



# NOTE D'OPPORTUNITES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE THERMIQUE DES MERS ET LA VALORISATION DE L'EAU FROIDE PROFONDE AU PORT

- Filière : Energies de la Mer :
- Rédacteur : ARER, Matthieu HDARAU, [mhoarau@arer.org](mailto:mhoarau@arer.org)
- Référent : Laurent GAUTRET, [laurent.gautret@arer.org](mailto:laurent.gautret@arer.org)
- Secrétariat : Line RIVIERE, [line.riviere@arer.org](mailto:line.riviere@arer.org)
- Date : Mars- Août 2008
- Diffusion : site web arer
- Version n°1

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

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

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

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

Siège social : 40 avenue de Soweto \* BP 226 \* 97456 St-Pierre Cedex

Tel : 0262 38 39 38 \* Fax : 0262 96 86 91 \* n° siret : 43928091800020

**Membres de Droits 2008 de l'ARER**



**Membre associé 2007**

Les communes du Port, Mamoudzou, Saint André , Sainte-Marie, Petite-Ile, Saint-Pierre, Saint-Denis, Le Tampon, Cilaos, le SIDELEC, la SAPHIR, la Chambre Des Métiers, Batipro, SIDR, le Conservatoire Botanique des Mascariens, Sciences Réunion, TCO

**Partenaire associé**

ADEME



## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier de nombreuses personnes et organismes pour le soutien technique qu'ils ont su apporter à l'ARER lors de la rédaction de cette note d'opportunités pour l'utilisation de l'eau froide profonde au Port. Ces remerciements s'adressent :

Tout d'abord aux financeurs du projet, la Mairie du Port et le TCO, pour leurs soutiens financiers à cette étude pilotée par l'ARER.

A la Région Réunion, pour son soutien à l'ARER pour le développement et la veille technologique sur la filière « énergies de la mer ».

A l'équipe de l'ARVAM, partenaire de ce projet, avec Mr QUOD, Mr TURQUET et Mr NICET, qui ont mené les prélèvements et analyses de l'eau au large du Port. Ils ont apporté leurs expertises en rédigeant le rapport sur la caractérisation des masses d'eaux au large du Port.

A Mme CASTRO, Mme DESNOT, Mr AHKANG, Mlle MDUNIEN, Mme ESPERANCE, et Mr DESCOL, travaillant pour la ville du Port et le TCO, qui ont permis une étroite collaboration entre l'ARER et les organismes financeurs du projet.

A Mr Alain DELORMES et Mr Jean Michel DEVEZA de la société EDF, qui ont relayé un nombre important d'informations sur la future centrale thermique du Port Est.

A Mr Patrick BACHELLERIE et Mr Francky SAINT ANGE, de l'Université de La Réunion, qui ont apporté leurs savoirs en termes de géologie des fonds marins.

A Mr Michel GAUTHIER, Mr David LEVRAT et Mr Gérard NIHOUS, experts en ETM, qui ont apporté de nombreuses informations sur la technologie ETM.

A Mme Hélène CHARLON de l'ADIR et aux organismes, SAPMER, Armements des Mascareignes, Réunion PELAGIQUE, ARDA, DANONE, qui ont participé au questionnaire sur les besoins en froid de leurs entreprises.

Au SHOM et à l'IFREMER, qui nous ont fournis les données bathymétriques de La Réunion dans le cadre de nos projets R&D sur les énergies de la mer à La Réunion.

A Frederick DAMBREVILLE, qui a participé à la réalisation des cartes bathymétriques électroniques et au soutien technique.

A l'ensemble des personnes que nous oublions, internes ou externes à l'ARER, qui directement ou indirectement ont apporté des connaissances techniques pour la réalisation de ce projet.

## INTRODUCTION

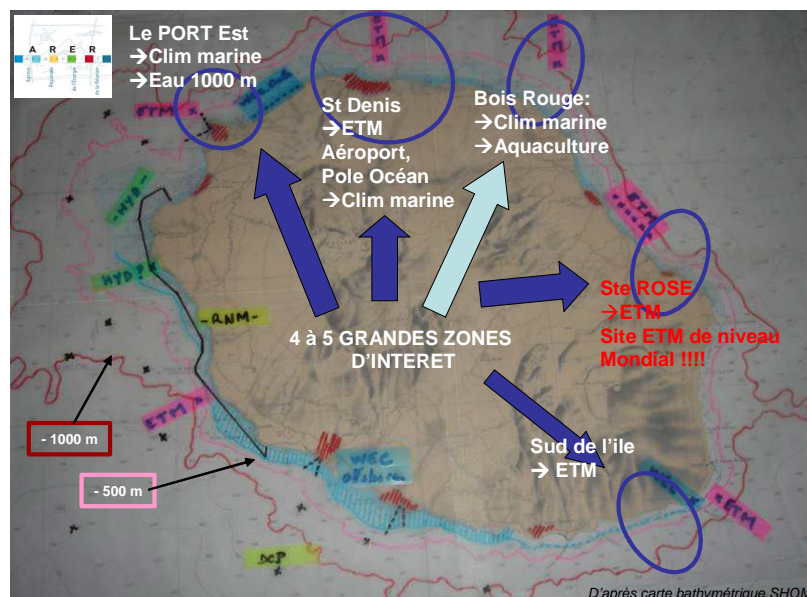
Située dans le Nord-Ouest de l'île de La Réunion, la ville du Port tire son nom de son ancien port commercial. Dénommé aujourd'hui le Vieux Port ou Port Ouest, il est devenu un port de plaisance et accueille aussi les armateurs des pêches palangrières. En 1980, un nouveau port commercial, appelée Port Est ou Nouveau Port, est construit à l'intérieur de la Baie de La Possession, soit à l'Est du territoire de la ville. Depuis cela, la ville du Port représente le véritable cordon ombilical de l'île avec l'extérieur.

En 2004, Le Port comptait environ 38 000 habitants et sa population atteindra certainement 50 000 voire 60 000 personnes en 2025/2030. La ville du Port s'est donc inscrite dans une réelle politique de développement durable, avec notamment l'utilisation des énergies renouvelables. En 2007 est né le projet « Le Port, ville solaire » et le futur projet « Ville est Port » prévoit une réelle ouverture de la ville vers la mer via le Vieux Port.

Dans le cadre des conventions de partenariat entre l'ARER et La ville du Port ainsi que celle entre l'ARER et le TCO, ces 2 collectivités ont soutenu financièrement un travail de pilotage de l'ARER afin d'estimer l'opportunité de développer une filière Energie de la Mer au large des côtes portaises.

Les raisons de cibler une telle étude sont les suivantes :

- L'ARER a mené depuis 2002 auprès de La Région un travail de veille sur les filières technologiques des Energies Marines. Parmi celles-ci une sous filière « Energie Thermique des mers » (ETM) est apparue pertinente à La Réunion, et à priori valorisable le long des cotes portaises.
- L'ETM est décrite à moyen et long terme comme potentiellement le « nucléaire des zones intertropicales » (production de base). La réunion est dans une phase d'expérimentation (projet national GERRI) des énergies du futur.
- L'ETM nécessite des déclivités sous-marines prononcées. La Pointe des Galets fait partie des 4 à 5 meilleurs sites Réunionnais sur ce point (cf. figure 1).
- L'ETM nécessite la présence à terre si possible d'une zone de développement économique, permettant de valoriser les produits dérivés de l'utilisation de l'eau froide sous marine.
- Hawaï est une île à la morphologie similaire à La Réunion et exploite ces ressources en générant 3 milliards de dollars de CA/an.
- La montée du prix du Baril fait que les projets ETM peuvent apparaître désormais comme viables économiquement, même en production pure d'énergie.



*Figure 1 : Sites potentiels pour l'implantation de l'ETM à La Réunion*  
*Source Carte SHOM*

Le contenu de cette étude a été organisé comme suit :

- Une mission de prélèvement en mer d'eau froide profonde et d'analyse des paramètres physico-chimiques de cette eau en lien avec les utilisations économiques possibles.
- Une note d'opportunité (de développement au Port de l'Energie Thermique des Mers (ETM) et les technologies marines associées à la valorisation de l'Eau Froide Profonde (EFP ou en anglais DOW : Deep Ocean Water).

Cette eau froide profonde pourrait être utilisée dans des Activités liées à l'Eau Froide Profonde (AEFP, en anglais DOWA : Deep Ocean Water Applications) telles que :

- La climatisation urbaine et industrielle
- La production d'eau potable
- La production d'électricité (avec un possible couplage à la future centrale fuel du port Est)
- L'irrigation d'espaces verts ou pour l'agriculture
- L'aquaculture
- La culture d'algues
- ...

Après une description de l'ETM, de chacune des activités et de la situation de la ville du Port, ce document traitera des réelles opportunités de développement pour l'ETM et la valorisation de l'EFP au Port avec en annexe une caractérisation des masses d'eau au large du Port.

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	2
INTRODUCTION	3
TABLE DES MATIERES	5
TABLE DES ILLUSTRATIONS	6
I - Qu'est ce que l'Energie Thermique des Mers ?	8
I - 1 L'alimentation en eau	9
I - 2 L'infrastructure	10
I - 3 Coût de l'ETM	10
I - 4 Impact environnemental de l'ETM	11
II - Analyse de la ressource en eau froide profonde au large de la Ville du Port	13
II - 1 Mission de prélèvement d'eau froide profonde	13
II-1.1 Description du matériel utilisé	14
II-1.2 Principe de fonctionnement du matériel	14
II - 2 Rapport d'analyses de l'ARVAM	15
III - Accès à la ressource en eau froide profonde	16
III - 1 Bathymétrie des côtes portaises	16
III - 2 Géologie du fond marin	20
III - 3 Choix de l'atterrage	22
III - 4 Ancrage d'une plateforme off shore	24
IV - Production d'électricité grâce à l'Energie Thermique des Mers	25
IV - 1 ETM simple	25
IV-1.1 Etats des lieux de la technologie pour la production d'électricité	25
IV-1.2 Principe de fonctionnement pour la production d'électricité d'une centrale ETM	27
IV-1.3 Choix du principe de fonctionnement	29
IV - 2 Température de l'eau	29
IV-2.1 Profil de température (thermocline) au Port	29
IV-2.2 Température de l'eau de surface	30
IV - 3 Dimensionnement de la centrale ETM	34
IV - 4 Analyse d'opportunité du couplage ETM - Centrale thermique du Port Est	36
IV-4.1 Contexte du couplage ETM et centrale thermique	36
IV-4.2 Gain éventuel du couplage d'une centrale ETM à une centrale thermique	37
V - Climatisation par de l'eau froide sous- marine (Sea Water Air Conditioning)	38
V - 1 Etats des lieux de la technologie	38
V - 2 Besoins en froid au Port	39
V - 3 Agriculture	42
V-3.1 Etats des lieux de la technologie	42
V-3.2 Irrigation par condensation de l'eau sur les tuyaux d'eau froide au Port	43
VI - Activités liées à l'utilisation de l'Eau Froide Profonde (AEFP)	45
VI - 1 Aquaculture, culture d'algues et mariculture	45
VI-1.1 Etats des lieux de la technologie	45
VI-1.2 L'aquaculture, la mariculture et la culture d'algues au Port	48
VI - 2 Thalassothérapie	50
VI-2.1 Etats des lieux de la thalassothérapie	50
VI-2.2 La thalassothérapie au Port	51
VI - 3 Production d'eau douce	52



VI-3.1 Etats des lieux de la technologie	52
VI-3.2 Eau potable au Port	53
VI - 4 Production d'eau minérale à forte valeur ajoutée	54
VI-4.1 Etats des lieux de la technologie	54
VII - Etude technique et financière globale d'un projet d'utilisation de l'eau froide profonde au Port	56
VII - 1 Coût d'installation du pipe	56
VII - 2 Coût de l'ETM	57
VII - 3 Solaire photovoltaïque équivalent à l'ETM	58
VII - 4 Coût du SWAC	58
VII - 5 Production d'eau potable	60
VII - 6 Production d'eau minérale	60
VII - 7 Défisiscalisation et les plans PRERURE/GERRI	61
VII - 8 Retour sur investissement	61
VIII - Conclusions	65
IX - Orientation de la valorisation de l'eau froide profonde au Port	67
X - Bibliographie référence	68
MENTION DES DROITS DE PROPRIETE INTELLECTUELLE	70
GLOSSAIRE	71

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Sites potentiels pour l'implantation de l'ETM à La Réunion.....	4
Figure 2: Thermocline typique en milieu intertropical .....	8
Figure 3: Photo d'une station de pompage à Hawaï.....	9
Figure 4 : Photo d'un tuyau de 1,5m de diamètre ancré sur le fond marin .....	9
Figure 5 : Photo sous marine de la conduite (40cm de diamètre, de l'hôtel de luxe à Bora-Bora, lestée sur le fond à 45 m de profondeur, pompant de l'eau à 5,5°C à 900m de fond....	10
Figure 6 : Sagar Shakti, centrale ETM d'1MW née de la coopération Indo-Japonaise.....	11
Figure 7: Plan d'échantillonnage en face de la ville du Port (Carte Shom).....	13
Figure 8: Photos de la sonde Andeeraa, d'un échantillon d'eau prélevée et de la bouteille Niskin .....	14
Figure 9 : Bathymétrie de la zone Nord-Ouest de La Réunion (source : ARER, 2008).....	17
Figure 10 : Comparaison des profils bathymétriques du Port à différents sites d'intérêt pour l'ETM (Sources : références 11, 12 & 30).....	18
Figure 11 : Tableau comparatif de la longueur des tuyaux en fonction de la profondeur.....	19
Figure 12 : Carte géologique de La Réunion (Thèse de doctorat de Mr. OEHLER de l'université de Clermont-Ferrand).....	21
Figure 13 : Carte de la ville du Port (source : Google Earth).....	23
Figure 14 : Plateforme pétrolière récupérable pour la création d'une centrale ETM Offshore et image d'une centrale ETM off-shore (source : Ocean Power Plant) .....	24
Figure 15 : Usine ETM flottante " La Tunisie, réalisation de G. Claude pour la vente de glace, Brésil 1935.....	25
Figure 16 : Schéma de fonctionnement d'une centrale ETM en cycle fermé .....	27
Figure 17 : Schéma de fonctionnement d'une centrale OTEC à cycle ouvert .....	28
Figure 18 : Comparaison de la thermocline du Port à d'autres sites mondiaux.....	29
Figure 19 : Graphe des températures moyennes mensuelles de 1993 à 2004 .....	30
Figure 20 : Variation de température de l'eau de surface au Port durant une journée hivernale à La Réunion (graphe A).....	31



Figure 21 : Variation de la température de l'eau de surface lors du passage du cyclone Dina (graphe B).....	31
Figure 22 : Température de l'eau de surface à La Possession.....	32
Figure 23 : Température de l'eau de surface à La Rivière des Galets.....	32
Figure 24 : Variation de la différence de température entre l'eau chaude de surface et l'eau froide profonde.....	33
Figure 25 : Variation de la différence de température disponible au Port durant une année ...	33
Figure 26 : Variation de la puissance et de la production d'une centrale ETM (de 2,5MW nette) optimisée et d'une autre non optimisée en fonction de la variation de la différence de température entre l'eau de surface et l'eau profonde (Source : ARER, référence 7).....	34
Figure 27 : Puissance de la centrale ETM selon les variations de la DT .....	35
Figure 28 : Tableau synthétisant les calculs pour un éventuel couplage de la centrale ETM à la future centrale thermique.....	37
Figure 29 : Principe de fonctionnement de la climatisation sous-marine (SWAC) (référence 13).....	38
Figure 30 : Photos extérieure et intérieure de la station d'échange de l'Université de Cornell (référence 13) .....	38
Figure 31 : Circuit de SWAC et d'irrigation au Port à partir de l'atterrage de la Pointe des Galets (Att 2).....	40
Figure 32 : Circuit de SWAC et d'irrigation au Port à partir de l'atterrage du rond point de Tamatave (Att 3) .....	41
Figure 33 : Expérience sur les plants de papaye irrigués de façons différentes.....	43
Figure 34 : Fontaine d'Eau Froide Profonde au centre ville du Port .....	43
Figure 35 : Schéma d'aménagement de la ville du Port.....	44
Figure 36 : Photo des sites d'aquaculture et de culture d'algues du NELHA (source : NELHA Hawai) .....	45
Figure 37 : Tableau comparatif de la composition de l'eau froide profonde avec celle de l'eau de surface au Port. ....	45
Figure 38 : Culture de la spiruline à HAWAI (référence).....	46
Figure 39 : Photos de quelques espèces élevées en aquaculture au Nelha à Hawai (référence 28).....	46
Figure 40 : Cultures d'algues dans des sacs plastiques et schéma de principe de l'alimentation des algues avec du CO2 provenant d'une centrale thermique.....	47
Figure 41 : Piscine d'un centre de thalassothérapie .....	50
Figure 42 : Vue d'artiste de l'aménagement du Port Ouest (source : Mairie du Port).....	51
Figure 43 : Vue d'artiste de l'aménagement du Port Ouest (source : Mairie du Port).....	51
Figure 44 : Principe du dessalement grâce au gradient thermique des Mers (cycle ouvert ETM) .....	52
Figure 45 : Tableau de synthèse pour la production d'eau potable d'une centrale ETM de 2,5MW à cycle ouvert .....	53
Figure 46 : Bouteilles d'eau exportées .....	54
Figure 47 : Tableau comparatif de l'eau froide profonde portoise à celle d'Hawai .....	54
Figure 48 : Tableau prévisionnel du chiffre d'affaire généré par la revente d'eau profonde minérale.....	55
Figure 49 : Conduite d'Eau Froide assemblée avant immersion (source : site web Makai)....	56
Figure 50 : Tableau de synthèse des hypothèses.....	57
Figure 51 : Réseau urbain d'eau froide d'un système SWAC (référence 13).....	59
Figure 52 : Tableaux synthétisant l'ensemble des hypothèses de calcul .....	62
Figure 53 : Flux monétaire cumulé des différentes associations d'activité .....	63



## I - Qu'est ce que l'Energie Thermique des Mers ?

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

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

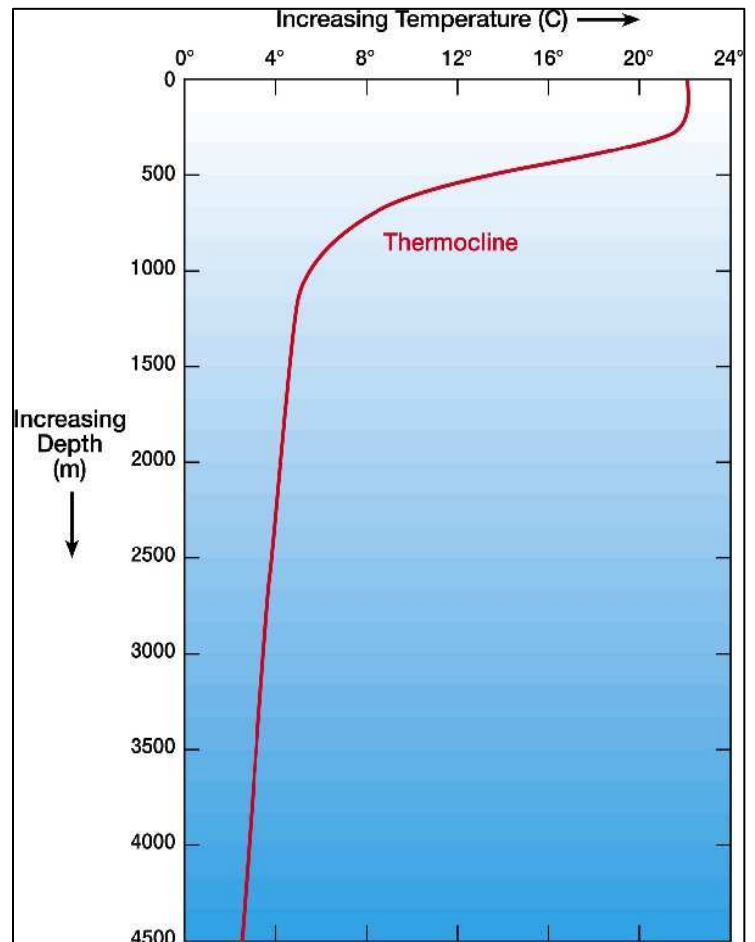


Figure 2: Thermocline typique en milieu intertropical

Cette ressource en énergie thermique et les procédés pour sa conversion en énergie mécanique utilisable par l'homme sont connus sous le nom d'"Energie Thermique des Mers" (ETM) ou "Ocean Thermal Energy Conversion" (OTEC en anglais).

La ressource est abondante, stable, disponible 24 heures sur 24, tous les jours de l'année, et largement distribuée et facile d'accès pour de nombreux pays situés dans la ceinture intertropicale.

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

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



## 1-1 L'alimentation en eau

Le faible différentiel de température disponible (à peine supérieur à 20° C) limite le rendement de la conversion à des valeurs très faibles. Pour assurer une puissance ETM de 1 MW net, il faut alimenter l'usine avec des débits de l'ordre de 2 à 3 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, et ce, tant en eau chaude qu'en eau froide. La viabilité de cette technologie était controversée puisqu'il était pensé que la puissance de pompage de l'eau froide aurait été plus importante que l'énergie produite.



*Figure 3: Photo d'une station de pompage à Hawaï*

Les premiers travaux expérimentaux ont démontré que le pompage de l'eau froide n'utilisait pas à lui seul plus d'énergie, que l'usine ne pourrait en produire. La réalité, démontrée expérimentalement, est que la puissance dite « parasite » de l'ensemble des « auxiliaires » nécessaires au fonctionnement peut être limitée à moins de 30% de la puissance brute produite, avec une part de l'ordre de 20% pour le seul pompage de l'eau froide (cf. X, référence 1, 2 & 3). Ces performances sont le résultat d'une optimisation complexe entre de nombreux paramètres, dont le plus « lourd » est le diamètre de la conduite. Il s'avère, en effet, que la réduction des pertes de charge passe par l'obligation d'opter pour des conduites de grands diamètres.

La plus importante réalisation reste encore celle faite dans les années 1930 pour l'usine ETM « La Tunisie » à cycle ouvert flottante de 2,2 MW net. La tuyauterie pour l'alimentation, à raison de 5 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, en eau froide à 5°, avait un diamètre de 2,5 m et était longue de 700 m.

Elle était faite de tronçons en tôle d'acier roulée de 3 mm d'épaisseur. Les réalisations récentes, toutes de petites tailles (Nelha, Bora-Bora), utilisent des tuyaux en PEHD (Polyéthylène Haute Densité), qui sont disponibles sur le marché jusqu'à 1,5 m de diamètre. Pour la réalisation d'usines ETM de 100 MW et plus, les promoteurs étudient l'utilisation de plastiques armés ou de bétons allégés pour la construction de conduites de 15 à plus de 30 m de diamètre.

Sans penser uniquement à la production d'électricité et en diversifiant les activités, il serait possible de pomper l'eau à des profondeurs moindres, pour développer les coproduits, aquaculture, production d'eau à forte valeur ajoutée, air conditionné. D'autant plus que le couplage à des centrales thermiques pourrait être autrement plus bénéfique sur le gradient thermique et ainsi limiterait aussi la profondeur de pompage.



*Figure 4: Photo d'un tuyau de 1,5m de diamètre ancré sur le fond marin*

## 1 - 2 L'infrastructure

L'infrastructure dépend essentiellement du site choisi pour implanter l'usine. La théorie autoriserait d'implanter l'usine à n'importe quelle profondeur entre la source chaude et la source froide mais toutes les réalisations ont jusqu'à ce jour opté pour des infrastructures en surface construites sur la côte (on-shore), ou sur des supports flottants en mer (off-shore), plus ou moins profonde.

L'avantage de l'installation en mer profonde (offshore), à l'aplomb de la ressource en eau froide, est de minimiser la longueur de la tuyauterie alors verticale et donc le coût et les pertes de charges. Son inconvénient est de compliquer le transfert de la production énergétique vers les lieux de consommation.

A contrario, l'implantation à terre facilite ce transfert, mais oblige à allonger la conduite - alors forcément plus ou moins inclinée - pour accéder à la ressource froide, et à résoudre des problèmes toujours difficiles d'« atterrissage ».

L'un des défis technologiques réside dans l'implantation de ce tuyau, qui descend à plusieurs centaines de mètres pour pomper de l'eau froide. La pose de ce tuyau représente la plus grande partie de l'investissement.



*Figure 5 : Photo sous marine de la conduite (40cm de diamètre, de l'hôtel de luxe à Bora-Bora, lestée sur le fond à 45 m de profondeur, pompant de l'eau à 5,5°C à 900m de fond*

## 1 - 3 Coût de l'ETM

L'ETM est une forme d'énergie de faible densité, comme le sont en général les énergies renouvelables, son exploitation requiert la construction d'installations lourdes en investissements.

Des études (pour la plupart américaines, cf. X, références 1&2) donnent des estimations de coûts d'investissement et de production pour des usines ETM flottantes jusqu'à 100 MW. Ils varient dans des fourchettes très larges, de 3€ à 16€/W pour la construction et de 5,4 à 17 c€/kWh pour le fonctionnement, selon les distances à la côte, de 10 à 400 km. Ces estimations reposent sur l'extrapolation de données expérimentales à des échelles de temps et de puissance, de l'ordre de quelques mois et quelques centaines de kW seulement. De 1990 à 2006, elles n'étaient pas jugées comme suffisamment crédibles ni suffisamment attrayantes au prix du marché de l'énergie traditionnelle, pour attirer des investisseurs privés. Mais l'augmentation du prix du baril à 130\$, en 2008, met de nouveau cette technologie sur le devant de la scène. Elle représente pour les territoires de la zone intertropicale, l'avenir en termes d'autonomie énergétique et d'indépendance énergétique vis-à-vis de l'énergie fossile.

Un programme de construction d'usines pilotes de 1 à 10 MW électriques apporterait une réponse à ce besoin d'expériences ETM à échelles intermédiaires tout en contribuant au développement de petites communautés insulaires particulièrement isolées, où le prix de l'énergie produite souvent par des petites centrales diesels-électriques est très élevé. Ce qui est le cas de nombreuses îles polynésiennes et de l'Île de la Réunion. C'est dans cette perspective que la France avait entrepris au début de la décennie 1980, l'étude d'une centrale électrique ETM à Tahiti de 5 MW. Le projet a été abandonné en 1986.

Alors que des projets industriels existent pour des centrales à ammoniac en cycle fermé (jusqu'à des puissances de 100 MW et plus), ceux des centrales à cycle ouvert (définition cycle ouvert et fermé, cf. IV.1.2) restent à ce jour limités à des puissances de quelques dizaines de MW.

Quelques autres exemples : Les États-Unis ont plusieurs projets de centrales ETM pour leurs bases militaires d'outre-mer, une de 8 MW pour Diégo Garcia dans l'Océan Indien et l'autre pour celle de Guam. L'Inde et le Japon se sont, eux, associés pour réaliser une ETM de 1 MW. Montée sur une barge flottante l'usine « Sagar Shakthy » a été présentée en 2001 avant d'être remorquée pour essais sur la côte, près de Tuticorin au sud-est du continent.



*Figure 6 : Sagar Shakthy, centrale ETM d'1MW née de la coopération Indo-Japonaise*

La pose de la Conduite d'Eau Froide et l'installation d'une centrale ETM de petite taille engendrerait au minimum un coût entre 15 à 20 millions d'Euros, selon les sources des projets hawaïens et mauriciens (cf. X, référence 4). En même temps, il faudra développer les activités marines associées, qui rentabiliseront plus rapidement le projet.

#### **1 - 4 Impact environnemental de l'ETM**

L'ETM ne génère, par principe, ni chaleur ni polluant mais peut perturber des flux naturels d'énergie et de matière. Il convient donc de définir la nature et l'ampleur de ces perturbations sur le milieu naturel avant de pouvoir évaluer leurs effets aux niveaux local, régional et global.

Pour assurer une production ETM d'1 MW, l'usine doit être alimentée par des débits de l'ordre de 2 à 3 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> en eau froide et des débits deux fois plus importants en eau chaude (cf. X, références 3, 4). Ce sont donc des volumes d'eau considérables qui seront pompés, puis rejetés dans le milieu naturel. Les organismes vivants entraînés au travers des crépines d'aspiration seront affectés. Ces derniers sont cependant supposés peu nombreux à ces profondeurs de prélèvement de 1000m. Quant aux effluents liquides, leur redistribution dans le temps et dans l'espace, dépendra des caractéristiques hydrographiques du site, de la puissance de l'usine et de sa conception. Ces derniers seront réintroduits dans le milieu naturel à des températures de quelques degrés différents (2 à 3<sup>o</sup> C) de ceux des eaux à leur entrée dans l'usine et selon les choix: les eaux du condenseur et de l'évaporateur séparées ou mélangées,

profondeurs et formes des évacuations. Les effets sur l'environnement pourront être différents et plus ou moins sensibles. Les rejets en mer pourront être faits à des profondeurs permettant de limiter fortement ces impacts.

Concernant les petites centrales littorales, les résultats d'études et d'essais, (cf. X, références 1&2) indiquent que les risques associés à leur exploitation devraient peu altérer la faune et la flore marine vivant à proximité et que les effets des rejets dans l'océan resteraient minimes.

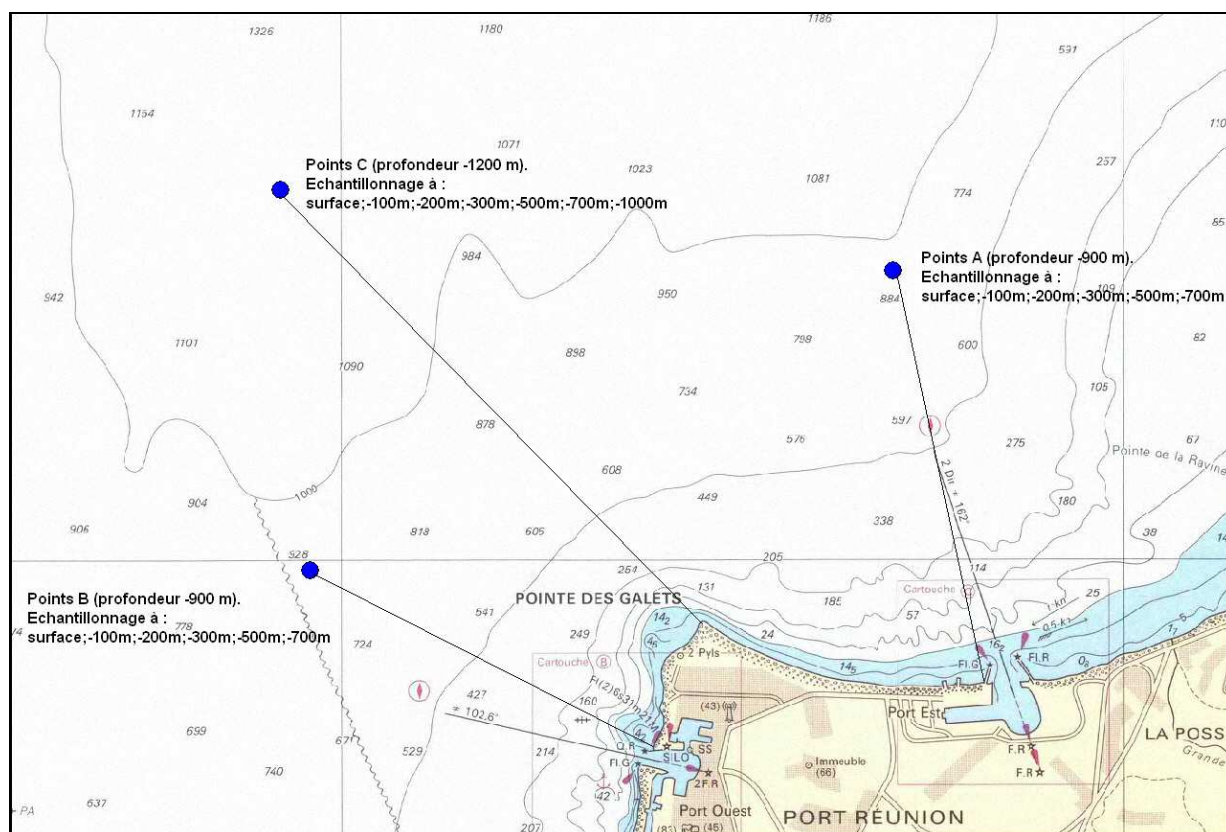
Les résultats des travaux de simulation, réalisés aux USA, (cf. X, références 1&2) pour de grosses centrales de 100 MW et plus, donnent des informations sur les limites et les procédures à respecter pour leur exploitation. Elle serait « durable » à condition de rester en deçà de 0,07% de la chaleur solaire absorbée par l'océan. Dans les régions propices, où l'écart de températures, entre les eaux en surface et à 1 000 m de profondeur, est supérieur à 22 °C, il existe en permanence de la puissance ETM, qui, exploitée devrait rester inférieure à 0,5 MW net par km<sup>2</sup> d'océan. La superficie totale de ces zones, étant évaluée à 60 millions de km<sup>2</sup>, le potentiel de la ressource permettrait l'installation d'usines, soigneusement espacées les unes des autres, d'une puissance globale de 10 000 GW. C'est un ordre de grandeur équivalent aux besoins mondiaux actuels.

L'eau profonde froide revêt un aspect particulier, celui d'être non seulement froide mais aussi d'être riche en éléments nutritifs. Les rejets d'usines ETM de grandes puissances pourraient donc agir à la manière des « upwellings » naturels qui refroidissent et « fertilisent » les eaux de surfaces. À très long terme, l'exploitation contrôlée de l'ETM pourrait stimuler la production biologique primaire des eaux dans des régions de l'océan où elles sont naturellement pauvres et de ce fait générer des zones de pêcheries nouvelles. A savoir que 40% des pêches mondiales se réalisent sur 0,4% de la surface des océans correspondant à des zones d'upwellings naturels. Elle pourrait aussi diminuer le risque de formations cycloniques en abaissant la température de surface des « loupes » d'eau chaudes tropicales, où elles puisent leur énergie.

## II - Analyse de la ressource en eau froide profonde au large de la Ville du Port

### II - | Mission de prélèvement d'eau froide profonde

Une mission de prélèvements et d'analyses de l'eau froide profonde a été pilotée par l'ARER. Le 23 Avril 2008, les prélèvements ont été réalisés en mer par l'ARVAM selon le plan d'échantillonnage suivant.



*Figure 7: Plan d'échantillonnage en face de la ville du Port (Carte Shom)*

## II-1.1 Description du matériel utilisé

Du matériel résistant aux pressions des grandes profondeurs a été utilisée pour mesurer une température de 5,1°C à 1000 m de fond. Il s'agissait d'une sonde Andeera et de bouteilles Niskin (visibles sur les photos suivantes).



*Figure 8: Photos de la sonde Andeeraa, d'un échantillon d'eau prélevée et de la bouteille Niskin*

## II-1.2 Principe de fonctionnement du matériel

La bouteille de prélèvement permet de piéger un volume d'eau. Elle est constituée d'un tube obturé par deux bouchons maintenus en position fermée par un élastique qui les relie entre eux (position fermée). En position ouverte, les bouchons sont maintenus ouverts par deux câbles reliés à une goupille.

Pour actionner la fermeture de la bouteille, l'opérateur (en surface) lâche une masselotte qui descend le long d'une corde qui relie la bouteille à la surface. La masselotte vient frapper les goupilles qui libèrent les câbles. Les bouchons viennent alors obturer les extrémités de la bouteille, qui était descendue jusqu'à la profondeur voulue en position ouverte.

Plus de précisions sur le matériel est apportée dans le rapport rédigé par l'ARVAM sur les analyses d'eaux et la caractérisation des masses d'eaux au large du Port.

## II - 2 **Rapport d'analyses de l'ARVAM**

Le rapport de l'ARVAM sur la caractérisation physico-chimique de la ressource en eau froide profonde au large de la commune du Port est présenté en annexe. Il traite de l'analyse des prélèvements d'eau froide profonde, réalisés avec succès le 24 avril 2008 au large des côtes portoises.



## III - Accès à la ressource en eau froide profonde

Dans le cadre de cette note d'opportunités sur la valorisation de l'Eau Froide Profonde (EFP), l'accès à la ressource en EFP a été étudié. Il faut rappeler que l'eau froide profonde est ramenée sur terre grâce à l'implantation d'un pipeline placé sur le fond marin. L'implantation de cette conduite (appelé CEF, **C**onduite d'**E**au **F**roide) est le principal défi technologique. D'un diamètre allant de 40 cm (pour le SWAC) à 2 m (pour la production d'électricité, ETM) et mesurant (sur la ville du Port au minimum 3km), cette conduite doit être entièrement assemblée avant immersion. L'enjeu est donc d'avoir un accès le moins long aux 1000 m de profondeur (voire plus) afin de limiter l'investissement, les difficultés pour la pose de la CEF, et les pertes de charge dans celle-ci. D'autant plus que sur terre, les activités utilisant l'eau froide profonde devront se développer dans un périmètre proche de l'atterrage de la CEF.

### III - 1 Bathymétrie des côtes portoises

Dans un premier temps, une analyse des données de bathymétrie du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) et de l'IFREMER a été faite à l'aide du logiciel MAPINFO. La Figure 9 est une représentation en 3 dimensions des fonds marins des villes de Saint Paul, du Port et de La Possession. Sur cette image sont positionnés, les 4 points d'atterrage possibles pour la pose de la Conduite d'Eau Froide (CEF) :

- Att 1 : Atterrage du Port Ouest
- Att 2 : Atterrage de la Pointe des Galets
- Att 3 : Atterrage de l'entrée du Port Est (Rond Point de Tamatave)
- Att 4 : Atterrage au niveau de la future centrale fuel du Port Est.

Ainsi que deux zones :

- La zone 1 s'étendant de l'embouchure actuelle de la Rivière des Galets à la Pointe des Galets
- La zone 2 s'étendant de la Pointe des Galets à la digue Est du Port Est.

Sur la figure suivante, les traits noirs symbolisent les profils bathymétriques, que suivrait la CEF selon les 4 points d'atterrage envisagés au Port. Le constat évident est que l'accès le plus rapide vers le grand bleu se fera au niveau de l'atterrage n°2 de la Pointe des Galets. Une autre carte (cf. Figure 13) présente l'ensemble des lieux géographiques de la ville du Port.



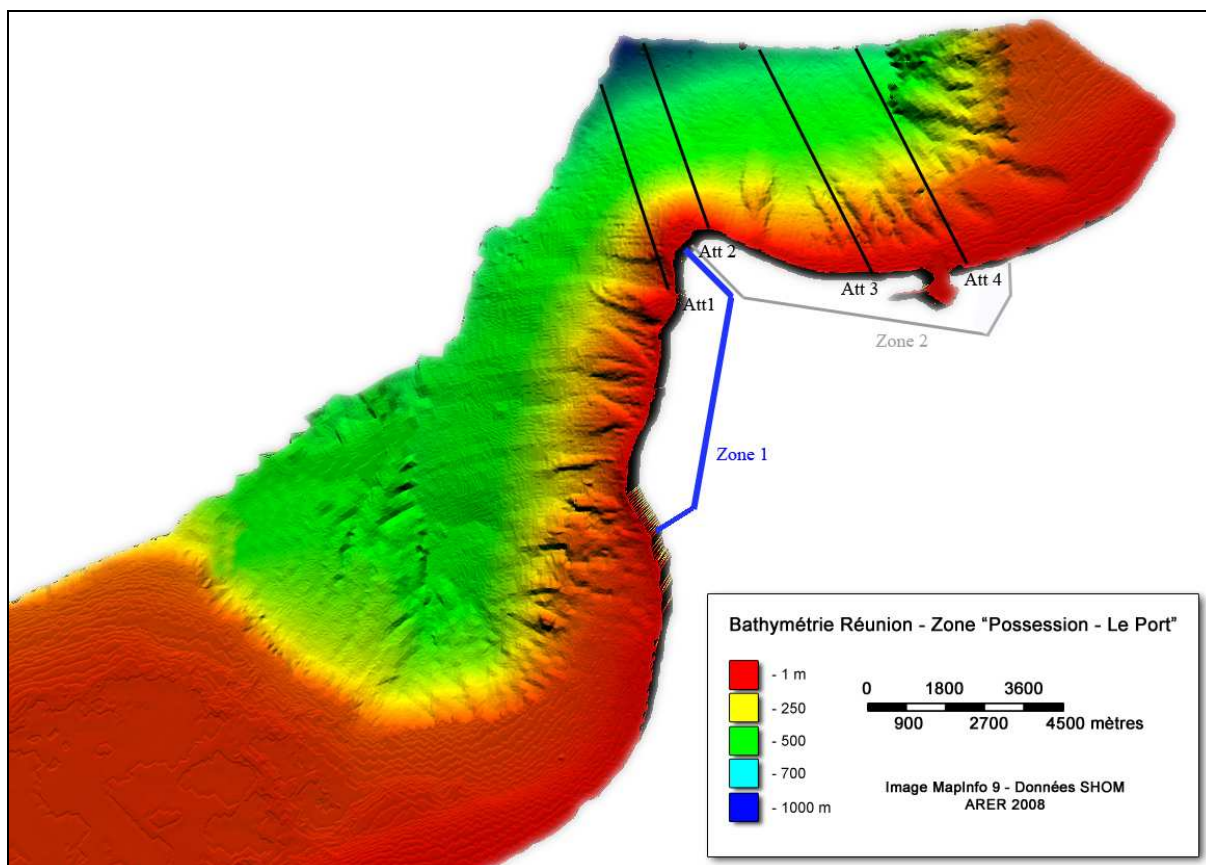


Figure 9 : Bathymétrie de la zone Nord-Ouest de La Réunion (source : ARER, 2008)

Le graphique suivant permet de comparer les différents profils bathymétriques, qu'emprunterait la Conduite d'Eau Froide au Port avec ceux des sites :

- du NELHA à Hawaï (source Makaï, site web)
- de la commune de Sainte Rose
- de Bois Rouge, Saint André, Réunion (source : Données bathymétriques du SHOM et de l'IFREMER).

Le meilleur profil portois pour un accès rapide aux 1000 mètres de profondeur (et au-delà) est celui de la Pointe des Galets (Att2), ceux du Port Ouest (Att 1) et du Port Est (Att 4) sont plus longs mais restent intéressants face aux profils bathymétriques de Bois Rouge. Le bon accès du profil de la Pointe des Galets (Att 2), ne concurrence pas directement les meilleurs profils bathymétriques mondiaux représentés par ceux de Sainte Rose et celui du site du NELHA à Hawaï.

La longueur de la CEF au Port serait un petit désavantage, mais il est techniquement possible de pallier les pertes de charges en augmentant la puissance de pompage.

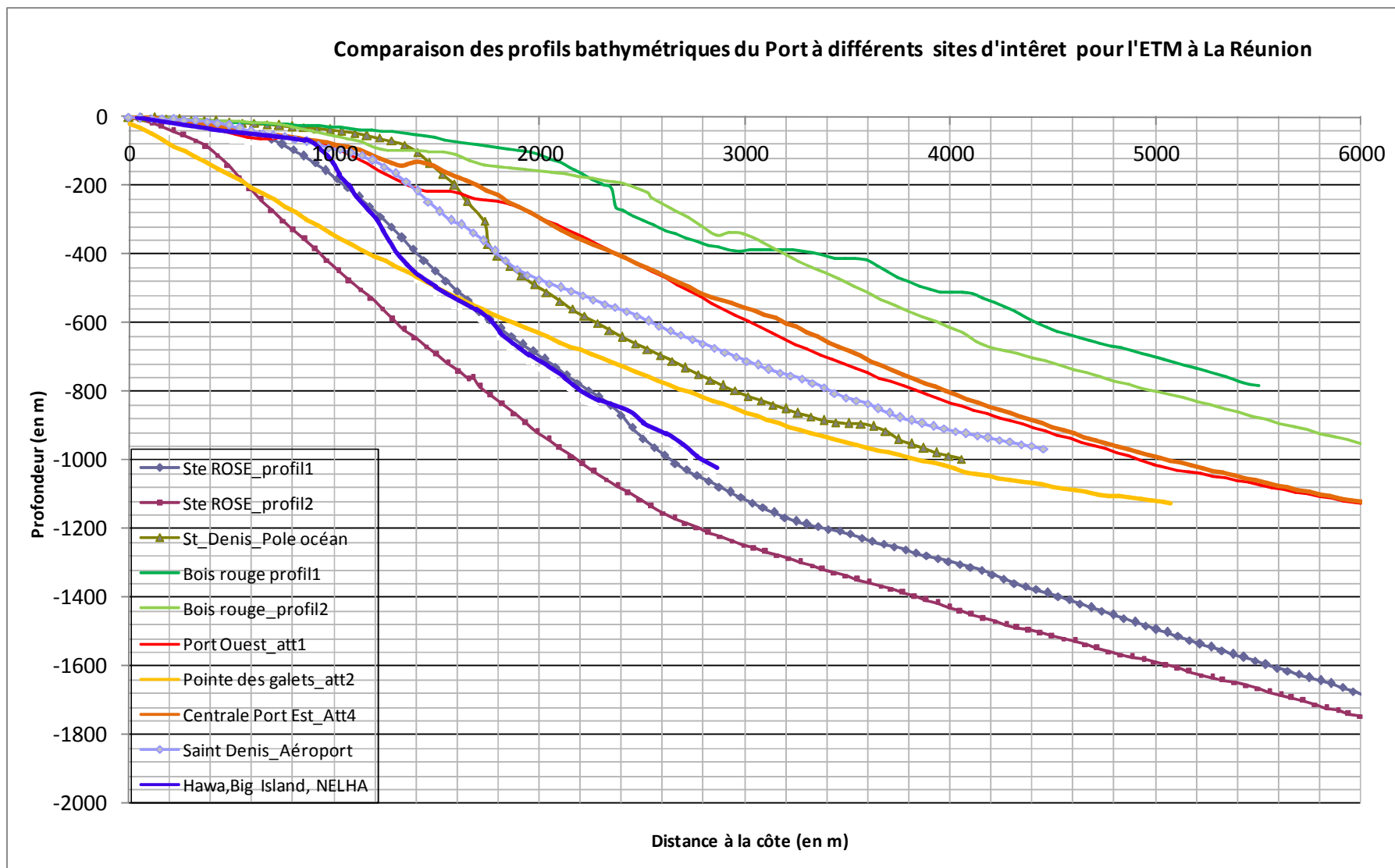


Figure 10 : Comparaison des profils bathymétriques du Port à différents sites d'intérêt pour l'ETM (Sources : références 11, 12 & 30)



Comme le synthétise le tableau suivant, les 1000 mètres de fond, pour l'Atterrage 2, seraient atteints avec une CEF d'une longueur minimale d'environ 3930 m et les 1100m de profondeur avec une CEF d'une longueur de 4320m. Les deux autres options d'atterrage (Att3 & Att4) ont un accès plus long vers les 1000 m de fond avec une taille de la CEF d'au minimum 4250 m pour l'Atterrage 3 et 5170m pour l'Atterrage 4. Ces zones présentent des canyons sous-marins (cf. Figure 9) où la CEF pourrait se glisser et ainsi être à l'abri. Bien que la CEF soit dans ce cas là plus longue, l'option de l'atterrage n°3 a l'avantage d'être à proximité de nombreuses activités à développer à terre. L'atterrage n°4, avec une CEF extrêmement longue, présenterait l'atout de coupler la centrale ETM à la future centrale fuel du port Est, tout en développant quelques activités à terre.

Atterrage	Port Ouest Embouchure Rivière des Galets (Att 1)	Pointe des galets (Att 2)			Rond Point de Tamatave/Ouest Nouveau Port (Att 3)	Digue Est du Nouveau Port (Att 4)
		900	1000	1100		
Profondeur (en m)	1000	900	1000	1100	1000	1000
Longueur approximative de la CEF (en m)	5139	3536	3929	4322	4243	5168

*Figure 11 : Tableau comparatif de la longueur des tuyaux en fonction de la profondeur*

L'accès le plus rapide se ferait à l'atterrage n°2. La longueur de la CEF demeure toutefois importante, ce qui augmentera les pertes de charges et demandera une puissance de pompage plus importante.

La centrale ETM de 5MWe nette (MWe : Mégawatt électrique), prévue à Tahiti en 1986, (cf. X, référence 4) prévoyait un tuyau d'une longueur de 2800m et d'un diamètre de 3m pour pomper de l'eau à une température de 4,4°C à 900m de profondeur.

Pour pomper de l'eau au Port à une température correspondante (cf. étude ARVAM, en annexe) à celle de Tahiti, il nous faudrait, au niveau de la Pointe des Galets (Att 2), une CEF d'une longueur de 4250 m atteignant les 1100m de profondeur. Dans le cadre de notre étude pour une centrale ETM d'une puissance nette de 2,5MWe, la CEF aurait approximativement un diamètre de 2m.

### III - 2 Géologie du fond marin

La géologie des fonds marins des côtes portoises sera certainement le point limitant à l'implantation d'un tuyau descendant vers les abysses.

La ville du Port est construite sur des formations alluviales correspondant au cône de déjection de La Rivière des Galets. Ce cône de déjection s'étend du lit actuel de la Rivière jusqu'à la Ravine à Marquet (Possession), qui sera découpé en deux zones

La première zone (Zone 1) s'étend de l'embouchure actuelle de la Rivière des Galets à la Pointe des Galets, incluant l'atterrage n°1. La seconde (zone 2) s'étend de La Pointe des Galets à la Ravine à Marquet et englobe les atterrages n°2, 3 et 4.

Plusieurs études géologiques (cf. références 5 et 6) classent ces deux zones comme suit :

- la zone 1 comme « présentant des risques avérés d'avalanches sous-marines ».
- la zone 2 comme « supposée instable » mais à l'échelle d'une génération humaine, cette hypothèse est à vérifier.

Selon les géologues, la structure alluviale de la Rivière des Galets est propice à la récurrence de phénomènes d'avalanches sous-marines. En effet, les débits de la rivière des Galets oscillent entre 500 et 1000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> lors des crues cycloniques et peuvent atteindre plusieurs milliers de m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> pour des crues décennales ou cinquantennales. Les pentes élevées du cône de déjection de la Rivière des Galets (~10° en moyenne) fait que le matériel grossier ne se stocke que de façon temporaire à proximité de la côte.

Sur toute la zone 1 (cf. Figure 9), les canyons prennent naissance à la côte, entre les isobathes 0 et -10 m. Ces canyons peuvent donc être régulièrement alimenté en sédiment soit directement par la rivière lorsqu'ils sont à proximités de l'embouchure, soit par les courants littoraux lors des fortes houles.

Sur la zone 2 s'étendant de la Pointe des Galets vers l'intérieur de la Baie de La Possession, les canyons sont plus distants de la côte, et leur morphologie est moins marquée que ceux de la zone 1. Ces canyons présentent toutes les caractéristiques de canyons en voie de comblement. Le transfert de sédiments via les canyons y est probablement moins actif que pour la zone 1.

La Pointe des Galets présente une forme particulière, qui permet de supposer la présence d'un substratum en place. Des campagnes géophysiques réalisées par le BRGM à la fin des années 70 et des forages effectués dans cette zone en 1992 dans le cadre des programmes de recherche en eau (Billard, 1994 ; cf. X, référence 9) auraient pu nous informer de la structure géologique de cette pointe. Malheureusement, ces archives n'ont pu être retrouvées.

La Figure 12 est une carte des formations géologiques sous-marines réalisée par Jean-François Dehler (Dehler, 2005 ; cf. X, Référence 5). Cette figure montre que le cône de déjection de la Rivière des Galets est caractérisé par un certain nombre de structures en « amphithéâtres ». Ces structures son interprétés comme d'anciennes cicatrices de glissements.

Ces glissements majeurs se produisent à des échelles de temps géologique et non historique. Ils ne représentent pas un risque à échelle humaine. L'aléa réel est constitué par les petites instabilités sous-marines susceptibles d'endommager les installations.

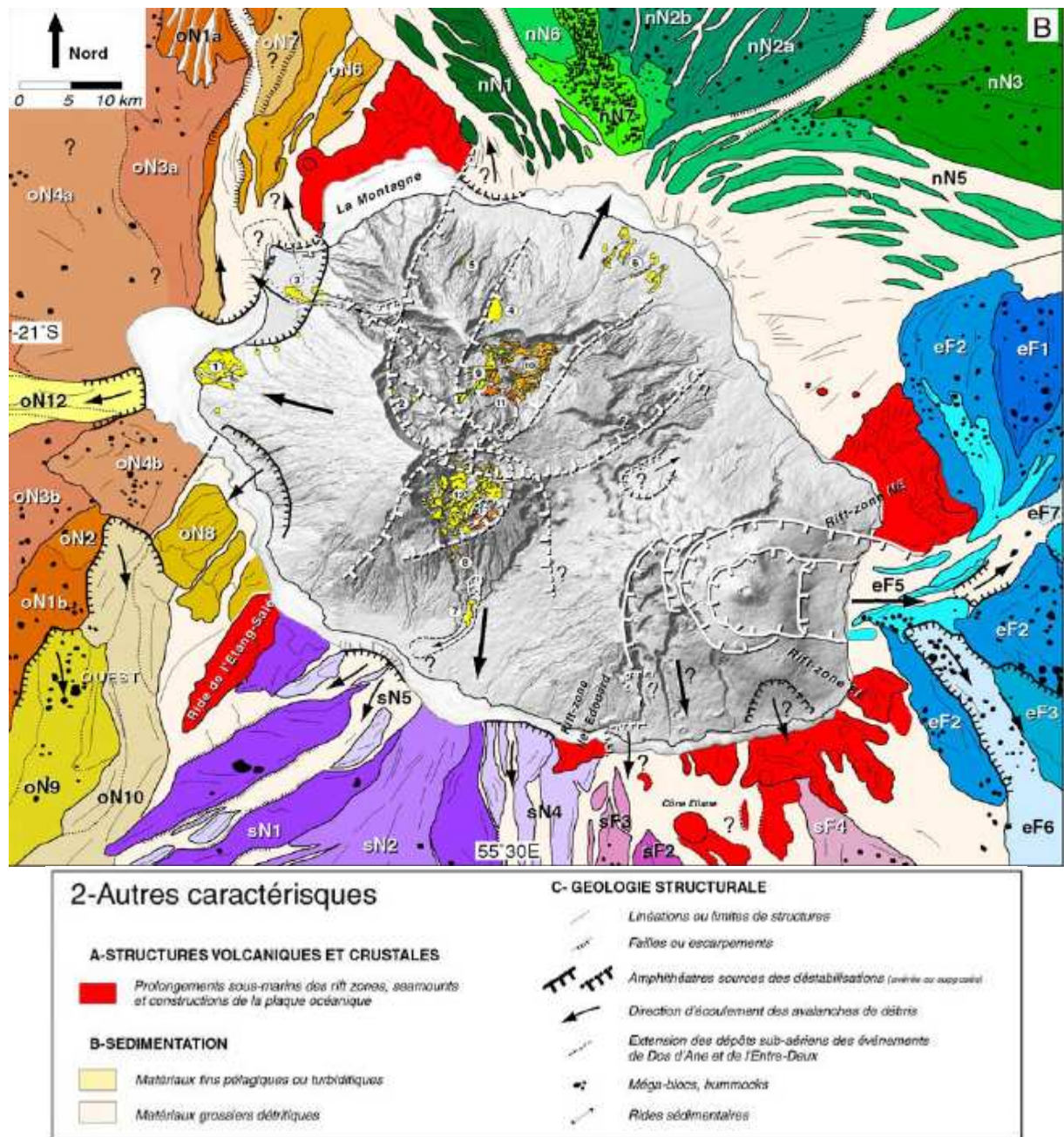


Figure 12 : Carte géologique de La Réunion (Thèse de doctorat de Mr. DEHLER de l'université de Clermont-Ferrand)  
cf. X, Référence 6



### III - 3 Choix de l'atterrage

La Conduite d'Eau Froide doit être très solidement ancré mais cela ne sera pas chose aisée sur du matériel alluvionnaire, par définition meuble. La zone 1 ne représente pas un choix prioritaire du fait de l'aléa trop important relatifs aux risques d'avalanches sous-marines.

L'atterrage n°4 sera également évité car la CEF serait beaucoup trop long et les pertes de charge beaucoup trop importantes. Au départ, cette solution avait été imaginée pour réaliser un couplage avec la future centrale thermique EDF, malheureusement cela ne semble pas évident (cf. §IV - 4).

Les deux solutions restantes sont donc l'atterrage au niveau de la Pointe des Galets (Att2) et celui du rond point de Tamatave (Att3) à l'Ouest du Nouveau Port. L'atterrage n°2 de la Pointe des Galets présente la meilleure bathymétrie et permettrait le développement d'autant d'activités que l'Atterrage n°3.

Malgré un accès plus long aux 1000 m, la position plus centrale de l'atterrage n°3 serait un bon compromis pour le développement d'activités de valorisation de l'eau froide profonde sur l'ensemble du territoire de la ville du Port.

Pour l'atterrage n°2, les rapports DDE-BRGM (cf. X, références 9 et 10) sur le forage de la Pointe des Galets auraient pu nous donner la profondeur de la couche dure. En baie de La Possession, la thèse de Roland Troadec (cf. X, référence 5) évoque un substratum rocheux à 40 mètres de profondeur, ce qui suggère une couche de matériel alluvial de faible épaisseur. Des points d'ancrage de la CEF sur du matériel dur est donc envisageable.

Sur ses premiers mètres et ce jusqu'à une dizaine de mètres de profondeur, la CEF serait ensouillée grâce au dragage du fond marin, d'autant plus que le matériel de dragage est déjà disponible au Port Ouest. Au-delà des 10 mètres de profondeur et ce jusqu'à 35-40m de profondeur (soit dans la zone d'action de la houle), la CEF doit être solidement ancrée. Réaliser des ancrages grâce à des pieux verticaux, ou bien des forages horizontaux semblent être les solutions pour une bonne tenue de la CEF sur ce type de matériel.

Se trouver dans une zone de type alluvionnaire et sur la côte sous le vent (côte Ouest de l'île de La Réunion) présentera aussi certains atouts.

D'une part, la CEF reposerait sur toute sa longueur sur du matériel alluvionnaire. Comme la structure du sol ne changerait quasiment pas, les études préliminaires en seront facilitées et la mise en œuvre de la CEF serait plus aisée que sur un fond marin, dont la structure est changeante.

D'autre part, des courantomètres ont été disposés à l'entrée des Port Est et Ouest, par la DDE et la capitainerie du Port Est, pour faciliter l'entrée de gros navire dans ces enceintes maritimes. Les données de courantologies, récoltées auprès de ces organismes mettent en avant l'absence de courants (<0,2 nœuds) à des profondeurs de 15m (soit dans la zone d'actions de la houle) et cela même en cas de forte houle, ce qui serait propice à la pose de la CEF.

En clair et sans toutefois écarter l'atterrage n°3 situé au niveau du rond point de Tamatave, le meilleur atterrage semblerait être l'atterrage n°2 (Att2), situé au niveau de la Pointe des Galets. Pour confirmer cette conclusion, il sera nécessaire de réaliser une petite étude géotechnique ciblée sur ces deux points d'atterrages. De petits bureaux d'études locaux sont capables de réaliser des carottages, dragages et sondages dans ces zones précises pour évaluer la stabilité du fond marin et le risque pour la CEF.

Selon les atterrages n° 2 et 3 de la CEF, plusieurs activités pourraient se développer au Port. Les paragraphes suivants traiteront de ces activités susceptibles, en intégrant dans ces grandes lignes une analyse économique et financière.



*Figure 13 : Carte de la ville du Port (source : Google Earth)  
Légende : En jaune, lieux géographiques; En bleu clair, points cités dans le document*



### III - 4 ***Ancrage d'une plateforme off shore***

Avec l'augmentation du prix du pétrole et l'arrivée prochaine du Peak-oil (2016-2020), le prix de l'énergie augmentera inéluctablement. L'hypothèse d'implanter une centrale ETM en off shore, représentant un important investissement, ne sera plus utopie avec la production d'un kWh compétitif grâce à l'ETM. Cette centrale ETM offshore se focaliserait sur la production d'électricité de base avec une source renouvelable, ce qui serait une solution pour l'autonomie énergétique de l'île de La Réunion. Un câble électrique sous marin pourrait ainsi raccorder cette plateforme en pleine mer au réseau électrique local via la future centrale fuel du port Est, qui disposera des infrastructures pour la distribution de l'électricité.



*Figure 14 : Plateforme pétrolière récupérable pour la création d'une centrale ETM Offshore et image d'une centrale ETM off-shore (source : Ocean Power Plant)*

Produire de l'eau douce à partir de cette centrale et l'acheminer à terre via un tuyau sous-marin seraient aussi possible. La baie de La Possession pourrait être propice à l'arrivée de ce câble et de ce tuyau sous marin. La remontée à la surface de l'EFP, très riche en nutriments, redynamiserait le secteur de la pêche locale en créant une zone d'upwelling artificiel au large du Port.

*(Upwelling : La remontée d'eau (upwelling en anglais) est un phénomène océanographique qui se produit lorsque de forts vents marins (généralement des vents saisonniers) poussent l'eau de surface des océans laissant ainsi un vide où peuvent remonter les eaux de fond et avec elle une quantité importante de nutriments. Les phénomènes de remontée d'eau sont localisés et leurs résultats sont une mer froide et riche en phytoplancton. Concrètement pour les pêcheurs, la remontée d'eau se traduit par une augmentation importante du nombre de poissons).*

Le choix d'une plateforme offshore aurait l'avantage de se placer au dessus de la ressource en eau froide et limiterait ainsi la longueur de la Conduite d'Eau Froide (CEF). Vu la bathymétrie des côtes portoises, cette centrale se situerait non loin des côtes. Et dans ce cas là, la nature des fonds n'aurait qu'une faible incidence sur l'implantation du tuyau d'eau douce et du câble électrique et plus aucune influence sur l'imposante et stratégique CEF.



## IV - Production d'électricité grâce à l'Energie Thermique des Mers

### IV - 1 *ETM simple*

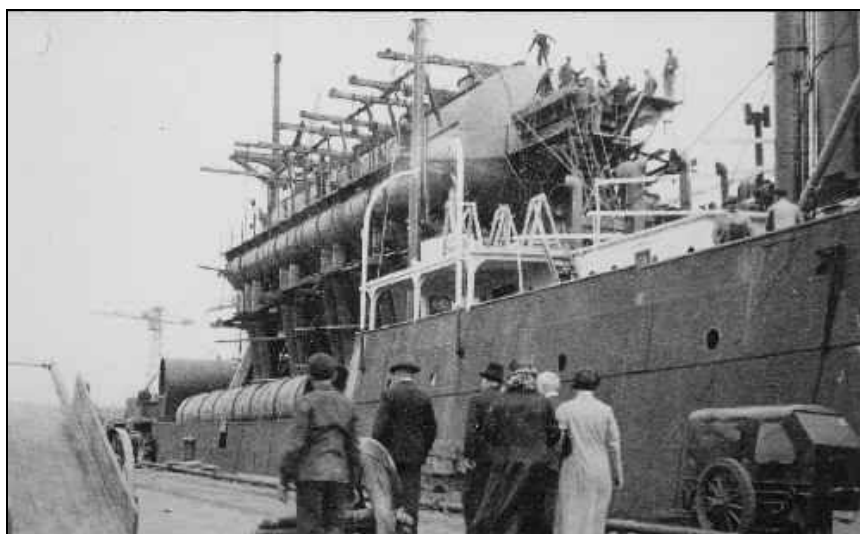
#### IV-1.1 Etats des lieux de la technologie pour la production d'électricité

Il y a déjà plus d'un siècle que l'on a découvert, à quelques encablures sous la surface de tous les grands océans, une ressource quasi inépuisable d'eau presque glacée. Dans la zone intertropicale, il existe de ce fait une différence de température pouvant atteindre 25°C entre des eaux chaudes de surface et des eaux froides du fond. Dès qu'elle fut reconnue scientifiquement, l'existence de ce gradient thermique frappa l'imagination d'hommes ingénieurs : romanciers et savants.

En 1869, Jules VERNE fait dire au Capitaine NEMO "j'aurais pu... en établissant un circuit entre des fils plongés à différentes profondeurs, obtenir l'électricité par la diversité des températures qu'ils éprouvaient" ("Vingt mille lieues sous les mers" - Jules Verne. 1869 - Chapitre XII "Tout par l'électricité").

En 1881 d'ARSONVAL évoque la possibilité d'utiliser le Gradient Thermique des Mers (GTM) pour produire de l'énergie mécanique. Il suggère de faire circuler un fluide intermédiaire entre un évaporateur porté à la température des eaux de surface et un condenseur refroidi par les eaux profondes. Le concept de l'ETM en cycle fermé est né. En 1913, l'Américain CAMPBELL propose d'utiliser l'ammoniac comme fluide intermédiaire.

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



*Figure 15 : Usine ETM flottante "La Tunisie", réalisation de G. Claude pour la vente de glace, Brésil 1935*

Néanmoins, CLAUDE est convaincu que l'ETM n'est pas économiquement compétitive avec les autres sources d'énergie de son époque, l'hydraulique en particulier. Pour lui, déjà, l'avenir industriel de l'exploitation du gradient

thermique des mers passait par la production intégrée "multi produits" : énergie, eau douce et froid. C'est à partir de cette vision qu'il entreprend entre 1933 et 1935 la construction d'une usine à glace pour le Brésil "LA TUNISIE", dont l'installation en mer se soldera par un échec.

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

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

Les Français, avec un consortium comprenant l'IFREMER, ont approuvé la faisabilité économique d'une centrale de 20 MW à Tahiti. Leur programme prévoyait la construction d'une centrale pilote de 5 MW avant 1989. Mais la chute du cours du pétrole en 1986 a mis un terme à l'ensemble des grands projets. Les gouvernements respectifs ont alors stoppé (France) ou fortement réduit (Japon, Etats-Unis) leurs subventions.

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

Les États-Unis ont plusieurs projets pour Hawaï et pour leurs bases militaires d'outre-mer, dont une de 8 MW pour Diégo Garcia dans l'Océan Indien. La dernière réalisation connue est la centrale ETM « Sagar Shakti » de 1 MW construite en coopération indo japonaise. Elle est adaptée aux besoins de petites communautés littorales en électricité et en eau douce. Elle a été présentée en 2001 avant d'être remorquée pour essais sur la côte près de Tuticorin au sud-est du continent.

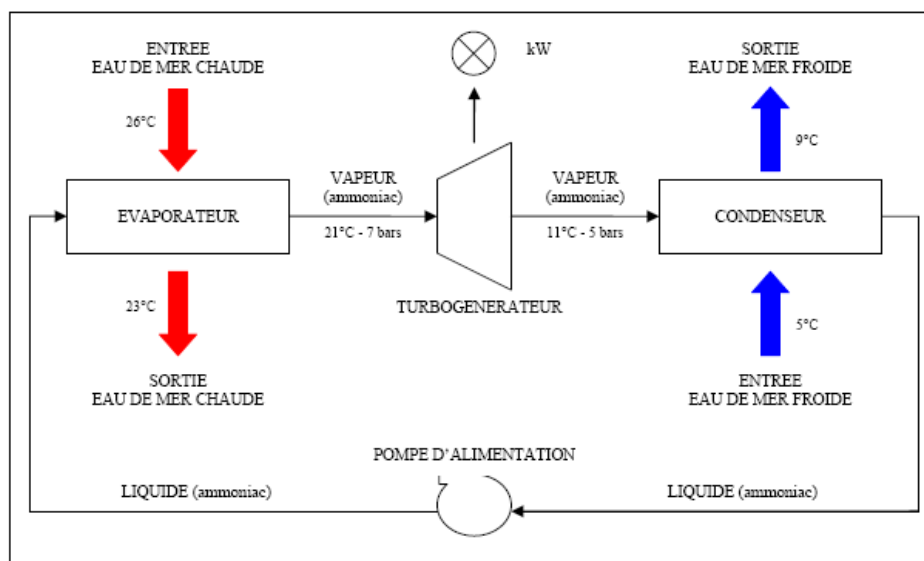
En résumé, plusieurs expériences ont bel et bien confirmé la possibilité de produire de l'énergie à partir de la différence de température entre l'eau froide profonde et l'eau chaude de surface. En 2008, l'envolée du prix du baril de pétrole positionne de nouveau ce procédé comme une solution (d'autonomie énergétique) pour la production d'énergie (de base) pour les îles tropicales.

## IV-1.2 Principe de fonctionnement pour la production d'électricité d'une centrale ETM

Une centrale ETM est constituée:

- D'un sous-système de production d'énergie, avec comme composants principaux:
  - L'évaporateur, dans lequel un fluide dit « de travail » passe de la forme liquide à la forme vapeur, grâce à l'apport de chaleur transmis par la circulation de l'eau chaude de surface.
  - Le condenseur, refroidi par la circulation d'eau froide profonde, condense la vapeur après qu'elle soit passée dans une turbine.
  - La turbine qui transmet son énergie mécanique à un turboalternateur.
- D'un sous-système d'alimentation en eau, chaude et froide, respectivement pompée en surface et en profondeur dans l'océan.
- De l'infrastructure, qui supporte et abrite tous les composants nécessaires au fonctionnement de l'usine.

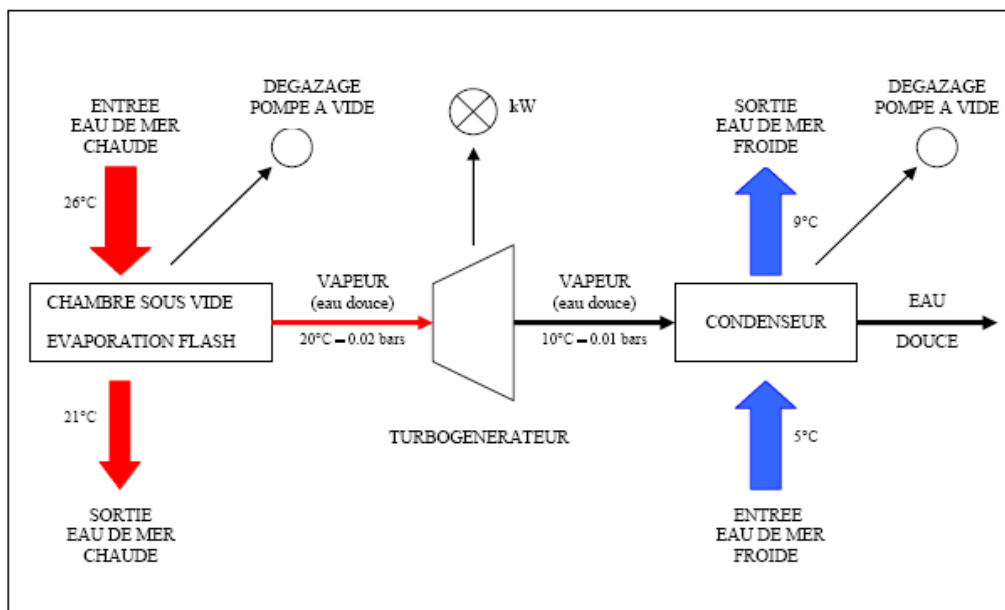
La technologie des composants pour la production d'énergie dépend du choix du fluide de travail. Au stade actuel du développement de l'ETM, il se dégage deux grandes options. Dans le domaine des températures disponibles, entre 4°C et 28°C, l'ammoniac et l'eau peuvent être utilisés.



*Figure 16 : Schéma de fonctionnement d'une centrale ETM en cycle fermé  
(Source : Etude David LEVRAT, référence 3)*

Avec l'utilisation de l'ammoniac, on parle d'ETM à cycle fermé car l'ammoniac est utilisé comme fluide de travail mais cette solution s'appliquerait aux grosses centrales ETM (100 MW de puissance).

En utilisant de l'eau chaude de surface comme fluide de travail, on parle d'ETM à cycle ouvert car l'eau chaude n'est pas « réutilisée ». Cette dernière option est plus facile à mettre en œuvre car les échangeurs sont plus simples et moins complexes pour de petites installations, ( $P < 20\text{MW}$ ). En cycle ouvert, l'eau chaude se vaporise pendant son passage dans l'évaporateur maintenu sous très faible pression (voisine de 3 kPa). La vaporisation de l'eau de mer crée de l'eau douce, qui peut se vendre au Japon et aux États-Unis, comme le font aujourd'hui les Hawaïens.



*Figure 17 : Schéma de fonctionnement d'une centrale OTEC à cycle ouvert  
(Source : Etude David LEVRAT, référence 3)*

D'autres procédés plus complexes pour la production d'électricité existent. Ils ne seront pas étudiés dans cette note d'opportunités pour la ville du Port.

### IV-1.3 Choix du principe de fonctionnement

Une centrale ETM au Port entrerait, dans la phase d'expérimentation des petites centrales ETM littorales, avec le concept multi produits pour qu'une certaine rentabilité soit atteinte. La production d'électricité ne serait pas nécessairement l'activité principale et de ce fait le process utilisé serait le cycle ouvert. Les centrales à cycle ouvert ne peuvent généralement atteindre des puissances supérieures à une dizaine de MW à cause des problèmes de dimensionnement des turbines. Ce paragraphe traitera donc de la production électrique d'une centrale ETM à cycle ouvert en fonction de la différence de température entre l'eau chaude de surface et l'eau froide profonde au Port. Un paragraphe sera aussi consacré au couplage à la future centrale fuel du port Est.

## IV - 2 Température de l'eau

### IV-2.1 Profil de température (thermocline) au Port

Les prélèvements d'Eau Froide Profonde réalisés par l'ARVAM, le 24 Avril 2008, ont permis de caractériser la thermocline en face du Port. Selon le rapport de l'ARVAM (cf. annexe), la thermocline mesurée au Port (en orange) est typique à celles de l'Océan Indien et le graphe suivant la compare à celles d'autres sites, répartis aux 4 coins du globe. La courbe de température de l'île Maurice possède une forme identique à celle mesurée au Port. La température mesurée au Port de 5,1°C à 1000m de fond est l'une des plus basses et présente de belles perspectives pour le développement de l'ETM. Les thermoclines de Tahiti et de Fidji seraient cependant plus intéressantes pour le développement de l'ETM.

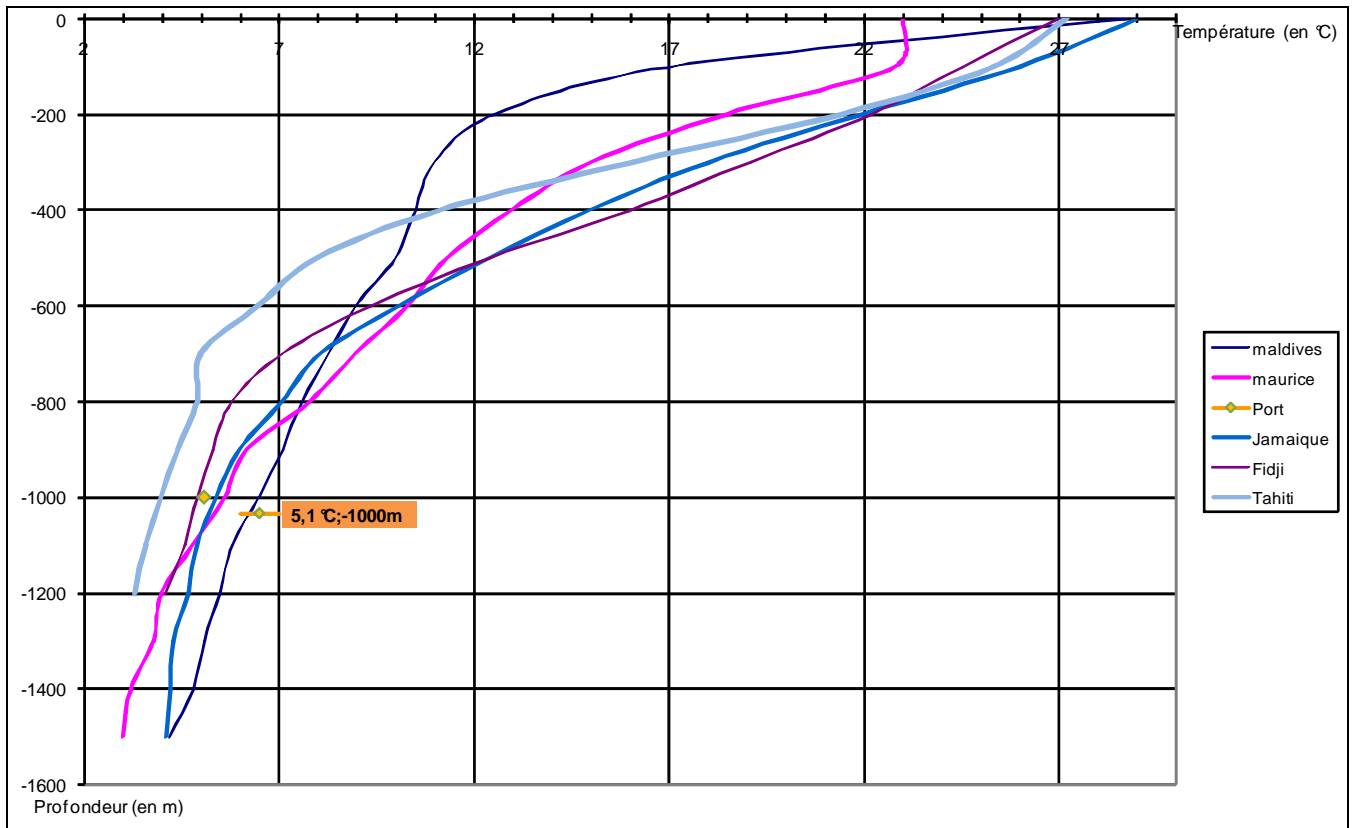


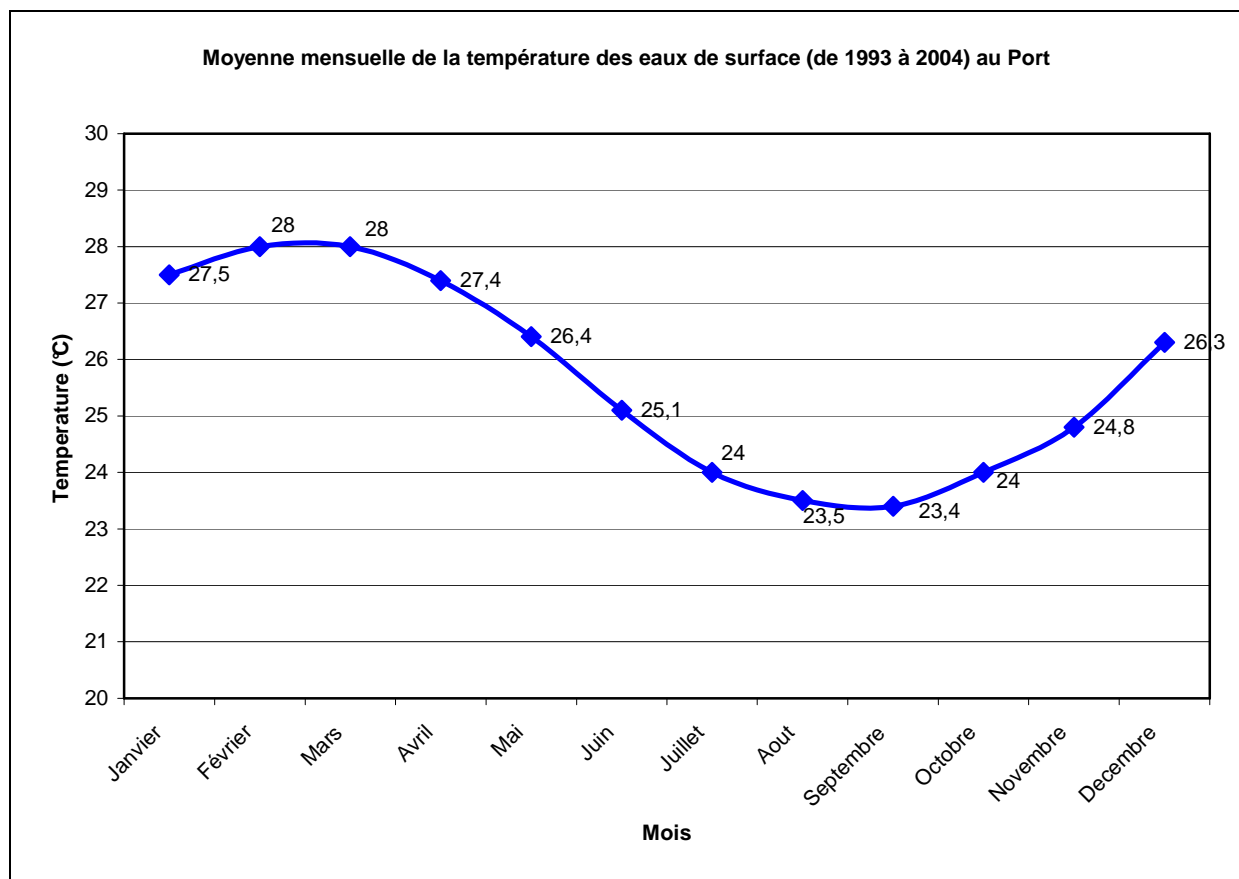
Figure 18 : Comparaison de la thermocline du Port à d'autres sites mondiaux  
(Sources : références 4 & 25)

## IV-2.2 Température de l'eau de surface

La production d'électricité est réalisée grâce à la différence de température entre l'eau de surface et l'eau profonde. Il est essentiel de connaître les variations annuelles de la température de l'eau de surface pour vérifier la stabilité du gradient thermique disponible au long de l'année.

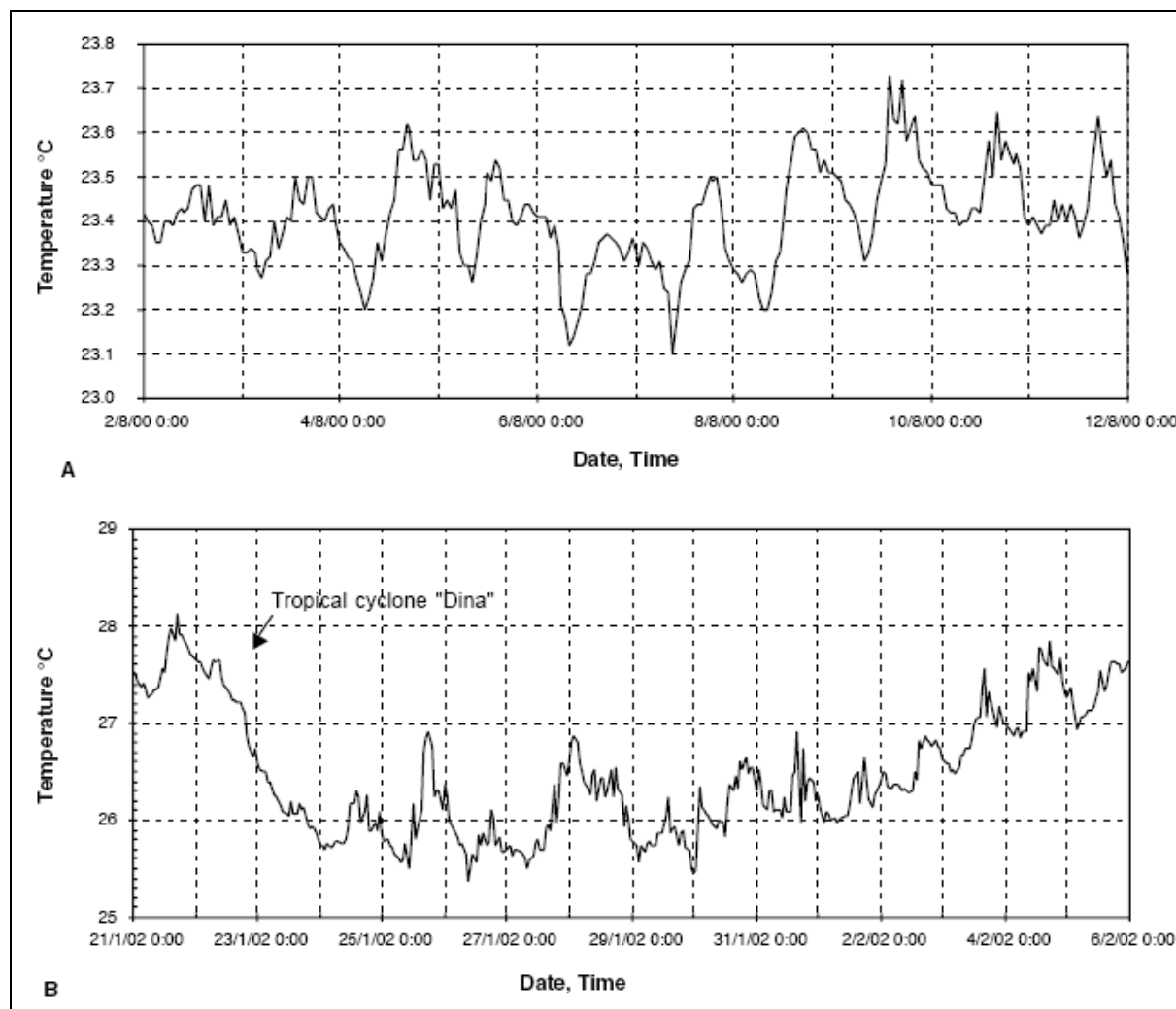
En 2007, le laboratoire d'écologie marine (ECOMAR) de l'Université de La Réunion et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) ont conjointement publié un article sur la température quotidienne de l'eau de surface au Port (de Juillet 1993   Avril 2004). Le point de relevé des températures de l'eau de surface se trouvait au Port.

Le graphe ci-dessous indique la température moyenne mensuelle, calculée grâce aux dix années de mesure quotidienne. La température minimum atteinte durant cette décennie était de 22,3 C le 23 Juillet 1993 et la température maximale était de 29,1 C, le 18 Février 1998, ainsi que les 3 et 4 Mars 2004.



*Figure 19 : Graphe des températures moyennes mensuelles de 1993 à 2004  
(Source des données : article François CONAND de l'Université de La Réunion)*

Cette étude a permis de caractériser les variations de température durant 24 h. Elle varie de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  pour une journée typique d'hiver. Les températures les plus basses sont observées le matin entre 6h et 8h et les plus hautes dans l'après midi entre 15h et 18h, (cf. figure suivante). En été, les cyclones peuvent affecter fortement la température de l'eau. Un exemple (cf. figure suivante)  tait le passage du cyclone « Dina », lorsque l' cil du cyclone était au plus proche de la station de mesure, une chute de 2,4 C de la température a été constatée associée à un phénomène de refroidissement d'une durée de 2 jours. La température de l'eau est revenue à sa normale saisonnière une semaine plus tard.



*Figure 20 : Variation de température de l'eau de surface au Port durant une journée hivernale à La Réunion (graphe A)*

*Figure 21 : Variation de la température de l'eau de surface lors du passage du cyclone Dina (graphe B)*

*(Source : article François CONAND de l'Université de La Réunion)*

Dans le cadre d'un projet de surveillance et de protection de l'environnement, la DIREN (Direction Régionale de l'Environnement) effectue des mesures de température de l'eau à la surface, à 35 et 70 mètres de profondeur.

Les deux graphiques suivants ont été réalisés grâce aux données fournies par la DIREN. La courbe des températures moyenne mesurées durant 10 années ( tude de l'université) y a été ajoutée à titre de comparaison.

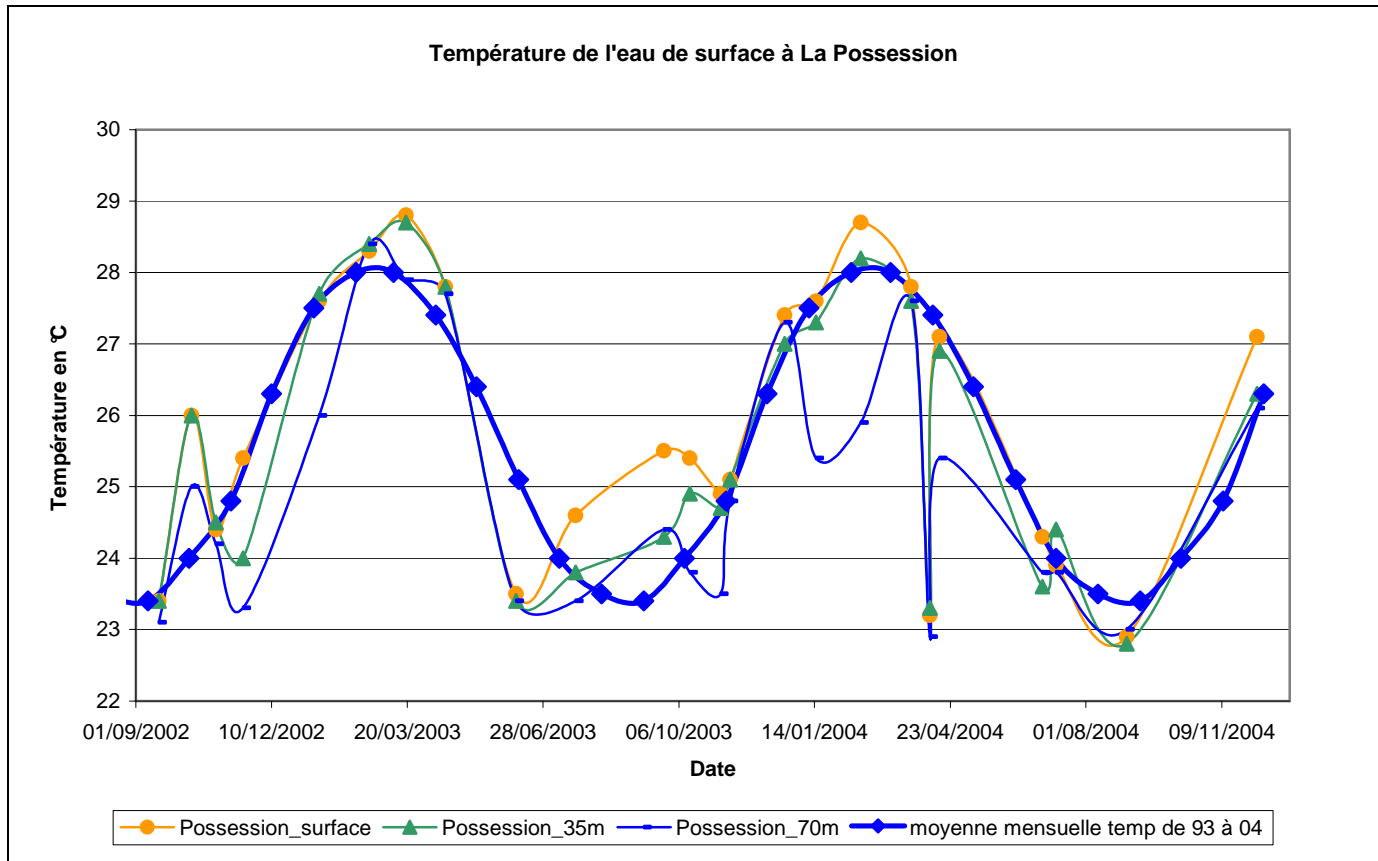


Figure 22 : Température de l'eau de surface à La Possession

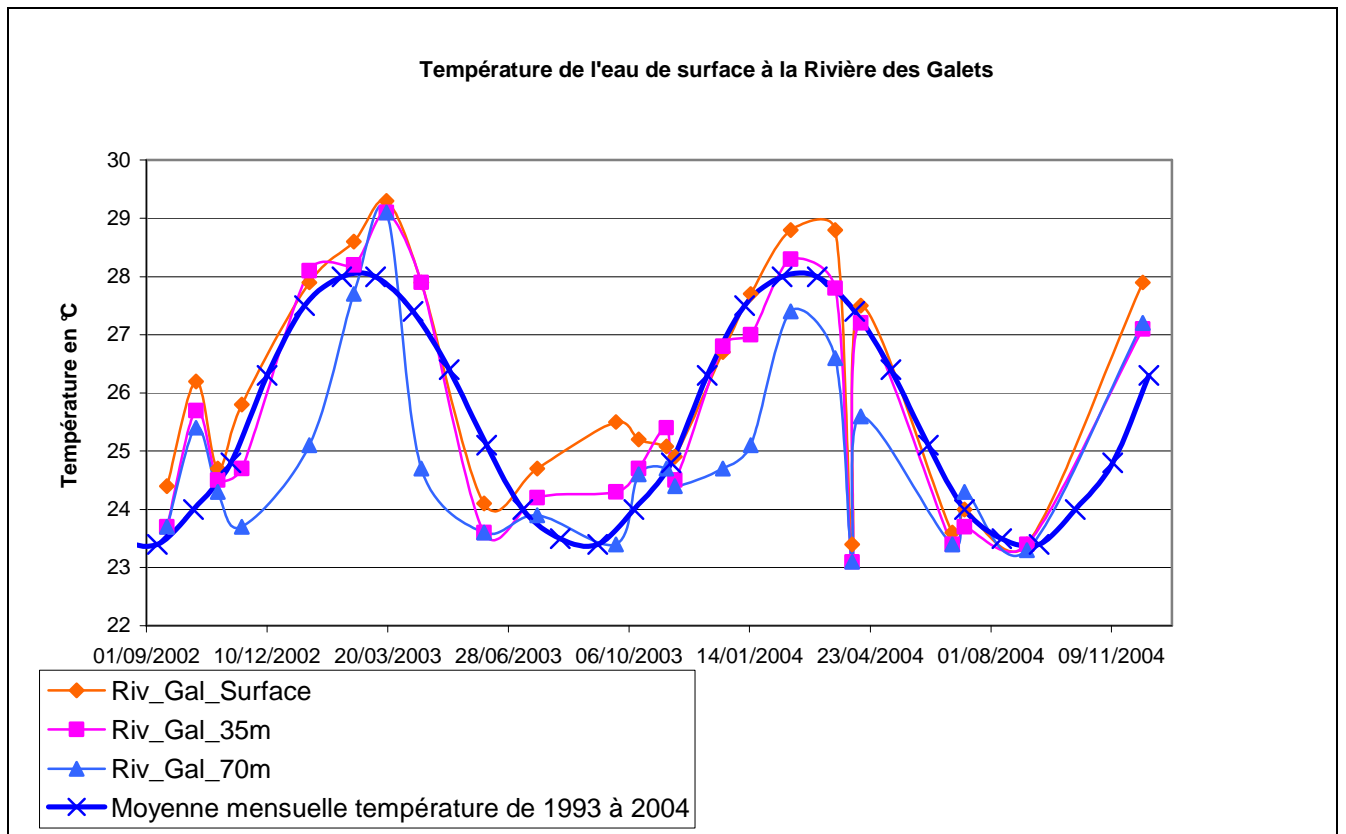


Figure 23 : Température de l'eau de surface à La Rivière des Galets





Ces deux graphes nous permettent d'observer que les données recueillies sont en corrélation avec la moyenne des températures d'eau de surface calculées de 1993 à 2004. Il est aussi possible de comparer la différence de température de l'eau à la surface et celle à 35 et 70m de profondeur. Durant l'été austral, on observe une différence de 2°C à 3°C entre l'eau de surface et celle à 70 m de profondeur, et de moins de 2°C en hiver. La différence de température entre l'eau de surface et l'eau à 35 mètres de profondeur est généralement inférieure à 1°C.

Pour la conception de la centrale ETM, des hypothèses seront émises pour le calcul de la différence de température disponible. Le pompage de l'eau chaude se faisant aux alentours des 40 mètres de profondeur (et non pas directement à la surface), la première hypothèse sera que la température de l'eau mesurée à la surface de 1993 à 2003, soit affectée de 1 degré. Ensuite à cause des phénomènes de réchauffement lors de sa remontée, la seconde supposition est que l'eau froide profonde arrive à terre à une température de 6°C et non pas de 5,1°C. Le graphe suivant et le tableau ci-contre représentent la variation de la différence de température entre l'eau chaude de surface et l'eau froide profonde disponible au Port.

	$\Delta T$ (en °C)
Janvier	20,5
Février	21
Mars	21
Avril	20,4
Mai	19,4
Juin	18,1
Juillet	17
Aout	16,5
Septembre	16,4
Octobre	17
Novembre	17,8
Decembre	19,3

Figure 24 : Variation de la différence de température entre l'eau chaude de surface et l'eau froide profonde

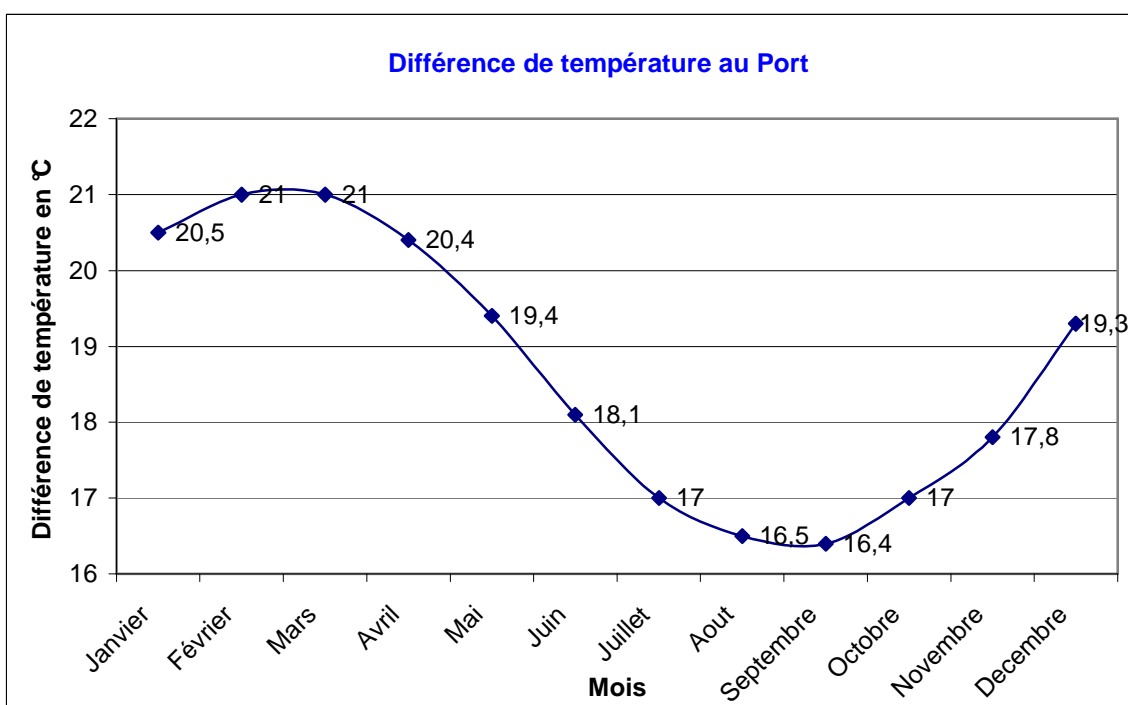


Figure 25 : Variation de la différence de température disponible au Port durant une année

### IV - 3 Dimensionnement de la centrale ETM

Le choix le plus judicieux pour la ville du Port serait d'installer une centrale à cycle ouvert. En effet, la production d'eau potable (ou de l'eau pour l'irrigation) serait un atout majeur pour ce territoire dont les ressources en eau deviennent problématiques. Tout comme la climatisation industrielle serait un atout pour la maîtrise de la demande en énergie de la zone industrielle du Port Ouest. Notre étude se basera sur une centrale ETM, conçue pour fournir une puissance de 2,5MW nette pour un écart de température de 20°C.

En termes de dimensionnement, la CEF aurait un diamètre intérieur d'environ 2m. La vitesse de l'eau à l'intérieur de celle-ci a été posée à 1,2m/s, ce qui correspond à un débit d'eau froide d'environ 3,8m<sup>3</sup>/s (cf. X, référence 4). Le débit d'eau chaude serait quant à lui, le double de celui de l'eau froide, soit environ de 7,6m<sup>3</sup>/s. L'emprise au sol de la centrale ETM ne peut être clairement définie, mais il peut être estimé une surface au sol nécessaire d'au moins 5000m<sup>2</sup>, pour le terrain, la centrale ETM, la production et la distribution d'eau douce et les stations de pompage d'eau froide et d'eau chaude.

Selon la bibliographie (cf. X, Références 3, 1,2 et 7), un écart de température de 1°C supplémentaire permettrait de produire 15% d'énergie supplémentaire. Cela est réversible avec une diminution de 15% de la puissance si la différence de température diminuait de 1°C. La courbe de production énergétique serait directement proportionnelle à la variation de la Différence de Température (DT) au Port (cf. Figure 25) cette solution n'optimise aucun paramètre de la DT et est appelée 'ETM non optimisée' sur la figure suivante.

Par ailleurs, il est possible d'optimiser la production d'électricité en diminuant l'impact de la différence de température. Il faudra pour cela agir sur la DT de travail de la turbine, les débits d'eaux, les échangeurs, etc.... Le bénéfice de l'optimisation est donc de récupérer plus de puissance quand DT>DTdesign et d'en perdre moins quand DT<DTdesign (avec ici DT design =20°C). Des abaques (cf. Référence 7) donnent ces facteurs d'optimisation et permettent de produire le tableau suivant.

	$\Delta T$ (en °C)	Puissance optimisée (en MW)	Puissance non optimisée (en MW)	Production ETM optimisée (en MWh)	Production ETM non optimisée (en MWh)
Janvier	20,5	2,690	2,688	1743	1742
Février	21	2,889	2,875	1872	1863
Mars	21	2,889	2,875	1872	1863
Avril	20,4	2,651	2,650	1718	1717
Mai	19,4	2,283	2,275	1480	1474
Juin	18,1	1,857	1,788	1203	1158
Juillet	17	1,542	1,375	999	891
Aout	16,5	1,412	1,188	915	770
Septembre	16,4	1,387	1,150	899	745
Octobre	17	1,542	1,375	999	891
Novembre	17,8	1,767	1,675	1145	1085
Decembre	19,3	2,249	2,238	1457	1450
Total en MWh/an				16 301	15 649
Différence en pourcentage entre la production d'une centrale ETM optimisée et non optimisée				4,2%	

*Figure 26 : Variation de la puissance et de la production d'une centrale ETM (de 2,5MW nette) optimisée et d'une autre non optimisée en fonction de la variation de la différence de température entre l'eau de surface et l'eau profonde (Source : ARER, référence 7)*

Le graphe suivant montre bien la différence entre la puissance d'une centrale ETM optimisée et non optimisée. La puissance nominale de conception de la centrale est de 2,5MW nette, schématisée par la courbe verte.

La production mensuelle d'énergie de ces deux centrales ETM est présentée dans le tableau ci-contre avec un taux d'utilisation de 90% (soit 7880h/an) des centrales. Une centrale ETM optimisée de 2,5 MW produirait environ 16 300 MWh/an, soit 4,2% d'énergie supplémentaire qu'une centrale ETM non optimisée produisant 15 650 MWh.

Pour une augmentation de la moyenne annuelle du DT de 1°C, la production énergétique de la centrale ETM de 2,5MW nette optimisée serait de 18 970MWh, correspondant à une augmentation de 16,4% de la production énergétique. La différence de production énergétique serait de 3320 MWh, soit la production annuelle d'une centrale photovoltaïque d'environ 2,5MWc pour un ensoleillement de 1350h/an.

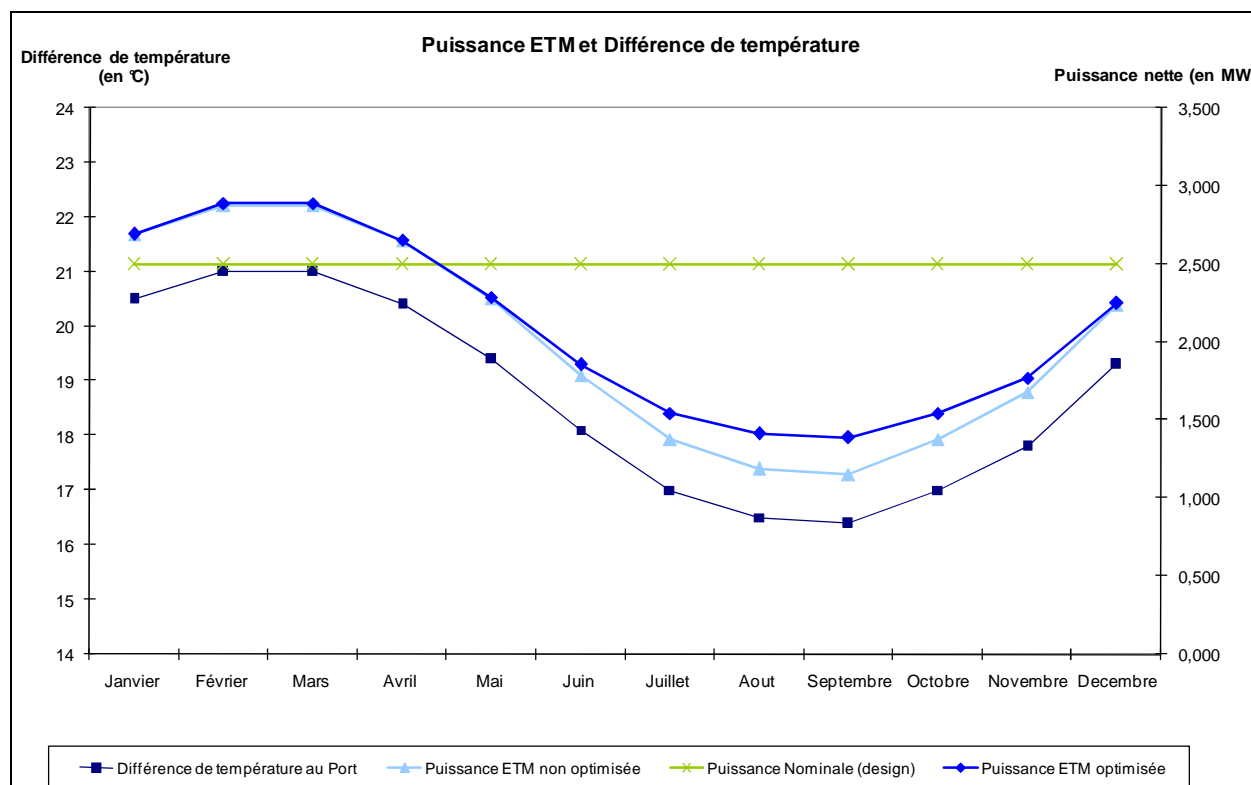


Figure 27 : Puissance de la centrale ETM selon les variations de la DT

L'exploitation d'une centrale ETM peut être contrôlée en faisant varier plusieurs paramètres pour optimiser la production en fonction des variations de la différence de température entre l'eau chaude de surface et l'EFP. Le paragraphe suivant traite d'un couplage à une centrale thermique, dont on récupérerait l'eau chaude afin d'améliorer l'écart de température et par conséquent la rentabilité de la centrale ETM.



## IV - 4 Analyse d'opportunité du couplage ETM - Centrale thermique du Port Est

### IV-4.1 Contexte du couplage ETM et centrale thermique

Une opportunité résidait dans le couplage de la centrale ETM à la future centrale fuel du port Est. Les centrales thermiques utilisent habituellement de l'eau pour leurs refroidissements. Un exemple est la centrale thermique du Port Ouest, qui utilisera, jusqu'à son démantèlement en 2011, environ 700 000 m<sup>3</sup>/an d'eau douce. Cette eau, portée à environ 60°C, pourrait être utilisée pour augmenter la différence de température dans la centrale ETM. Il s'en suivrait une augmentation de la production de la centrale ETM, qui favoriserait la rentabilité du projet.

Malheureusement, ce couplage ne pourrait avoir lieu avec la future centrale fuel du port Est, avec le design actuellement présenté par EDF. Cette usine de modulation de la production d'électricité n'utiliserait pas d'eau pour son refroidissement, du moins pas en quantité suffisante.

Au contraire des moteurs actuels de la centrale du Port Ouest, le refroidissement des parties chaudes du moteur est réalisé par un circuit fermé. Cette solution technique permet à la fois d'économiser de grandes quantités d'eau (700 000 m<sup>3</sup>/an) et de s'affranchir du risque de légionellose inhérent aux tours aéroréfrigérantes. Il est utile de noter que la régulation de température de ce circuit se fait autour d'une valeur de 80°C. Cette valeur permet d'assurer l'équilibre entre la contrainte d'évacuation des calories et celle de l'équilibre des températures des différents constituants du moteur (chemises pistons, bâti moteur, etc...). La consommation d'eau est donc minime.

Composée de 9 moteurs de 19 MW, cette centrale ne sera censée fonctionner que 4500 h/an et le nombre de groupe(s) couplé(s) au réseau peut varier en fonction de la saison, du jour et de l'heure.

Après plusieurs rencontres avec EDF, d'un point de vue technique, le couplage d'une centrale ETM et de la future centrale fuel du port Est ne serait pas envisageable pour le design actuel de la centrale thermique, qui rejette peu d'eau chaude.

Cependant, il ne faut pas oublier que ce type de projet est envisagé à Hawaï. Le principe simple est de rejeter l'eau chaude de la centrale thermique dans un bassin, dans lequel la centrale ETM pomperait son eau chaude. Ce couplage à une centrale thermique serait utile même si la différence de température entre l'eau de mer de surface et l'eau chaude provenant de la centrale serait de quelques degrés, vu que la production de la centrale ETM augmente de 15% pour une DT de 1 degré supérieure.

Une petite analyse a été faite sur l'éventuel couplage entre la centrale ETM et la future centrale thermique, sur l'hypothèse de la chaleur produite par la future centrale fuel du Port Est.

#### IV-4.2 Gain éventuel du couplage d'une centrale ETM à une centrale thermique

Le tableau suivant décrit le gain calorifique que pourrait apporter l'eau chaude de la centrale thermique à l'eau chaude de la centrale ETM.

La puissance de la centrale thermique est de 160 MW, en fonctionnant 4500h, elle produira environ 720 000 MWh/an. Sachant que le rendement des moteurs thermiques de la future centrale thermique sera d'environ 46%, nous supposons que la chaleur produite est de 54%. Ce qui correspond à une énergie dissipée en chaleur d'environ 854 000 MWh. On suppose une récupération d'environ 20% de cette énergie, ce qui ferait 169 040 MWh de chaleur, correspondant à 19 300 000J/s et 4 616 500 cal/s.

Hors la centrale thermique de 2,5 MW nette à un débit d'eau froide d'environ 3,8 m<sup>3</sup>/s et de 7,6 m<sup>3</sup>/s d'eau chaude. Le gain calorifique, selon ce débit d'eau chaude de 7,6m<sup>3</sup>/s, serait une augmentation de la température de 0,6°C pour l'ensemble du volume d'eau chaude. En sachant qu'un degré supplémentaire de la différence de température entre l'eau chaude de surface et l'eau froide profonde, génère 15% de production d'énergie supplémentaire de la centrale ETM. On en déduit que la centrale ETM produirait 9% d'énergie supplémentaire grâce au couplage avec la centrale thermique. Pour une centrale ETM de 1MW de puissance nette pompant environ 3m<sup>3</sup>/s d'eau chaude, le gain énergétique grâce à ce couplage serait de 22%.

1 Cal (en J)	4,18		
P Centrale Thermique (MW)	160		
DT Centrale Thermique (h/an)	4500		
E Centrale Thermique (MWh)	720000		
Hyp tx chaleur	54%		
E Centrale Thermique (MWh_ch)	845 217		
Hyp tx recup chaleur	20%		
E Centrale Thermique recup (MWh_ch)	169 043		
E_Centrale Thermique_recup (J/s)	19 297 201		
E_Centrale Thermique_recup (cal/s)	4 616 555		
Puissance Centrale ETM (MW) cycle ouvert	2,5	Puissance Centrale ETM (MW) cycle ouvert	1
Débit eau froide (m3/s)	3,8	Débit eau froide (m3/s)	1,52
Débit eau chaude à 25°C (m3/s)	7,6	Débit eau chaude à 25°C (m3/s)	3,04
DT potentiel eau chaude (°K)	0,6	DT potentiel eau cha ude (°K)	1,52
Gain puissance centrale ETM	9,1%	Gain puissance centrale ETM	22,8%

*Figure 28 : Tableau synthétisant les calculs pour un éventuel couplage de la centrale ETM à la future centrale thermique*

## V - Climatisation par de l'eau froide sous-marine (Sea Water Air Conditioning)

### V - 1 Etats des lieux de la technologie

L'eau froide sous-marine pourrait assurer la climatisation de bâtiments aussi efficacement que les méthodes classiques et à des coûts inférieurs (d'après une étude américaine du Département de l'Énergie, le DOE, un grand hôtel pourrait ainsi économiser jusqu'à 400 000 \$ annuellement, (cf. Référence 388). En Polynésie française, le Sea Water Air Conditioning (SWAC) est déjà installé à Bora-Bora dans un grand hôtel de luxe, avec une puissance installée de 1,5MWf. Après deux ans de fonctionnement, les économies réalisées par rapport à un système de climatisation conventionnel sont de l'ordre de 90% (cf. X, référence 22). Le futur hôpital de Papeete (Tahiti) et un autre hôtel sur l'île de Tetiaroa reprendront certainement et très prochainement ce principe pour leurs climatisations. A Curaçao, cette technologie a été installée et de nombreux autres projets verront le jour autour du globe. Aujourd'hui, cette technologie liée à l'utilisation de l'eau froide profonde est rentable et semble la plus propice à être installée à la Réunion.

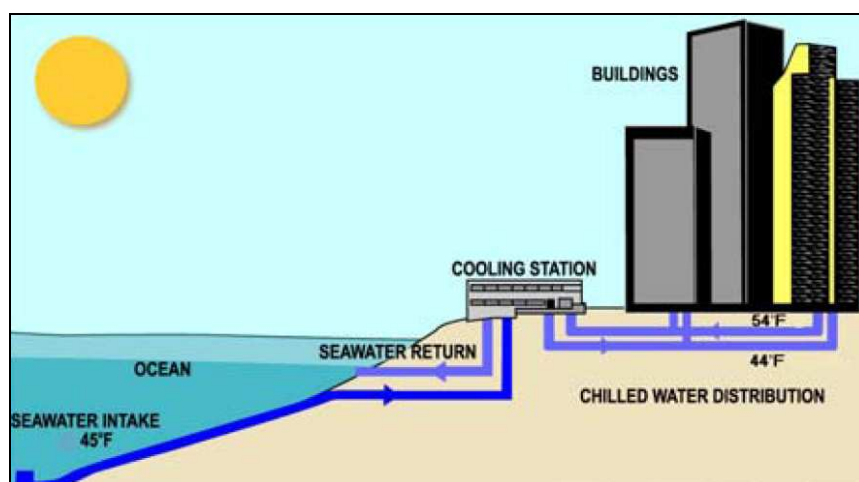


Figure 29 : Principe de fonctionnement de la climatisation sous-marine (SWAC) (référence 13)

La figure précédente décrit le principe de fonctionnement de la climatisation par eau froide sous marine. L'eau froide est pompée à de grandes profondeurs puis passe dans une station d'échange (sur la figure 'cooling station'), pour refroidir le circuit d'eau froide en boucle fermée (dénommé 'chilled water distribution'), qui parcourt les installations à climatiser. La surface au sol (minimale) estimée pour cette station d'échange serait de 2500m<sup>2</sup>.



Figure 30 : Photos extérieure et intérieure de la station d'échange de l'Université de Cornell (référence 13)

## V - 2 Besoins en froid au Port

Pour développer au Port, un projet de climatisation avec de l'eau froide sous- marine, un questionnaire ciblant des entreprises de la zone industrielle du Port Ouest a été mis en place. Elaboré en collaboration avec l'ADIR (Agence de Développement des Industries de la Réunion), ce questionnaire sur les besoins en froid (cf. annexe I) s'adressait particulièrement aux armateurs de pêche du Port Ouest, disposant de chambres froides positives et négatives, de grandes salles réfrigérées, et de sas.

L'eau froide, pompée à 1000 m aux alentours des 5°C, arriverait à la surface à une température d'environ 6°C. Cette température n'est alors pas assez basse pour refroidir les chambres froides à températures négatives (-18°C) et aussi positives (2°C à 4°C) des industries de la darse de grande pêche. L'EFP serait utilisée uniquement pour faire l'appoint sur le refroidissement d'air de 28°C (température ambiante) jusqu'à environ 8°C. En ce qui concerne, les sas et les grandes salles réfrigérées de ces industries du Port Ouest, l'EFP pourrait assumer pleinement la climatisation. Seules quelques entreprises ont répondu à ce questionnaire, à savoir :

- SAPMER (environ 200kWf)
- Réunion PELAGIQUE (environ 200kWf)
- Armements des Mascareignes (environ 200kWf)
- DANONE (hors zone Port Ouest). (environ 1MWf)
- Des cliniques et des centres commerciaux ont aussi été ciblés mais ils n'ont pu participer à ce questionnaire par manque de connaissance de leurs propres installations.

Les industries de la darse de grande pêche représenterait pour l'ensemble de leurs installations, une puissance de froid de 600kWf, alors que la limite à la rentabilité d'une installation de SWAC est de 500kWf.

En bordure de la Zone Industrielle du Port Ouest, se focalise le projet « Ville est Port » avec la réhabilitation d'une partie du Port Ouest. Non loin de ses locaux, la ville espère développer un complexe hôtelier d'environ 84 chambres, représentant avec les bâtiments annexes une surface à climatiser d'environ 4500 m<sup>2</sup>, ce qui représenterait une puissance de froid d'environ 450kWf. Un autre complexe hôtelier et un centre des congrès sont aussi planifiés dans ce projet. Les locaux de la commune seraient à même d'être climatiser par de l'eau froide sous marine, tout comme la zone du centre ville.

Vers l'entrée de la ville au rond Point de la Voie Triomphale, d'importants besoins en froid se font ressentir, il s'agirait là de climatiser :

- La Halle des manifestations, avec 3500 m<sup>2</sup> de superficie au sol pour une hauteur de plafond d'environ 8m.
- La clinique des flamboyants
- Un nouvel hôtel

Une extension du circuit d'eau froide pourrait se faire vers la ZAC 2000 pour répondre aux besoins en froid de Danone, du dépôt logistique des centrales d'achat, des concessionnaires automobiles et des autres entreprises disposant de grandes surfaces de bureaux. Le circuit d'eau froide pour la climatisation pourrait se développer en complémentarité avec le circuit d'irrigation (cf. figure suivante).

L'emprise à terre de la station d'échange de chaleur (cf. Figure 29, cooling station), entre l'eau froide profonde et le fluide caloporteur, serait estimée au minimum à environ 50x50m, soit 2500m<sup>2</sup>.

Dans le cas d'un atterrissage de la CEF (Att 2) à la Pointe des Galets Cette station pourrait se situer dans la zone industrielle du Port Ouest. Le circuit d'eau froide (et celui d'irrigation) pourrait desservir, la zone du Port Ouest pour un circuit d'une longueur d'environ 3km. Un circuit plus long (5km) desservirait le Port Ouest, l'ensemble du centre ville



pour atteindre la ZAC 2000, la halle des manifestations et la ZI 1&2. La figure suivante schématise le passage du circuit d'eau froide à partir de son point d'atterrage à la Pointe des Galets.



*Figure 31 : Circuit de SWAC et d'irrigation au Port à partir de l'atterrage de la Pointe des Galets (Att 2)*

A partir d'un atterrage au Rond Point de Tamatave (atterrage n°3), le circuit pourrait desservir la zone du Port Ouest, comprenant la darse de grande pêche, les bâtiments de la commune et la zone où se situerait le projet « Ville est Port », et cela avec un circuit d'eau froide de 3km. Quoiqu'il en soit une autre branche du circuit d'eau froide pourrait partir de ce point d'atterrage pour toucher la zone de la Halle des manifestations de la ZAC 2000, de la ZI 1 & 2 pour une longueur d'environ 2,5km.

L'avantage d'un circuit partant du point d'atterrage n°3, est d'être plus proche des zones d'activités industrielles, où se trouvent d'importantes surfaces de bureau. Mais il serait plus long que celui de l'atterrage n°2 desservant l'ensemble des zones d'intérêts pour la climatisation au Port et ne favoriserait pas une climatisation du centre ville. La figure suivante présente ce circuit d'eau froide avec ses deux branches, l'une partant vers le Port Ouest et l'autre vers la ZAC 2000 à partir du point d'atterrage n°3.





*Figure 32 : Circuit de SWAC et d'irrigation au Port à partir de l'atterrage du rond point de Tamatave (Att 3)*

Dans la zone du Port Ouest, le projet « ville est Port » a pour vocation d'embellir la ville et de développer une activité touristique. L'utilisation de l'eau froide profonde au sein de la ville créerait une forte image marketing. D'autant plus que l'eau profonde, de part son excellente composition, pourrait être utilisée dans les activités de thalassothérapie développées par les futurs hôtels portois.

## V - 3 Agriculture

### V-3.1 Etats des lieux de la technologie

Depuis plusieurs années, la société CHC (Common Heritage Corporation, membre du NELHA à Hawaï) a testé la production de nombreux végétaux avec ce système d'irrigation. Le procédé consiste à faire passer de l'eau froide dans un tuyau enterré à la profondeur des racines de la plante cultivée. L'humidité atmosphérique se condense alors sur ces tuyaux, ce qui irrigue les végétaux. Avec un minimum de suivi, des bons résultats ont été obtenus par l'agriculture biologique d'une large gamme de plantes. A la grande surprise de nombreuses cultures produisaient très rapidement des fruits ou des légumes d'excellente qualité. De nombreuses « cultures miracles » sur cette terre désertique hawaïenne peuvent être citées comme :

- La floraison d'ananas au bout de 8 mois au lieu des 14 mois habituels
- La culture d'orchidées en plein soleil
- La floraison de pêche et de poires

Une expérience a d'ailleurs été faite sur trois plants de papaye. Le premier plant était arrosé quotidiennement d'environ 20 litres d'eau (produite par la condensation de l'eau sur les tuyaux d'eau froide). Cette eau était à température ambiante. Le second plant était lui planté en bordure du périmètre ou passait les tuyaux enterrés d'eau froide. Tandis que le troisième se trouvait lui au centre du passage des tuyaux d'eau froide. Les résultats obtenus (cf. figure suivante) furent surprenants :

- Le premier plant mesurait 45 cm avec un feuillage normal (photo de droite)
- Le second mesurait 90 cm avec l'apparition de premiers bourgeons (photo de gauche)
- Le dernier mesurait lui 1.83m avec un tronc robuste et une douzaine de papayes vertes (photo du haut).

Les scientifiques ont associé (et approuvé) l'origine de cette pousse rapide à un phénomène de thermodynamique basé sur la différence de température entre les racines et les feuilles, qui accélère le transport des nutriments dans la plante. Pour le premier plant, la différence de température entre les racines et les feuilles devaient être de 2 à 3°C, pour le second arbuste de 5 à 10°C et pour le troisième plant, la différence devait être supérieure à 20°C voire 25°C. Les 3 plants ont été photographiés sur la figure ci-dessous.



*Figure 33 : Expérience sur les plants de papaye irrigués de façons différentes  
(Source CHC : Common Heritage Corporation, cf. X, référence 23)*

Les résultats de cette agriculture ont été obtenus par des chercheurs, aucune application industrielle ou commerciale de ce procédé n'a encore été faite.

### V-3.2 Irrigation par condensation de l'eau sur les tuyaux d'eau froide au Port

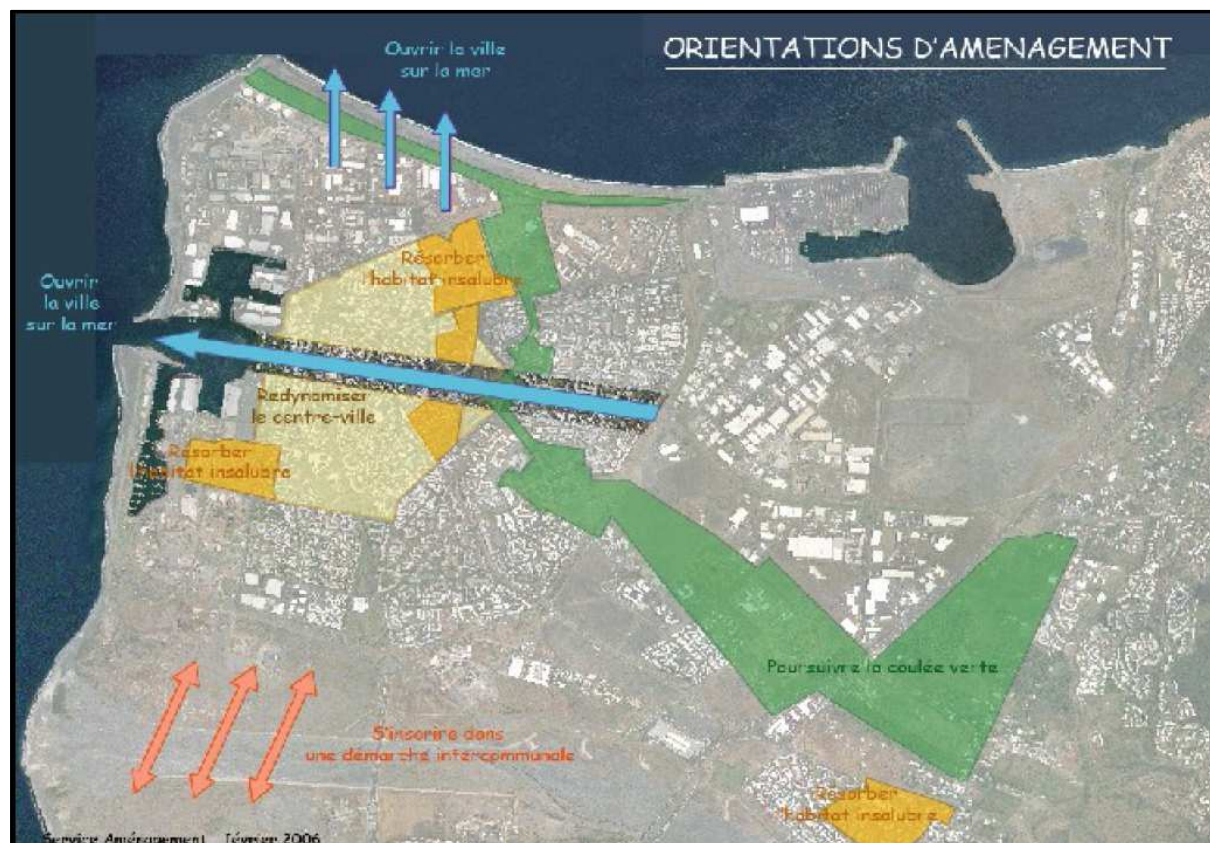
Auparavant, Le Port était une ville aride et un important effort a été réalisé sur la végétalisation. Deux des principales avenues, la voie triomphale et l'avenue du 14 juillet 1789, sont verdoyantes et montrent le résultat de ces efforts. Une importante quantité d'eau est utilisée pour l'irrigation des espaces verts actuels. Elle pourrait être économisée pour la consommation humaine, grâce à l'utilisation de la Condensation de l'Humidité Ambiante (CHA) pour l'irrigation.

D'ailleurs, la mairie du Port projette de continuer la végétalisation de la ville. Les projets d'espace verts concernent le front de mer portois partant de la Pointe des Galets jusqu'à l'entrée du Port Est et aussi le centre ville, jusqu'à la ZAC 2000 (cf. Figure 35). Avec l'atterrage d'une CEF à la Pointe des Galets ou à l'entrée du Port Est, les projets de végétalisation portois pourraient utiliser l'irrigation par la CHA (condensation de l'humidité ambiante). Il serait même possible par ce procédé d'irriguer l'antre du football portois, le stade Lambrakis. La création d'un jardin tropical dans cette zone (auparavant) aride et la réalisation d'une fontaine d'eau froide en plein centre ville ne seraient pas utopiques.



*Figure 34 : Fontaine d'Eau Froide Profonde au centre ville du Port*





*Figure 35 : Schéma d'aménagement de la ville du Port*

En l'absence de données financières et économiques sur cette activité, l'étude financière ne pourra être réalisée. Cette activité serait un axe clé pour l'aménagement de la ville du Port et l'utilisation de l'eau froide profonde, avec l'image 'Le Port, ville verte'. La Figure 32 (comme la Figure 31) présente le passage dans la ville du Port du circuit d'irrigation par Condensation de l'Humidité Ambiante. L'activité d'irrigation par CHA pourrait répondre aux futurs projets d'aménagements d'espaces verts de la Ville du Port.

Par ailleurs, un autre projet d'irrigation est en passe de voir le jour au Port. Il s'agit de la réutilisation des eaux usées de la station d'épuration. Environ 80% des 9000m<sup>3</sup>/j des eaux usées seraient récupérées et utilisées pour faire de l'arrosage et de l'eau industrielle pour les entreprises des différentes zones industrielles. Ces deux projets d'irrigation se doivent d'être complémentaires et non pas concurrents.

## VI - Activités liées à l'utilisation de l'Eau Froide Profonde (AEFP)

### VI - 1 Aquaculture, culture d'algues et mariculture

#### VI-1.1 Etats des lieux de la technologie

L'eau de mer profonde est riche en nutriments, très stable du point de vue de ses caractéristiques physico-chimiques et dénuée d'agents pathogènes, donc bien adaptée à l'aquaculture. Les revenus supplémentaires pour les centres d'élevage de poissons et de crustacés ou de production d'algues (pour des industries pharmaceutiques comme Cyanotech au NELHA, commercialisant la spiruline) utilisant cette eau, pourraient être supérieurs à ceux générés par la vente de l'électricité.

La culture d'espèces rares et difficiles à élever en aquarium comme par exemple les hippocampes peut être réalisée avec cette eau dénuée d'agents pathogènes. La culture de bivalves, huîtres perlières et bécotiers, serait facilitée pour le marché de l'aquariophilie.



Figure 36 : Photo des sites d'aquaculture et de culture d'algues du NELHA (source : NELHA Hawaï)

Le tableau ci-dessous permet de comparer la composition de l'eau en surface et l'eau profonde. Les teneurs en silice (Si), phosphate (PO<sub>4</sub>) et nitrates (NO<sub>3</sub>) sont beaucoup plus élevés pour l'eau froide profonde que l'eau de surface. Ces sels nutritifs sont essentiels et nécessaires au développement des algues et à la biomasse marine. Par ailleurs, les Matière en Suspension, (MES), n'ont atteint le seuil de détection de 0,02 mole/litres. De ce fait, cette eau pourrait être qualifiée de pure et pourrait être très propice à l'aquaculture (terrestre), avec l'absence de germes pathogènes.

	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (µM)	PO <sub>4</sub> (µM)	NO <sub>2</sub> (µM)	NO <sub>3</sub> (µM)	NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub> (µM)	Si ( µM)	pH	MES	Salinité (PSU)
Eau de surface Port	0,05	0,08	0,47	1,57	2,04	1,59	8,06	0,11	35,02
Eau profonde Port	0,03 (-800m)	2,38	0,09	35,40	35,5	52,8	7,56	<0,04	34,5

Figure 37 : Tableau comparatif de la composition de l'eau froide profonde avec celle de l'eau de surface au Port.

- Production d'algues pour l'industrie pharmaceutique et alimentaire :

Après avoir utilisé les capacités thermiques de l'eau froide profonde, son excellente composition permettrait de faire de la production d'algues, telle que la spiruline (Cf. figure ci-contre). L'absence d'organismes pathogènes permet la production d'une algue très pure et très riche en nutriments. La production d'algues nécessite généralement un bon ensoleillement et une température de l'eau généralement supérieure à 20°C.



*Figure 38 : Culture de la spiruline à HAWAII (référence)*

- L'aquaculture ou la mariculture pour des espèces difficiles à élever (ex : cultures d'ormeaux) :

D'autres expériences (références 31 à 36) ont permis de produire des microalgues, servant à nourrir les oursins et les ormeaux. Avec un contrôle de l'environnement de développement, la croissance quotidienne de la biomasse marine est très rapide, ce qui permet le développement de nombreuses autres espèces consommant ces algues. Par ailleurs, les élevages de poissons tels que la truite ont de plus forte productivité avec cette eau d'excellente qualité, qui limite les risques de maladie. D'autres espèces délicates à élever, comme la langouste, la sole ou les hippocampes, ont aussi obtenus des bons résultats de productivité. Les photos ci-dessous présentent une partie des différentes espèces, qui peuvent être élevées. Les ormeaux (photo ci-contre) sont des bivalves de plus en plus rares, qu'il est possible d'élever grâce à l'excellente composition et à la pureté de cette eau.



*Figure 39 : Photos de quelques espèces élevées en aquaculture au Nelha à Hawaï (référence 28)*

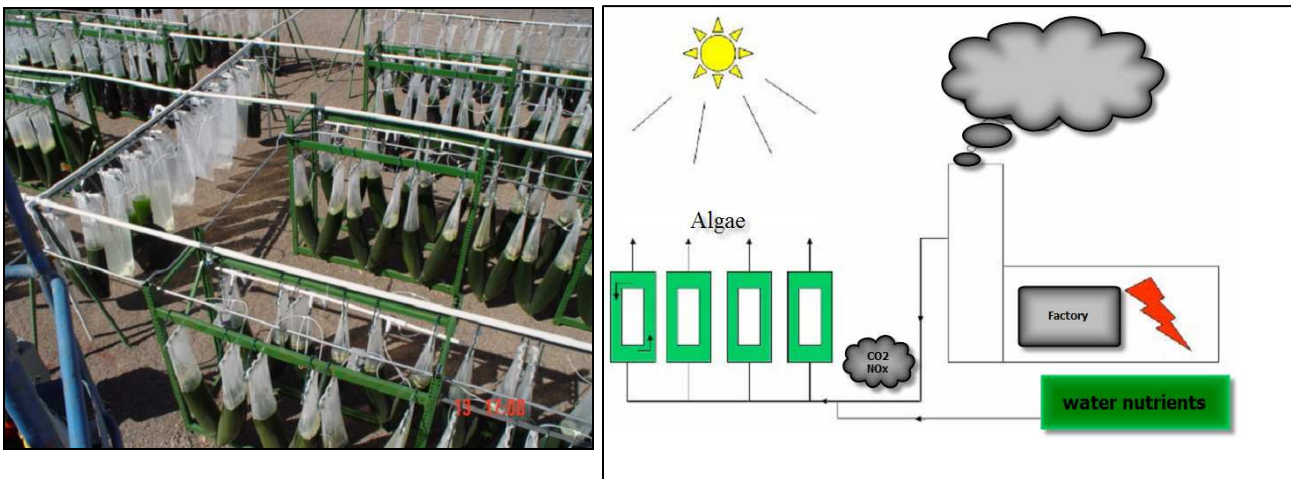


- Production d'algues pour la production de bio diesel :

Un autre axe de développement est la production de biomasse marine (algues) (cf. référence 31). La production à l'hectare est trois fois plus importante que la biomasse terrestre. D'importants travaux de recherche sont menés sur ce sujet afin de choisir la meilleure micro algue pour la meilleure production de biocarburants à l'hectare. Dans quelques années, les microalgues représenteront une excellente source de production de biocarburants. L'EEP agirait comme un excellent engrais avec sa forte teneur en matière azotée. Le projet français, 'SHAMASH' (cf. X, référence 29) donnera ces premiers résultats vers 2010 pour la production de biodiesel à partir de micro algues.

Pour remédier partiellement au problème du foncier, il est expérimenté une technique de culture d'algues dans des sacs en plastiques avec une alimentation en dioxyde de carbone. Le fait est que les algues captent le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) pour en restituer de l'oxygène ( $O_2$ ) mais aussi les déchets organiques tels que l'azote, le phosphate et les nitrates. Elles peuvent donc produire à la fois un carburant vert en recyclant les eaux usées ou du gaz carbonique d'une usine thermique !

Dans notre cas, il s'agirait d'une eau pure avec une excellente teneur minérale, avec laquelle on pourrait coupler une alimentation en  $CO_2$  d'une centrale thermique, ce qui favoriserait un développement très rapide de ces algues, (cf. figure suivante).



*Figure 40 : Cultures d'algues dans des sacs plastiques et schéma de principe de l'alimentation des algues avec du  $CO_2$  provenant d'une centrale thermique.*

## VI-1.2 L'aquaculture, la mariculture et la culture d'algues au Port

La culture d'algues demande une surface au sol importante (un minimum de 2 ha pour une culture, cf. Figure 36) et une importante main d'œuvre. Les algues sont généralement mises en culture dans des bassins de 10 cm d'eau, avec pour exemple une production d'environ 6t/ha/mois pour la spiruline.



Au Port, le foncier disponible est très restreint, les seuls espaces restants se trouvent au niveau de la carrière du Nouveau Port (Z1), à l'entrée de la ville du Port (Z2) et sur les berges de la Rivière des Galets (Z3). Ces espaces pourraient convenir mais semble déjà réservés pour d'autres projets. Dans le futur, la zone 1 serait certainement convoitée pour l'agrandissement du Port Est. La zone 2 se situe elle à proximité de zones urbaines alors que la culture d'algues est souvent malodorante.

Il faut savoir aussi que les bassins de culture doivent être isolés des poussières et des agents pathogènes de l'air pour ne pas y voir la prolifération d'espèces nuisibles. Hors, la structure du sol au Port (sable, gravats, poussières) et les activités des zones industrielles et du Nouveau Port ne sont pas compatibles avec la culture d'algues. L'important besoin de main d'œuvre serait un excellent vecteur d'emploi pour cette commune (et pour l'île), où le chômage est supérieur à 20%. Mais le système économique français et les effets de la mondialisation seraient peu favorables pour une production, aux prix compétitifs des marchés chinois, indiens ou des autres pays en voie de développement.

La zone n°3, d'une surface de 30ha, pourrait correspondre avec la culture d'algues ou l'aquaculture mais dans ce cas, la réflexion serait intercommunale comme le souligne les projets d'aménagements de la mairie du Port (cf. Figure 35).



Les contraintes pour l'aquaculture et la mariculture sont identiques à celles de la culture d'algues. Par ailleurs, l'introduction de nouvelles espèces dans l'écosystème réunionnais (même accidentellement) peut s'avérer dangereux.

Aujourd'hui, pour un problème principalement foncier au Port, il ne semblerait pas pertinent de développer l'aquaculture, la culture d'algues et la mariculture, qui demanderaient au minimum une dizaine d'hectares de terrain pour la culture d'une seule espèce d'algues. Dans le cadre d'une politique d'autonomie alimentaire de l'île (consommation locale des produits) et dans un contexte sans problème foncier, il serait viable d'utiliser l'EEP pour la culture d'algues, l'aquaculture, la mariculture et l'élevage de poissons. D'autres sites à La Réunion, sans problème foncier et de conflits d'usages avec les zones urbaines, pourraient répondre à ce genre de projet.

L'absence de données financières et économiques dans ce domaine ne permet pas de réaliser une étude chiffrée de cette filière. Quoiqu'il en soit, les techniques d'élevages de poissons et de cultures d'algues (au NELHA) passent en phase industrielle. Ces activités peuvent donc être qualifiées de viables et rentables mais le manque de foncier au Port ne permettra pas le développement de ces filières.

Un projet de production d'algues dans des sacs en plastiques pourrait idéalement voir le jour au Port avec l'utilisation de l'EEP et du dioxyde de carbone de la future centrale fuel du port Est pour la production de biodiesel, (cf. Figure 40).

## VI - 2 Thalassothérapie

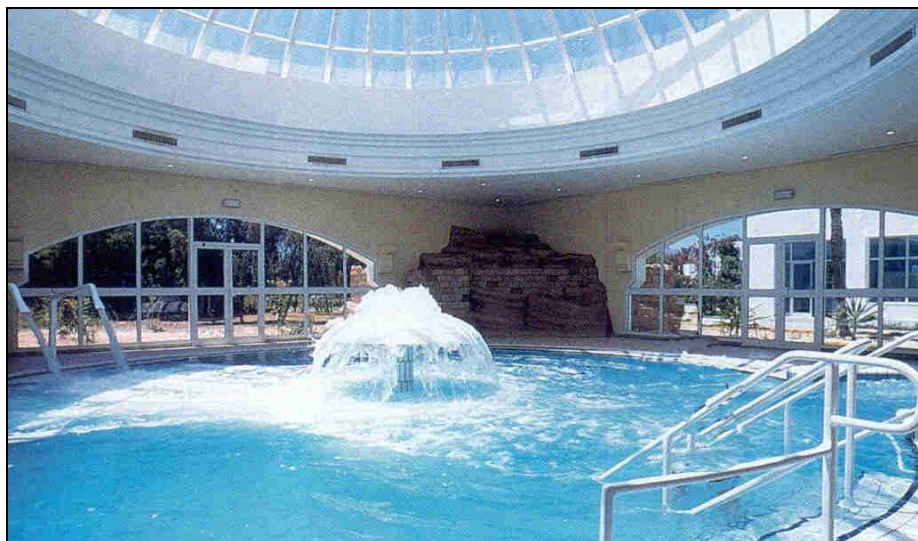
### VI-2.1 Etats des lieux de la thalassothérapie

Les bienfaits de la thalasso sont connus depuis l'Antiquité. L'élément magique de la thalassothérapie, c'est l'eau de mer. Outre son taux de 35 grammes de chlorure de sodium (sel) par litre, elle contient nombre de sels minéraux et des oligo-éléments.

L'eau de mer profonde contient 20 fois plus de sels minéraux que l'eau de mer pompée à la surface. Pompée dans les abysses, elle peut être chauffée entre 31 et 35°C afin de provoquer la dilatation des pores de la peau, de stimuler la circulation sanguine et la relance cardio-vasculaire. A sa température de 6°C ou 7°C (voire 12°C), elle peut être pulvérisée en fines gouttelettes pour raffermir le corps. Des bains dans cette eau « Antarctique » aurait les mêmes effets.

La mer est électrolyte car elle contient de nombreux électrons en dissolution. A son contact, un organisme fatigué se recharge naturellement en absorbant des ions négatifs et fait sa provision de sels minéraux, d'où l'importance des bains marins. Après douze minutes d'immersion dans l'eau de mer, la cuticule de la peau en a capté les ions négatifs. Ceux-ci vont ensuite atteindre le derme et se diffuser dans tout le corps : les ions potassium vont migrer vers la fibre musculaire, alors que les ions calcium vont consolider les os. C'est ainsi qu'il y a régénérescence de l'organisme.

A Bora-Bora, l'hôtel Intercontinental climatise ses chambres, grâce à de l'eau profonde, qu'il utilise par la suite pour de la thalassothérapie et des activités de spa.



*Figure 41 : Piscine d'un centre de thalassothérapie*

## VI-2.2 La thalassothérapie au Port

Le projet 'ville est Port' a pour objectif une orientation de la ville vers le Port avec la création d'un hôtel et d'une résidence hôtelière. L'hôtel serait climatisé avec de l'eau froide profonde et proposerait des soins de bien être et la thalassothérapie avec cette eau pure et riche en sels minéraux et oligo-éléments.



*Figure 42 : Vue d'artiste de l'aménagement du Port Ouest (source : Mairie du Port)*

La vue d'artiste suivante donne une vision de l'aménagement de la zone du Port Ouest et des alentours.



*Figure 43 : Vue d'artiste de l'aménagement du Port Ouest (source : Mairie du Port)*

Un hôtel, à l'image verte et proposant de la thalassothérapie, s'intégrerait très facilement dans le cadre du projet « Ville est Port ».

## VI - 3 *Production d'eau douce*

### VI-3.1 Etats des lieux de la technologie

Une centrale ETM à cycle ouvert produit de l'eau douce (dessaalée) lors de l'évaporation de l'eau de mer. Avec une centrale ETM à cycle fermé, l'ajout d'un module de production d'eau douce est aussi envisageable.

Le principe consiste à vaporiser l'eau chaude de surface dans une chambre où la pression est inférieure à la pression atmosphérique. Grâce à l'eau froide profonde, cette vapeur d'eau est condensée. Seule une différence de température comprise entre 5°C et 12°C est nécessaire, il est possible de faire de l'eau dessalée après la production d'électricité. Environ 0,5% de l'eau chaude de surface pompée est dessalée pour la distribution dans les foyers portois.

Suite à l'arrêt du projet ETM Tahiti en 1986, une étude avait été menée pour le dessalement de l'eau de mer à Bora-Bora grâce à ce procédé. Aujourd'hui, l'eau potable à Bora-Bora provient à 45% du dessalement par osmose inverse très consommateur en énergie et de ce fait est très coûteux.

Les installations ETM (expérimentales : Nelha, Sagar Shakti, Mini-Otec) (cf. X, références 364) ont toutes prouvé la faisabilité de ce procédé de dessalement de l'eau de mer pour la consommation humaine.

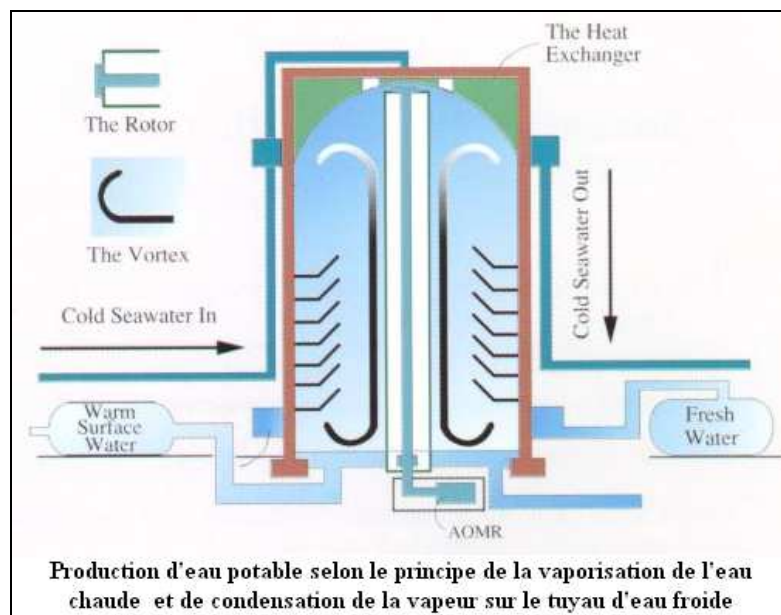


Figure 44 : Principe du dessalement grâce au gradient thermique des Mers (cycle ouvert ETM)

## VI-3.2 Eau potable au Port

La population portoise, aujourd'hui au nombre de 38 000 habitants, augmentera pour atteindre en 2030 les 50 000 voire 60 000 habitants. La gestion de la ressource en eau est déjà critique dans la zone Ouest durant les périodes de sécheresse hivernale. Les nappes phréatiques de la côte Ouest sont surexploitées et quelques phénomènes de pollutions commencent à apparaître. Le gigantesque chantier du basculement des eaux d'Est en Ouest n'est, quant à lui, toujours pas terminé avec 8 ans de retard. L'alimentation en eau devient donc critique dans la zone Ouest et ce phénomène ne fera certainement que s'empirer.

L'augmentation de 22 000 habitants de la population portoise (de 38 000 à 60 000) habitants aura pour effet une augmentation de la consommation en eau de 5500m<sup>3</sup>/j, avec une consommation quotidienne par habitants de 250 litres d'eau. Dans un futur proche, des mesures devront être prises car les communes voisines subiront aussi de telles augmentations de leurs populations.

Le démantèlement de la centrale électrique du Port Ouest, utilisant 700 000 m<sup>3</sup> d'eau par an, permettrait d'utiliser cette ressource en eau pour la population (soit environ 7700 réunionnais consommant 250l/j). Le projet de récupération des eaux usées de la station d'épuration du Port pour en faire de l'eau d'irrigation permettra d'économiser de l'eau potable.

Le projet ETM offre, lui, une solution durable à ces approvisionnements en eau. Dessaler de l'eau de mer sans fournir d'énergie est une véritable opportunité pour le développement de la ville du Port et d'un projet ETM. Cela permettrait de pallier à l'augmentation de la population portoise et au manque de ressource en eau en préservant les nappes phréatiques de l'Ouest. Le tableau suivant synthétise la production d'eau possible, grâce à une centrale ETM d'une puissance de 2,5MW.

Puissance Centrale ETM (MW) cycle ouvert	2,5
Débit eau froide (m3/s)	3,8
Débit eau chaude à 25°C (m3/s)	7,6
Hypothèse taux vaporisation eau douce	0,50%
Taux d'utilisation de l'usine ETM	90%
Fourniture eau potable (m3/an)	1 078 531
Fourniture eau potable (l/jour)	2 954 880
Consommation /personne (l/jour)	250
Habitants approvisionnés en eau douce	11 820

Figure 45 : Tableau de synthèse pour la production d'eau potable d'une centrale ETM de 2,5MW à cycle ouvert

Le débit d'eau froide de la centrale ETM est estimée à 3,8m<sup>3</sup>/s, hors le débit d'eau chaude est double, soit 7,6m<sup>3</sup>/s. Sachant que dans le cycle ouvert, environ 0,5% du volume d'eau est vaporisée, donc dessalée, le volume d'eau dessalée par jour est de 2 954 880 litres avec un taux d'utilisation de l'usine à 90%. Cela correspond à l'alimentation en eau potable de 11 820portois consommant chaque jour 250 litres d'eau.

Le prix d'achat à 2,8 Euros du mètre cube d'eau au Port et dans les villes voisines est propice au développement de l'ETM et du Dessalement par Energie Thermique des Mers (DETM).

## VI - 4 *Production d'eau minérale à forte valeur ajoutée*

### VI-4.1 Etats des lieux de la technologie

Plusieurs entreprises du NELHA se sont spécialisées dans la revente d'eau minérale à forte valeur ajoutée. Avec une bonne opération marketing, des bénéfices importants peuvent être générés. Ces entreprises exportent principalement cette eau vers les Etats-Unis et le Japon. Nos confrères mauriciens ont pour idée de se lancer sur ce marché porteur. L'exportation de cette eau pure et millénaire engrange d'importants bénéfices.

Le principe consiste à reminéraliser de l'eau dessalée (de ce fait déminéralisée) grâce à de l'eau profonde très riche en nutriments.

La valeur ajoutée de cette eau minérale provient du fait de diluer de l'eau dessalée avec de l'eau profonde naturellement pure et extrêmement riche en nutriments. Cela en fait une eau minérale d'excellente qualité, riches en nutriments et oligo-éléments, que l'on peut revendre sur les marchés asiatiques à 3\$ la bouteille d'un litre et demi.



*Figure 46 : Bouteilles d'eau exportées par les sociétés hawaïennes au Japon et aux Etats-Unis*

Les hawaïens génèrent un chiffre d'affaires de 3 milliards de dollars par an. Avec ce marché en pleine explosion, les hawaïens ont dû augmenter les capacités de pompage d'eau profonde et ont construit une usine de dessalement par osmose inverse afin de répondre à la demande. Le dessalement par les procédés d'osmose inverse ou de distillation sont des activités (très) énergivores (5kWh/m<sup>3</sup> d'eau dessalée) et elles ne peuvent être définies comme des activités de développement durable.

La revente d'eau minérale favoriserait la rentabilité et le développement d'un véritable projet ETM, représentant l'avenir des territoires et des îles de la zone intertropicale en termes d'autonomie énergétique et de développement durable. Comme nous le démontre le tableau suivant, l'eau froide profonde portoise n'a rien à envier à l'eau profonde hawaïenne. Le pH, la salinité et les teneurs en nitrates (NO<sub>3</sub>), phosphate (PO<sub>4</sub>), ammoniac (NH<sub>4</sub>) de l'eau portoise sont équivalents à l'eau d'Hawaï. La teneur en silicium de 52,8µmol/l est inférieure à celle d'Hawaï de 74,56µmol/l. Néanmoins, les matières en suspension (MES) sont beaucoup moins importantes dans l'eau portoise que celle d'Hawaï, ce qui se traduirait par une eau portoise plus pure.

	NH4+ (µM)	PO4 (µM)	NO2 (µM)	NO3 (µM)	NO2+NO3 (µM)	Si (µM)	pH	MES	Salinité (PSU)
Eau profonde Port	0,03 (-800m)	2,38	0,09	35,40	35,5	52,8	7,56	<0,04	34,5
Eau profonde Hawaï	0,06	2,89			39	74,56	7,6	0,34	34,3

*Figure 47 : Tableau comparatif de l'eau froide profonde portoise à celle d'Hawaï*

A titre comparatif, le tableau suivant décrit succinctement l'opportunité que représente cette activité de revente d'eau minérale. Nous prenons l'hypothèse de produire 2 659 000 l/j (2659m<sup>3</sup>/j) d'eau minérale, ce qui correspond à la production d'eau potable de la centrale ETM de 2,5MW à cycle ouvert (cf. Figure 45). Comme l'eau minérale est composée d'environ 90% d'eau profonde dessalée et d'environ 10% d'eau pure, il faudra dessaler 2659 m<sup>3</sup>/j d'eau profonde. Par la suite, cette eau, se revendant 1.3€ (2\$) sur le marché asiatique, rapporterait quotidiennement 3 400 000€. Il faut cependant dessaler de l'eau profonde, un investissement d'environ 1 millions d'Euros serait nécessaire pour une usine de dessalement de 3000m<sup>3</sup>/j. Les 5kWh d'énergie consommé par m<sup>3</sup> d'eau dessalée



donneraient une facture d'électricité annuelle de 436 000 €/an. Avec un fonctionnement à 90%, le chiffre d'affaire lié à la vente de cette eau minérale profonde atteindrait 1,13 milliards d'Euros.

Eau minérale produite (en l/jour)	2 954 880
Eau à dessaler (en l/j)	2 659 392
Eau à dessaler (en m3/j)	2 659
Prix de vente du litre d'eau (€/l)	1,30
Revente de l'eau (€/j)	3 457 210
Energie consommé dans le dessalement (kWh/m3)	5
Energie consommée (kwh/j)	13 297
Coût de l'énergie par jour avec un kWh à 0,1€ (en €)	1 330
Taux d'utilisation usine dessalement et ETM	90%
Coût énergie annuel (€/an)	436 805
Coût implantation usine dessalement de 3000m3/j (en €)	1 000 000 €
Revente annuelle de l'eau (en €)	1 135 693 354

*Figure 48 : Tableau prévisionnel du chiffre d'affaire généré par la vente d'eau profonde minérale*

Cette activité serait très propice au développement de l'ETM.

## **VII - Etude technique et financière globale d'un projet d'utilisation de l'eau froide profonde au Port**

Cette étude financière prend en compte l'ensemble des paramètres d'exploitation, liés à chaque activité, pour en arriver à un graphe sur les flux monétaires cumulés reflétant le taux de rentabilité de l'investissement.

### **VII - 1 Coût d'installation du pipe**

L'installation de la conduite d'eau froide (CEF) représente la plus grosse partie de l'investissement dans une centrale ETM. Il faut aussi rappeler que 2 autres tuyaux doivent être installés pour la production d'électricité :

- La conduite d'eau chaude
- La conduite de refoulement commune à l'eau chaude et l'eau froide

Bien qu'ils soient moins stratégiques, ces deux tuyaux doivent être aussi fixés solidement au fond marin pour résister aux aléas climatiques. La conduite d'eau chaude récupère de l'eau à une profondeur d'environ 20 à 40 mètres et la conduite de refoulement rejettera de l'eau à environ une centaine de mètre de profondeur voire plus (ou moins) selon les contraintes réglementaires fixées. Le coût de l'installation de tous ces éléments est porté par l'investissement dans l'usine ETM. Il apparaîtrait logique de répartir les coûts d'installation de la CEF avec les autres activités utilisant cette eau froide profonde. Dans notre étude, la vision du projet sera globale et les coûts d'installation de la CEF seront portés uniquement par la centrale ETM ou de l'activité de SWAC.



*Figure 49 : Conduite d'Eau Froide assemblée avant immersion (source : site web Makai)*



## VII - 2 Coût de l'ETM

Notre étude se porte sur l'installation d'une centrale ETM on shore au Port. Elle fonctionnerait selon le principe du cycle ouvert afin de produire de l'eau potable. Selon les retours d'expérience des différentes installations internationales, le coût du kW installé serait approximativement de 14 000 €/kW pour une centrale ETM d'une puissance nette de 2,5MW. La puissance brute de la centrale serait de 3,6MW, correspondant à un investissement d'environ 60 Millions d'Euros, lorsqu'un facteur multiplicateur de 1,2 est appliqué du fait de l'éloignement de l'île de La Réunion. Avec la différence de température disponible à La Réunion, (cf. Figure 24) la production d'énergie de cette centrale ETM optimisée serait de 16 300 MWh/an.

Quoiqu'il en soit la rentabilité du projet ETM augmente avec l'augmentation de la différence de température entre l'eau chaude de surface et l'eau froide profonde. Il serait plus rentable de récupérer de l'eau profonde plus froide.

Au Port, la température de l'eau est de 5,1°C à 1000 mètres de fond. Selon les études menées par l'ARVAM (cf. Annexe 2), nous sommes à la frontière entre la masse d'eau Indian Central Water (ICW) et la masse d'eau Antartic Intermediate Water (AAIW). La température de l'eau serait d'environ de 4°C aux alentours des 1100 à 1200 mètres de fond.

Il apparaît donc plus rentable de prolonger la Conduite d'Eau Froide d'environ 400 à 500 mètres pour prélever de l'eau plus froide. Le prix de rachat de l'électricité produite par une centrale ETM doit aussi être fixé par l'Etat français afin de promouvoir l'emploi de cette technologie. Ces tarifs de rachat doivent être étudiés selon les différentes tailles d'usine ETM. Dans notre cas, pour une petite usine on-shore, le prix de rachat devrait correspondre à ceux du photovoltaïque de 0,40€/kWh pour que le projet soit rentable.

ETM	
Puissance brute installée (MW)	3,57
Coût d'installation du kW (€)	14000
Coût d'entretien par kWh produit (€)	0,12
Energie annuelle produite (kWh/an)	16 301 004
Coût de l'installation (€)	60 000 000
Taux d'utilisation de l'usine	90%
Subvention ETM	30%
Puissance Net (MW)	2,50
Coût Complément dessalement	1 000 000
Facteur multiplicateur pour invts ds les DOM	1,20

*Figure 50 : Tableau de synthèse des hypothèses utilisées pour l'étude sur l'ETM*

### VII - 3 Solaire photovoltaïque équivalent à l'ETM

A production d'énergie équivalente (16 300 MWh/an), une ferme photovoltaïque s'étalerait sur 96 500m<sup>2</sup> soit 9,5ha, pour une puissance de 12 MWc et un ensoleillement annuel de 1350h équivalent plein soleil. L'investissement pour la mise en place de cette ferme photovoltaïque serait d'environ 58M€ avec le m<sup>2</sup> de panneaux à 600 € posé au sol ou sur des toitures. Cet investissement devrait se renouveler tous les 20 ans car les panneaux photovoltaïques arriveraient en fin de vie, alors que la centrale ETM serait conçue pour une durée de vie d'au minimum 30 ans.

La surface requise est considérable alors que le foncier manque dans l'île. La solution actuelle à La Réunion pour développer le photovoltaïque à grande échelle est de se tourner vers les terres agricoles réunionnaises en couplant agriculture et production d'énergie grâce aux serres agrisolaires. Les panneaux solaires seraient montés sur des structures tridimensionnelles (résistantes aux cyclones), ce qui génèrera un coût supérieur du m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïque installé. Autant dire qu'à production électrique équivalente, implanter une centrale ETM coûterait moins chère qu'une centrale photovoltaïque.

Bien que les coûts de maintenance soient supérieurs pour une centrale ETM, la valorisation de l'eau froide profonde générera beaucoup plus d'activités et d'emploi que la simple production d'électricité d'une centrale PV. Les premiers projets de production d'électricité via l'ETM ne seront d'ailleurs rentables que si d'autres activités de valorisation de l'EFP y sont associées.

Par ailleurs, l'énergie photovoltaïque est intermittente et est qualifiée de fatale avec ces variations de production à haute fréquence. Alors que l'ETM est une énergie de base disponible 24h/24 et tous les jours de l'année.

### VII - 4 Coût du SWAC

Les retours d'expérience sur les projets de SWAC montrent bien que ce procédé de climatisation est rentable. Les futures réglementations plus strictes sur l'utilisation de fluides caloporteurs, l'esprit de développement durable ainsi que l'augmentation du prix de l'énergie favoriseront l'utilisation de cette climatisation écologique. Ces trois paramètres seront bientôt réunis au Port. Mais à l'instar des projets SWAC existants, où les besoins en froid ont été créés à proximité de l'atterrage de la CEF (avec la construction d'hôtels), il s'agirait au Port de satisfaire le besoin en froid d'une zone urbaine et industrielle en construisant un réseau d'eau froide de plusieurs kilomètres. Le principal défi est donc de mutualiser les besoins en froid afin de rentabiliser le coût d'implantation de ce réseau d'eau froide à terre. Une estimation du coût de l'installation d'un kilomètre de réseau de froid serait d'environ 2 M€/km.



*Figure 51 : Réseau urbain d'eau froide d'un système SWAC (référence 13)*

Selon les besoins repérés au Port et les possibilités d'atterrage du pipe, le réseau d'eau froide terrestre mesurerait au minimum 3km (soit un investissement d'environ 6M€) pour l'asservissement de la Pointe des Galets (cf. Figure 31 et Figure 32) comprenant les zones:

- Du port Ouest, (darse de grande pêche)
- Du centre ville,
- Bâtiments communaux (hôtel de ville)
- Et du Projet « Ville est Port » (zone du Port Ouest).

La darse de grande pêche représenterait une puissance de froid d'environ 600kWf si l'on arrivait à couvrir l'ensemble des besoins des industries de la pêche avec l'utilisation de l'eau froide. En effet, leurs chambres froides requièrent des températures d'eau de 1,5°C à 2°C. Georges Claude a réussi en 1930 à fabriquer de la glace, grâce à l'utilisation de l'eau froide profonde, il serait possible de répondre aux besoins en froid de ces industries.

Un circuit d'eau froide plus long pourrait desservir l'ensemble de la ville du Port et mesurerait, dans ce cas là au minimum 5km, pour un investissement d'environ 10M€. Ce circuit (cf. Figure 31 et Figure 32) desservirait l'ensemble de la Ville comprenant :

- les zones citées précédemment
- la zone de la halle des Manifestations, (dont la clinique des orchidées)
- les zones industrielles portuaires (Z.I 1 et 2)
- et la ZAC 2000.

Le coût d'installation de la CEF (Conduite d'Eau Froide) n'est pas compris dans ces investissements et représenterait au minimum une dizaine de millions d'Euros. Rentabiliser la pose de la CEF et l'implantation du réseau d'eau froide avec uniquement une activité de climatisation ne serait pas viable. Il faudra donc mutualiser le projet SWAC à la production d'électricité et la production d'eau potable.

Pour rentabiliser un projet ETM/SWAC, les puissances de froid minimales à avoir seraient d'environ 5MWf (MWf : Mégawatt froid) et de 7MWf pour des réseaux terrestres d'eau froide de longueurs respectives 3 km et 5 km. Ces conclusions ont été obtenues avec un prix de revente du kWf équivalent au prix de revient du kWf produit par des climatisations conventionnelles (soit environ 0,05€/kWf).

Aujourd'hui les besoins en froid de la zone du Port Ouest ne semblent pas suffisants pour rentabiliser un projet de SWAC avec un circuit de froid de 3km. Pour y remédier, il faudrait proposer une solution technique aux industries de la

grande pêche afin de répondre à l'intégralité de leurs besoins en froid, notamment pour leurs chambres froides positives et négatives. Plus tard, le projet « ville est Port » pourrait contribuer à la rentabilité du projet dans la zone du Port Ouest avec l'implantation de la zone hôtelière et du palais des congrès.

Un projet SWAC avec un circuit d'eau froide de 5km représenterait un investissement plus conséquent. Mais il pourrait permettre la climatisation de l'ensemble de la ville du Port. La climatisation de la ZAC 2000, des zones Industrielles 1&2, des cliniques Jeanne d'arc, Flamboyants et Orchidée ainsi qu'une partie de la zone urbaine permettrait de mutualiser les besoins en froid et de rentabiliser un tel projet.

Pour information, un m<sup>2</sup> de bureau demande une puissance de froid d'environ 100Wf. Il faudrait donc environ 50 000m<sup>2</sup> et 70 000m<sup>2</sup> de bureaux pour rentabiliser respectivement un projet SWAC avec un circuit d'eau froide de 3km et celui avec un circuit d'eau de 5km. Ces surfaces de bureaux climatisés semblent déjà présentes dans les zones d'activités su Port, ZI 1&2 et ZAC 2000 alors que la ville du Port est la ville la plus chaude de l'île de La Réunion.

### VII - 5 Production d'eau potable

La production d'eau potable apparaît comme une activité essentielle à développer au Port. Du fait de l'augmentation de la population et de ses besoins en eau, l'eau aura toujours un enjeu stratégique sur la côte Ouest. Le prix actuel de revente du m<sup>3</sup> d'eau, fixé à 2,8 €/m<sup>3</sup>, reflète bien ce phénomène.

Dans une centrale ETM à cycle ouvert, le dessalement de l'eau de mer fait partie intégrante du procédé, créant comme « résidu » de l'eau douce. Hors environ 0,5% du volume d'eau chaude pompée est vaporisé, soit un volume d'eau potable d'environ 1 080 000 m<sup>3</sup>/an (cf. VI-3.2) correspondant à l'alimentation quotidienne de 11 800 Portois consommant 250l d'eau/jour.

Ce procédé de dessalement écologique donnerait une eau pure et il pourrait avoir 50% de production supplémentaire grâce à l'ajout d'un autre module de production d'eau, moyennant un faible investissement.

La production (quasi-gratuite) de cette eau douce permet d'augmenter fortement la rentabilité d'un projet ETM au Port, où l'eau est et deviendra de plus en plus un élément rare.

### VII - 6 Production d'eau minérale

Le marché de niche, dans lequel est installé les Hawaïens avec la revente d'eau minérale à base d'eau profonde est de loin le plus rentable avec le chiffre d'affaire, qu'il pourrait générer (cf. Figure 48)

Malgré un investissement supplémentaire de 1 M€ dans une usine de dessalement par osmose inverse de l'eau froide profonde, la production d'eau minérale est l'activité la plus rentable et permet d'améliorer la rentabilité d'une usine ETM. En fixant le prix de revente du m<sup>3</sup> d'eau à seulement 22€, cette activité serait rentable alors que sur le marché asiatique le m<sup>3</sup> d'eau minérale vaut environ 1300€, soit environ 1,3€ (2\$) la bouteille de 1,5 litres. Cette activité ne participe cependant pas au développement durable du fait de l'utilisation du dessalement par osmose inverse, très consommateur d'énergie et à l'exportation de bouteilles d'eau par bateau (ou avion).

*(Il n'est pas possible d'utiliser l'eau dessalée par le principe même de l'ETM car il s'agit là d'eau chaude de surface dessalée, ce qui atténuerait le marketing et le mythe lié à cette eau froide profonde).*

## VII - 7 Défiscalisation et les plans PRERURE/GERRI

La Réunion est actuellement dans une excellente dynamique pour atteindre l'objectif ambitieux de l'autonomie énergétique électrique de l'île en 2025. Cet objectif est fixé par les plans PRERURE (Plan Régional des Energies Renouvelables et de l'Utilisation Rationnelle de l'Energie) de la Région Réunion et GERRI (Grenelle de l'Environnement à la Réunion : Réussir l'Innovation) de l'état français. Ces plans d'action seront très certainement favorables à la mise en place d'une centrale à l'Energie Thermique des Mers à La Réunion, car il s'agit là avec la géothermie de la seule énergie renouvelable de base, c'est-à-dire disponible toute l'année. L'objectif de ces deux stratégies énergétiques

La défiscalisation réunionnaise est aussi un atout pour l'implantation des énergies renouvelables. Les aides et les subventions européennes pourraient représenter environ 30% de l'investissement initial.

## VII - 8 Retour sur investissement

Dans l'étude économique, les différentes opportunités de valorisation de l'eau froide profonde au Port ont été abordées. Ces différentes activités ont été associées ou non pour améliorer la rentabilité du projet d'utilisation de l'eau froide profonde au Port. Selon le contexte de la ville du Port située sur la Côte Ouest, où le manque de foncier, les besoins en eau et en énergie renouvelables se font ressentir. Il en découle clairement que les principales activités à développer au Port sont :

- La production d'électricité
- La production d'eau potable ou minérale
- L'irrigation
- La climatisation
- La thalassothérapie

Les activités écartées sont celles demandant un important espace foncier telles que l'aquaculture (à terre) et la culture d'algues.

Une analyse économique qualitative sur les taux de retour sur investissement a donc été réalisée pour plusieurs solutions d'associations d'activité. Les associations d'activités, permettant la valorisation de l'eau froide profonde, sont les suivantes :

- La production d'électricité, nommée « ETM simple »,
- La production d'électricité et de la climatisation, nommée « ETM +SWAC »,
- La production d'électricité et de l'eau, nommée « ETM+EAU »,
- Les productions d'électricité et d'eau couplées avec de la climatisation, nommée « ETM+SWAC+ EAU»,
- La climatisation par eau froide sous-marine, nommée « SWAC »,
- La climatisation et la production d'eau, nommée « SWAC+EAU ».
- La production d'électricité et d'eau minérale, nommée « ETM+EAU MINERALE ».

A production d'énergie équivalente, la comparaison entre une centrale ETM de 2,5MW nette à une centrale photovoltaïque a été faite et est nommée « Solaire eq ETM ».

Toutes les solutions précédentes ont été soumises aux mêmes hypothèses, toutes répertoriées dans les trois tableaux suivants et celui de la Figure 50.

Dessalement d'eau de mer par DETM et production d'eau minérale	
Volume d'eau chaude pompée (eau de surface) m3/an	215 706 240
Pourcentage d'eau évaporée	0,50%
Investissement usine de dessalement pour production d'eau minérale (€)	1 000 000
Pourcentage Maintenance/ investissement initial de l'usine de dessalement	10%

Pompage de l'eau profonde		Caractéristiques générales	
Diamètre du pipe (m)	1,95	Cout de maintenance du réseau SWAC	1%
Vitesse de l'eau à l'intérieur du pipe (en m/s)	1,20	Vente du kWf (€)	0,05
Temps d'utilisation de l'usine (%)	90%	Cout d'implantation du Réseau SWAC (€)	10 000 000
Volume d'eau froide nécessaire pour l'activité de SWAC (en m3/s)	0,25	Charges personnel (€/an)	100 000
Volume d'eau froide pompée SWAC (m3/an)	7 884 000	Subvention projet SWAC	30%
Volume d'eau froide pompée usine ETM de 2,5MW (m3/s)	3,8	Longueur du réseau SWAC (en km)	5
Volume d'eau froide pompée Usine ETM (m3/h)	13 680	Prix du réseau SWAC (en Euros/km)	2 000 000
Volume d'eau froide pompée total SWAC +ETM (m3/an)	115 737 120	Besoins en froid (MWf)	5
Puissance de froid absorbée par 1m3 d'eau (kWf)	5,56	Prix de vente de l'eau dessalée lors du cycle ouvert (€/m3)	2,80
Débit d'eau froide nécessaire selon le besoin en froid en m3/h	900	Prix de vente du kWh ETM (en€/kWh)	0,40

*Figure 52 : Tableaux synthétisant l'ensemble des hypothèses de calcul*

Ces hypothèses ont permis de simuler un scénario économique des différentes solutions d'associations d'activités sur une durée d'une vingtaine d'années. Il en résulte le graphe suivant représentant les flux monétaires cumulés de chaque association d'activités.

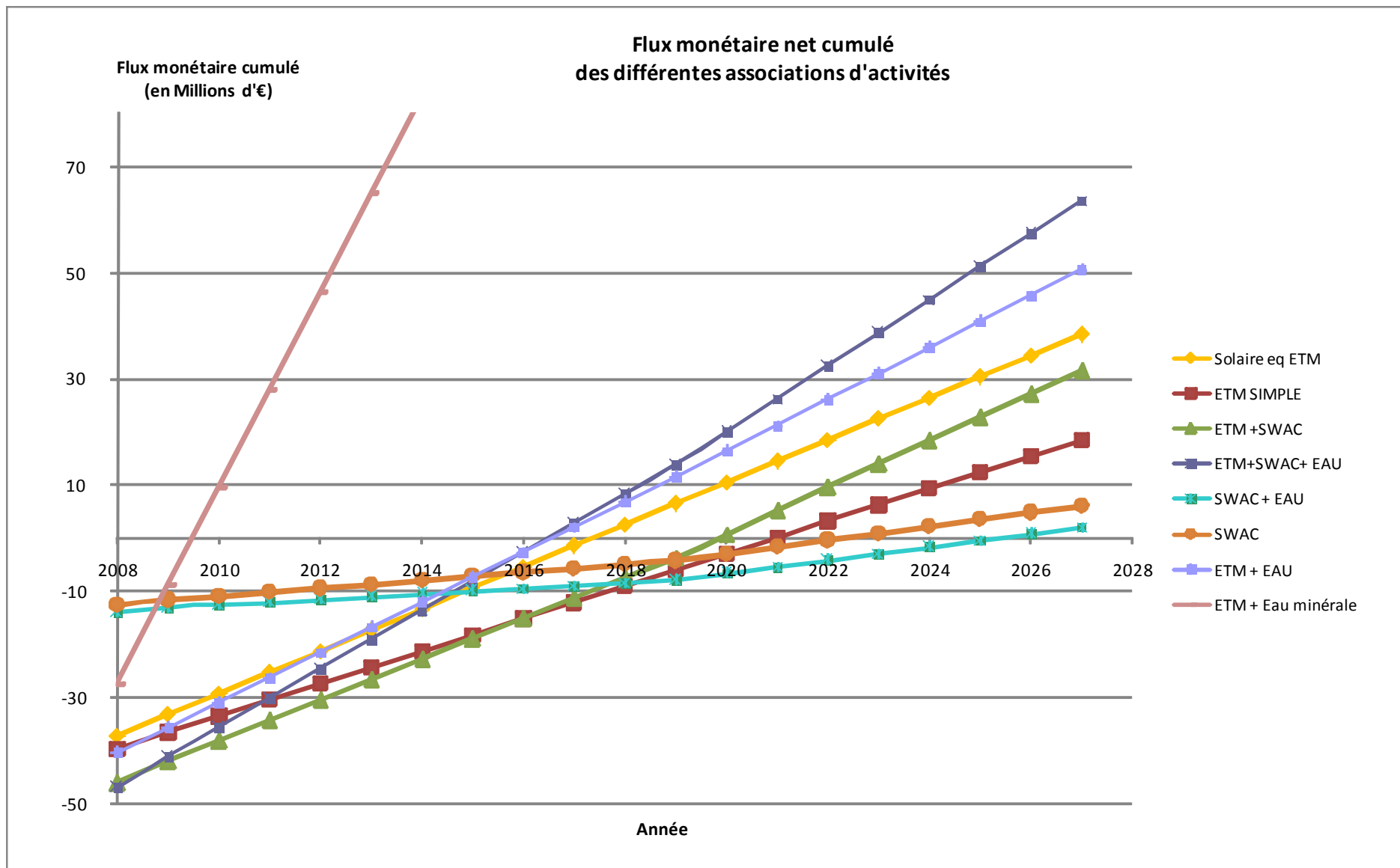


Figure 53 : Flux monétaire cumulé des différentes associations d'activité



Ce graphe permet d'analyser rapidement les opportunités de valorisation de l'eau froide profonde au Port.

Tout d'abord, les courbes « SWAC » et « SWAC+EAU », correspondent respectivement à la mise en place d'un réseau de froid « SWAC » seul ou bien couplé à la production d'eau. Elles laissent apparaître que ces activités de climatisation, grâce à un circuit terrestre d'eau froide d'une longueur de 5 km, sont les moins rentables avec un asservissement d'un besoin en froid de 5MWf. Elles ne deviennent rentables qu'au bout de 14 ans ou plus. Pour un besoin en froid de 7MWf, elles deviennent rentables au bout de 9 ans.

A production d'énergie égale, l'installation d'une centrale ETM et d'une ferme photovoltaïque requière quasiment le même investissement (soit respectivement 60M€ et 58M€, subventionné à hauteur de 30%). Cependant, les coûts de maintenance d'une centrale ETM (estimé à 0,12€/kWh, cf. X, référence 1), sont plus importants que ceux d'une centrale photovoltaïque. C'est pour cela que l'ETM (cf. figure précédente ; courbe : « ETM simple »), est **aujourd'hui** moins rentable que le photovoltaïque (courbe jaune : « solaire eq ETM »). Il en serait de même si l'on couplait cette centrale ETM à de la climatisation (courbe : « ETM+SWAC »).

Néanmoins, la dégradation de la production des panneaux photovoltaïque n'a pas été prise en compte ainsi que le renouvellement de ces panneaux au bout de 20 ans. La centrale ETM serait, quant à elle conçue, pour une durée de vie supérieure à 30 ans. Passé les 20 ans d'exploitation, la meilleure rentabilité du photovoltaïque face à l'ETM est donc controversée.

La meilleure opportunité de développement pour l'utilisation de l'eau froide profonde réside dans la production d'électricité et d'eau. Il est question ici d'eau potable directement consommée par les habitants de la ville. La vente sur la côte Ouest du mètre cube d'eau à 2,8€ est très bénéfique pour l'amélioration de la rentabilité de la centrale ETM. D'autant plus que le prix de l'eau à La Réunion est en pleine explosion, avec une augmentation annuelle de 80%. Ce qui laisse présager d'une meilleure rentabilité du projet ETM.

La production d'eau minérale, constituée en partie d'eau froide profonde, serait l'activité la plus rentable. Cette niche économique, dans laquelle se sont installés les hawaïens génère 3 Milliards de dollars de chiffres d'affaires grâce à l'exportation vers le marché asiatique. Cette activité pourrait subvenir au coût d'implantation de la CEF, tout en permettant le développement de l'ETM et des autres activités de valorisation de l'Eau Froide Profonde.

Au Port, la production d'électricité et d'eau avec un couplage à de la climatisation par de l'EEP, serait les projets les plus rentables. Représentés par les courbes « ETM+SWAC+EAU » et « ETM+EAU » deviendraient rentables au bout de 8 à 9 ans, alors que le projet photovoltaïque deviendrait rentable au bout de 9 à 10 ans.



## VIII - Conclusions

Cette étude avait pour objectif de définir les opportunités de valorisation de l'eau froide profonde au Port. La première partie de cette étude était de caractériser la ressource en eau froide profonde au large des côtes du Port. Le 24 Avril 2008, l'ARVAM préleva des échantillons d'eau, de la surface à 1000m de profondeur. L'analyse de ces échantillons prélevés a mis en avant une eau d'une qualité et d'une composition excellente. D'ailleurs, les différentes masses d'eaux au large du Port sont caractéristiques de celles présentes dans l'Océan Indien et provenant en partie de l'Antarctique. Durant cette campagne de prélèvement, la thermocline (courbe de température de l'eau en fonction de la profondeur) au large du Port a été définie de 0 à 1000m de profondeur. La température mesurée à 1000m de profondeur est de 5,1°C, qui est une température plus basse que celle de nombreux autres sites mondiaux. La seconde phase de cette étude était de définir l'accès à la ressource et les opportunités de valorisation de l'eau froide profonde au Port.

L'accès à la ressource en eau froide consistait à définir la meilleure zone d'atterrissage pour un accès le plus rapide et le plus sûr de la Conduite d'Eau Froide (CEF) aux 1000m de profondeur. Les contraintes géologiques des fonds marins au Port sont importantes. Les fonds marins sont caractérisés instables entre l'embouchure de la Rivière des Galets et La Pointe des Galets. De ce fait, l'atterrissage de la Conduite d'Eau Froide se fera dans la zone comprise entre la Pointe des Galets et l'entrée du Port Est. Les fonds marins de cette zone présentent des signes de stabilisation et l'accès le plus rapide aux abysses est situé à la Pointe des Galets.

Toutefois, le périmètre de sécurité autour des cuves d'hydrocarbures de la SRPP empêche le développement d'infrastructures à la Pointe des Galets. Face à ces problèmes de foncier, il semble préférable de réaliser un atterrissage un peu plus à l'intérieur de la baie de La Possession. Néanmoins selon les géologues, la mise en place d'un projet ETM/SWAC et de sa CEF, nécessitera en premier lieu une étude géotechnique des fonds marins portois pour vérifier leurs stabilités. Cette étude peut être menée par des bureaux d'étude locaux et les espaces concernés peuvent être clairement délimitée pour minimiser le coût de cette étude. L'avantage résiderait dans l'homogénéité de ces fonds marins, qui pourraient être de l'alluvion sur toute la longueur de la CEF, favorisant ainsi les études de mise en place de la CEF. Par ailleurs, la situation de la ville du Port, sur la côte Ouest (sous le vent) serait idéale pour la CEF, qui n'affronterait pas les phénomènes d'houle australe, de vents et courants d'alizées.

Du point de vue économique, les activités à développer au Port sont clairement la production d'électricité et d'eau potable ou minérale. La climatisation, avec de l'EFP, pourrait se greffer à ces deux activités, tout comme l'irrigation d'espaces verts, via le procédé de condensation de l'humidité ambiante sur les canalisations d'eau froide. L'implantation de ces deux dernières activités demandera une étude précise des besoins actuels et futurs en froid de la ville et une autre sur les économies en eau d'irrigation de la ville du Port. Les activités demandant un espace foncier conséquent telle que l'aquaculture, la culture d'algues et la mariculture seraient difficiles à mettre en œuvre au Port étant donné l'exiguïté du territoire.

Quoiqu'il en soit l'investissement dans ce projet ETM au Port paraît très important, mais il générerait un développement de la ville du Port beaucoup plus important qu'une centrale photovoltaïque représentant le même investissement et la même production énergétique. D'ailleurs, ce « petit » projet serait la phase expérimentale nécessaire au développement mondial de l'ETM et au déploiement plus tardif d'une centrale ETM offshore plus puissante en face du Port.

Ce projet serait le premier mondial à regrouper l'exploitation commerciale de plusieurs activités, valorisant l'Eau Froide Profonde pompée par la centrale ETM. Il conforterait la politique de développement durable de la commune tout en répondant aux futurs problèmes, auxquels sera soumis la ville du Port et l'ensemble de La Réunion. En effet dans les

années à venir, les populations portoises et réunionnaises augmenteront fortement et les problèmes d'approvisionnement en énergie, en eau et en denrées alimentaires se feront ressentir.

Depuis 1999, la Région Réunion a anticipé le problème de l'approvisionnement en énergie avec la création du PRERURE (Plan Régional des Energies Renouvelables et de l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie). L'État Français lance d'ailleurs en 2008 le projet GERRI (Grenelle de l'Environnement à la Réunion : Réussir l'Innovation). Ces deux plans visent l'autonomie énergétique électrique de l'île de La Réunion à l'horizon 2025-2030, sans utilisation d'énergies fossiles et nucléaires. Associé à la défiscalisation réunionnaise, les projets PRERURE et GERRI se doivent d'être un terreau fertile pour le développement de l'ETM à La Réunion et au Port. Ces projets ne seraient pas cohérents, s'ils n'incluaient pas l'utilisation de l'ETM. En effet, il s'agit là d'une des énergies renouvelables de base comme la géothermie et la biomasse.

Hors ces deux dernières filières énergétiques présentent un développement restreint. La biomasse est une énergie de faible densité avec un rendement à l'hectare égale à un dixième de celui du photovoltaïque. Quant à la géothermie, son potentiel serait jugé limité entre 20 et 100MW (forages exploratoires à réaliser). En clair, pour atteindre l'autosuffisance énergétique électrique en 2030, il faudra se baser sur l'océanothermie (ETM) et installer plusieurs dizaines de MW d'ETM à La Réunion.

Une première action de l'État Français serait de définir le tarif de rachat de l'énergie produite par une centrale ETM, afin d'intéresser les entreprises privées à s'investir dans de tels projets. Dans le cas de notre petite centrale ETM littorale, ce tarif de rachat devrait être fixé au minimum aux alentours de celui du photovoltaïque de 0,40€. En dessous de ce tarif de rachat, ce premier projet pilote ne serait clairement pas rentable.



## **IX - Orientation de la valorisation de l'eau froide profonde au Port**

Plusieurs visions du projet ETM et de valorisation de l'eau froide profonde au Port sont possibles au Port.

La première vision serait de garder cette dynamique pour la réalisation d'une étude de faisabilité sur l'utilisation de l'eau froide profonde au Port. La première partie de cette étude de faisabilité se focaliserait sur la stabilité des fonds marins portois pour l'implantation de la Conduite d'Eau Froide. Si les résultats de cette première phase étaient positifs, l'étude de faisabilité se déroulerait et se baserait sur la production d'électricité et la production d'eau au Port. Ce projet novateur en ETM ferait office d'expérimentation à échelle réelle et sera nécessaire à la R&D mondiale sur l'ETM. Par la suite, l'étude de faisabilité pourrait être complétée pour la mise en place d'un réseau de froid urbain et industriel et celle d'un réseau d'irrigation par condensation de l'humidité ambiante sur les tuyaux d'eau froide.

Ce projet d'ETM de phase expérimentale serait le précurseur pour l'implantation d'une centrale ETM offshore plus puissante au large des côtes portaises. La production d'électricité et d'eau serait ramenée à terre via un câble électrique et un tuyau sous-marin. Alors que la remontée d'eau profonde créerait un upwelling artificiel, qui redynamiserait le secteur de la pêche locale.

La seconde vision du projet serait d'intégrer une étude de faisabilité SWAC au projet « Ville est Port ». Cette étude comprendrait la focale sur la stabilité des fonds marins portois ainsi qu'une analyse des besoins en froid actuels et futurs de l'ensemble du territoire du Port. Dans ce cas là, seule une activité de SWAC se développerait.

La troisième vision du projet serait de demander une étude à l'Université de La Réunion, sur la stabilité des fonds marins de la Pointe des Galets vers l'intérieur de la Baie de La Possession en vue de la pose d'une Conduite d'Eau Froide. Suite aux résultats de ces études, il faudra lancer une étude de faisabilité sur la mise en place d'un projet ETM/SWAC, qui ne serait vraisemblablement plus le premier mondial.

Quoiqu'il en soit un point important est la demande faite à la SRPP par la mairie du Port, pour l'extension de ses cuves de stockage sur la mer. Cette étude nécessitera une étude de la stabilité des fonds marins au niveau de la Pointe des Galets. Elle serait quasiment équivalente à celle devant être réalisée pour la mise en place de la Conduite d'Eau Froide d'un projet ETM ou SWAC.

Avant tout lancement d'étude, la Ville du Port devra porter une attention à ses futurs besoins, liés à l'augmentation de sa démographie, notamment à ceux en eau potable. La création d'un projet intercommunal serait aussi la solution avec par exemple la climatisation de la ville éco durable de Gambaie.

Techniquement réalisable, ce projet d'utilisation de l'eau froide profonde représenterait un véritable vecteur de développement pour la ville du Port. Il affirmerait la démarche de développement durable, dans laquelle se sont inscrites la Ville du Port et la Région Réunion et serait le projet pilote pour le développement mondial de l'ETM.

## **X - Bibliographie référence**

### **1. Renewable Energy from the Ocean - A Guide to OTEC**

William H. Avery and Chih Wu, 1994

### **2. Ocean Thermal Energy Conversion**

L.A. Vega, décembre 1999

### **3. OTEC Océanothermie**

David Levrat, Octobre 2004

### **4. Energie Thermique des Mers**

**Le Programme français jusqu'au milieu des années 80, (Le projet ETM 5MW Tahiti)**

Michel GAUTHIER, Octobre 2005

### **5. Courantologie et sédimentologie des baies de Saint Paul et de La Possession à l'île de La Réunion**

Thèse Université de La Réunion, Roland TROADEC, 1991

### **6. Les déstabilisations de flanc des volcans de l'île de La Réunion (Océan Indien): Mise en évidence, implications et origines**

Thèse Université Blaise Pascal de Jean François DEHLER, 2005

### **7. OTEC TEMP**

Gerard NIHOUS

### **8. Sea water district cooling feasibility analysis for the state of Hawaii**

October 2002, State of Hawaii

Department of Business, Economic Development & Tourism

### **9. Programme départemental de recherche en eau 1992; réalisation de forages de reconnaissance en petit et gros diamètre - suivi géologique; Forage P18 Omega, 24p**

Guy Billard, 1994.

### **10. (Rapport non retrouvé) Etude hydrogéologique de la Plaine des Galets. Campagnes de forages 1975-1976. Convention D.D.E.-Réunion, 20p.**

B.R.G.M.-Réunion, 1977.

### **11. Données Bathymétriques de l'île de La Réunion pour les profondeurs allant de 0 à 300m**

© SHOM, 2008. Voir mention des droits de propriété intellectuelle

### **12. Données Bathymétriques de l'île de La Réunion pour les profondeurs allant de 300m à 1000m ou plus.**

© IFREMER, 2008. Voir mention des droits de propriété intellectuelle

### **13. HONOLULU SEA WATER AIR CONDITIONNING, LLC**

LLC Company, June 2007



### **Sites Web:**

21. <http://www.clubdesargonautes.org/>
22. <http://www.clubdesargonautes.org/energie/borabora.htm>
23. [www.commonheritagecorp.com/tech/index.html](http://www.commonheritagecorp.com/tech/index.html).
24. <http://www.hnei.hawaii.edu/>
25. <http://www.seao2.com/otec/>
26. <http://www.xenesys.com/>
27. <http://www.hawaiiideepseawater.com/mineral-rich-water.html>
28. Utilisations diverses de l'eau froide profonde : [www.nelha.org/](http://www.nelha.org/)
29. Projet SHAMASH : [http //www-sop.inria.fr/comore/shamash/index.html](http://www-sop.inria.fr/comore/shamash/index.html)
30. [www.makai.com](http://www.makai.com)
31. Production d'algues : [www.hrbp.com](http://www.hrbp.com)
32. [www.konabaymarine.com](http://www.konabaymarine.com)
33. [www.ipssf.com](http://www.ipssf.com)
34. [www.oceanrider.com](http://www.oceanrider.com)
35. [www.hihealthshrimp.com](http://www.hihealthshrimp.com)

### **ANNEXE :**

Annexe 1 : Questionnaire sur les besoins en froid des entreprises

Annexe 2 : Rapport sur la caractérisation des masses d'eaux au large du Port

Annexe 3 : Analyse forces, faiblesses, opportunités et menaces



## **MENTION DES DROITS DE PROPRIETE INTELLECTUELLE**

Cette étude a été menée dans un but de Recherche et Développement, grâce aux données bathymétriques de l'IFREMER et du SHOM.

© SHOM 2008 – Travaux effectués à partir de données communiqués par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (contrat n°28/2008) – [www.shom.fr](http://www.shom.fr).

Ce service ne peut être tenu pour responsable des résultats et de l'utilisation qui en est faite. Tous droits réservés sauf pour l'enseignement et la recherche.

© IFREMER 2008 – Travaux effectués à partir de données communiqués par l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER (convention ARER\_IFREMER) – [www.ifremer.fr](http://www.ifremer.fr).

Ce service ne peut être tenu pour responsable des résultats et de l'utilisation qui en est faite. Tous droits réservés sauf pour l'enseignement et la recherche.

## **GLOSSAIRE**

ADIR : Agence de Développement des Industries de la Réunion

AIEP : Activités liées à l'utilisation de l'Eau Froide Profonde

Att : atterrissage (points d'atterrissage)

CEF : Conduite d'Eau Froide ou pipeline

CHA : Condensation de l'Humidité Ambiante (irrigation)

DETM : Dessalement par Energie Thermique des Mers

DOW: Deep Ocean Water

DOWA: Deep Ocean Water Applications

EFP : Eau Froide Profonde

ETM : Energie Thermique des Mers

GTM : Gradient Thermique des Mers

NELHA: Natural Energy Laboratory of Hawaii

OTEC : Ocean Thermal Energy Conversion

TCO : Territoire des Communes de l'Ouest

TRI : Taux de Rentabilité sur Investissement

ZAC : Zone d'Activités Commerciales

ZI : Zone Industrielle

