle avec la mer, des lais et relais (dépôts alluvionnaires) de mer formés postérieurement à la loi du 28 novembre 1963, et des lais et relais antérieurs à la loi du 28 novembre 1963 incorporés par un acte de l'administration, des parties non aliénées de la zone dite des 50 pas géométriques dans les départements d'outre-mer depuis la loi du 3 janvier 1986 dite loi littoral.

Ces éléments sont déterminés par la simple constatation de leur situation par rapport à des phénomènes naturels présents (par ex : le rivage de la mer) ou passés (par ex : les lais et relais de la mer). Le rivage, comme les lais et relais peuvent faire l'objet d'une délimitation côté terre et le DPM artificiel qui est constitué :

- Des ouvrages portuaires et de leurs dépendances
 - Des ouvrages liés à la navigation (phares, etc.)

Dans certains cas, des ouvrages (par ex : ouvrages de défense contre la mer) peuvent être construits sur le DPM naturel, des plages ont pu être créées (plages artificielles). Même si l'ouvrage ou la plage est bien « artificiel », son fond reste en droit du DPM naturel. La garde du domaine public maritime (DPM) a été confiée, de manière fort ancienne, à l'Etat

L'idée que le rivage de la mer appartienne aux "choses communes", c'est-à-dire ne soit pas susceptible d'appropriation privée et soit géré par la puissance publique, vient très nettement de l'époque romaine, où déjà une autorisation était nécessaire pour construire sur le bord de la mer. Mais c'est la fameuse ordonnance de la marine d'août 1681 de Colbert qui, codifiant ce principe, constitue encore aujourd'hui le fondement de la gestion par l'Etat du DPM.

Comme tout domaine public⁵, le DPM est inaliénable et imprescriptible, et cela depuis l'Edit de Moulins (1566).

Qui gère le DPM ?

Le rôle principal dans la garde du domaine public revient traditionnellement au préfet. Pour le DPM, il s'appuie sur des services extérieurs du ministère de l'Équipement, les services maritimes, tantôt organisés en services spécialisés, tantôt inclus dans les directions départementales de l'équipement. Dans les ports autonomes, la compétence principale est entre les mains du directeur du port.

Les directions départementales des affaires maritimes instruisent les questions relatives aux cultures marines, et les directions régionales de l'industrie, de la recherche et de l'environnement (DRIRE)

⁵ CODE DU DOMAINE DE L'ETAT, article L1 et article L2. Ces 2 articles trouvent leur origine dans le décret des 22 novembre et 1^{er} décembre 1790.

instruisent les questions relatives au droit minier sur le DPM. Le préfet maritime doit donner son assentiment préalable à toute implantation sur le DPM naturel (R152-1 du code du domaine de l'Etat).

Les services fiscaux (Direction générale des impôts et ses services déconcentrés) déterminent et recouvrent les redevances domaniales qui peuvent être perçues au profit du budget de l'Etat.

Au niveau central, l'administration compétente est la Direction du transport maritime, des ports et du littoral qui relève en général du Ministère chargé de la mer, c'est à dire aujourd'hui le ministère de l'Equipement. Les cultures marines relèvent du ministère chargé de l'agriculture et de la pêche et le droit minier du ministère chargé de l'industrie.

Les principes applicables à la gestion du DPM.

S'agissant du DPM, les principes devant guider cette gestion ne sont pas forcément les mêmes selon qu'il s'agit du domaine artificiel ou naturel.

Le DPM artificiel a été généralement aménagé pour mettre en valeur le littoral : toute décision qui favorise cette mise en valeur contribue donc à la réalisation de la vocation du domaine.

Ainsi, les ports maritimes sont aménagés pour recevoir les navires et permettre l'embarquement et le débarquement des marchandises, du poisson ou des passagers, ce qui nécessite de multiples services connexes à cette activité de transit et qui participent à ce service. Une telle utilisation du domaine est donc avant tout économique et commerciale, et les règles de gestion doivent viser à la meilleure utilisation économique du domaine ainsi aménagé, ce qui peut justifier d'importantes occupations privatives s'accompagnant d'un régime de redevance lié à l'activité apportée, reconnaissance des « droits réels » à l'occupant depuis la loi de juillet 1994, et même de la fermeture d'une partie du domaine au public.

Le DPM naturel répond au contraire à un principe fondamental et ancien, celui du libre usage par le public pour la promenade, la pêche, l'échouage des bateaux ou les activités balnéaires et nautiques, ce qui fonde les principes de gestion du littoral : favoriser les activités liées à la mer et qui ne peuvent se développer ailleurs, au premier rang desquelles l'accès du public à la mer.

Peu de textes précisent les règles de fond applicables, qui ont surtout fait l'objet d'instructions du Ministère et d'une jurisprudence abondante. Pour l'essentiel, ces principes ont été repris dans la loi du 3 janvier 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral, dont l'article 25 (article L321-5 du code de l'environnement), applicable aussi bien au domaine public artificiel que naturel, impose de « tenir compte de la vocation des zones concernées, et de celles des espaces terrestres avoisinants, ainsi que des impératifs de préservation des sites et paysages du littoral et des ressources biologiques ». Cet article impose en outre une enquête publique dès lors qu'est prévu un changement substantiel dans l'utilisation du DPM.

L'article 27 (article L321-6 du code de l'environnement) dans la même loi traite plus spécifiquement du DPM naturel, puisqu'il interdit d'une façon générale de porter atteinte à l'état naturel du rivage, notamment par endiguement, assèchement, enrochement ou remblaiement, tout en permettant la réalisation d'ouvrages liés à un service public ou à des travaux publics répondant à des contraintes de localisation particulièrement fortes, ainsi que, d'une façon générale les aménagements portuaires, les opérations de défense contre la mer, les ouvrages et installations nécessaires à la sécurité maritime, à la défense nationale, à la pêche maritime, à la saliculture et aux cultures marines.

Pour arbitrer entre les préoccupations légitimes concurrentes, la loi a prévu un outil destiné à préciser

en amont les vocations prioritaires des espaces concernés, afin de résoudre au mieux les éventuels conflits d'usage : les schémas de mise en valeur de la mer.

NB : Dans tous les cas, une construction ou installation sur le DPM nécessite d'obtenir un titre d'occupation domaniale. Ce titre, s'il est accordé, ne préjuge en rien des autres législations applicables (Loi sur l'eau, permis de construire, etc.)

Conclusion

Le considérant suivant extrait de l'arrêt du Conseil d'Etat du 3 mai 1963 -Commune de Saint-Brevin-les-Pins et autres - permet de conclure sur la question délicate entre toutes des autorisations sur le domaine public maritime :

« si, dans l'exercice de ses pouvoirs de gestion du domaine public maritime, il appartient à l'administration d'accorder à titre temporaire et dans les conditions prévues par la réglementation en vigueur des autorisations d'occupation privative dudit domaine, ces autorisations ne peuvent légalement intervenir que si, compte tenu des nécessités de l'intérêt général, elles se concilient avec les usages conformes à la destination du domaine que le public est normalement en droit d'y exercer, ainsi qu'avec l'obligation qu'a l'administration d'assurer la conservation de son domaine public »

Annexe 5 : Contacts

DDE Réunion Entretien et Dragage: René De Langlard

Interlocuteur privilégié en ce qui concerne les houlographe de la DDE installés sur l'île

rene.de-langlard@equipement.gouv.fr

tel : +33 (02) 62 42 60 26

Adresse : Service Entretien et dragage Port Ouest – près de SRPP

Région Réunion : Rémy Durand

remy.durand@cr-reunion.fr

IFREMER REUNION : Philippe Lemerrier

Philippe.Lemerrier@ifremer.fr

Tel : (02) 62 42 03 40

Peu de contacts

Mauritius Meteorological Services

Adresse : St. Paul Road,
Vacoas,
ile maurice

Météo France Réunion

Haie Bruno (technicien, interlocuteur technique)

bruno.haie@meteo.fr

tel : (02) 62 92 11 25

Quetelard Hubert (chef du bureau d'étude)

Hubert.quetelard@meteo.fr

Tel : (02) 62 92 11 20

Météo France Toulouse

Pierre Lassègues (membre du service des banques de données, extracteur des données CEP)

pierre.lassegues@meteo.fr

Tel : (05) 61 07 83 63

SHOM Brest

Raymond Jehan (membre de BDBS, interlocuteur privilégié pour la bathymétrie numérique)

raymond.jehan@shom.fr

UNIMAR

Magasin spécialiste de la mer – Vente des cartes marines

Tel : (02) 62 43 49 15

Adresse : 12 r de la republique
97420 le port

Développeur :

AWS

AWS BV

De Weel 20

1736 KB Zijdewind

The Netherlands
Email: info@waveswing.com

ENERGETECH

Energetech Australia Pty. Ltd.

1 The Avenue
Randwick NSW 2031
AUSTRALIA
Phone: 612 9326 4237
Fax: 612 9326 6277

General Enquiries and Employment

Alison Cornish

alison@energetech.com.au

+61 2 9326 4237 or +61 414 289 287 (m)

Global Business Development

Cynthia Rudge

cyn@energetech.com.au

+1 416 410 2900 (Canada)

Research and Development

Tim Finnigan

tim@energetech.com.au

+61 2 9326 4237 or +61 438 201 160 (m)

Mac Cabe Wave Pump

Dr Peter Mc Cabe
1 bishop Court, New Street
Killarney
Co Kerry

OreCON Ltd. UPEL

The Money Center, Drake Circus
Plymouth, PL4 8AA
Tel : 01752 2333700
Mail : Contact@orecon.com

Wave Dragon ApS

Blegdamsvej 4 1st floor,
DK-2200 Copenhagen N,
Denmark
Phone: +45 - 35 36 02 19 / +45 - 35 37 02 11,
Fax: +45 - 35 37 45 37,
E-mail: info@wavedragon.net

Wavegen

Mr David Langston – Business development manager
Mr David Gibb – Finance Director
50 Seafield Road
Longman Industrial Estate
INVERNESS IV1 1LZ, UNITED KINGDOM
Tel: +44 (0)1463 238094
Fax: +44 (0)1463 238096

Wave Plane International A/S

Erik Skaarup
Tagesmindevej 1
DK-2820
Denmark
Tel : +45 3975 1213
Fax : +45 3975 1214
E-mail: es@waveplane.com

AquaEnergy Group, Ltd.

P.O. Box 1276
Mercer Island, WA 98040
USA
Phone: +1 (425) 430-7924
Fax: +1 (208) 474-1346
Email: aqua@aeg-ltd.com
Web: <http://www.aquaenergygroup.com>

Sea Power International AB (publ.)

Essingeringen 72-C 112 64 Stockholm
Sweden
Reg.nr. 556236-6020
Phone: 08 - 654 34 10
Fax: 08 - 657 95 51
email: info@seapower.se

SARA Inc.

Main Office

SARA Inc.
6300 Gateway Drive
Cypress, CA 90630-4844
Phone: (714) 224-4410
Fax: (714) 224-1710
information@sara.com

Renergy Pacific Corporation

733 Eighth Avenue
San Diego, CA 92101
USA
phone: (619) 696-1086
Fax: (619) 321-1234
e-mail: info@renergypacific.com

SeaVolt Technologies

Gregory J. Seiler
2680 Bancroft Way .
Berkeley, CA 94704 .
USA
Tel: 510 644 0402
Fax: 510 528 2337
info@seavolt.com

Ocean Power Ddelivery Ltd.

104 Commercial St, Edinburgh, EH6 6NF Scotland, UK
Telephone: +44 (0) 131 554 8444
Fax: +44 (0) 131 554 8544
enquiries@oceanpd.com

S.D.E.

19 Lubetkin St. Tel Aviv 67532 ISRAEL
Tel: +972-3-7397107
Fax: +972-3-631-9239
E-mail: abe@shani.net

Ing. Arvid Nesheim

Address: Høymyrmarka 123A, N1391 Vollen, Norway
Tel. (+47) 95108439
Fax. (+47) 97278965
E-mail: post@anwsite.com
