

ENERGIE THERMIQUE DES MERS

Le Programme français jusqu'au milieu des années 80

Le projet ETM 5MW Tahiti

PREAMBULE : HISTORIQUE DEPUIS L'ORIGINE JUSQU'EN 1985

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 ("La revue scientifique" 17 septembre 1881 NDI2, p.370-372). 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 (Brevet français ND 628020 délivré le 20 Juin 1927).

Pour démontrer la validité de son procédé, dont les détracteurs prétendent qu'il produira moins d'énergie que n'en absorbera le pompage de l'eau de mer, CLAUDE réalise entre 1926 et 1931 une série d'expériences, dont celle décisive de CUBA, qui apporte la preuve que le bilan énergétique des centrales ETM sera positif.

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 "multiproduits" : 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" (Opération ETM La Tunisie 1935 - IFREMER DIT/SP/ETM 86-016), 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 (Fourth world power conference. L'utilisation industrielle des différences de température entre les eaux profondes de la mer et les eaux de surface" Ch. BEAU et M. NIZERY) le projet est abandonné en 1956 au profit d'une usine hydraulique.

Il faut attendre les années 1970 pour que, sous la pression croissante des contraintes économiques et stratégiques du marché des produits pétroliers, soient relancés des travaux de R et D sur cette filière énergétique et que l'on explore aussi d'autres propriétés intéressantes des "Eaux océaniques intermédiaires" (E.O.I.) .

En particulier, on commence alors à s'intéresser à l'utilisation de ces E.O.I. à des fins aquacoles (Mission aux USA CNEXO/COB/TDI 74221. - 28.02.1974). outre leurs basses températures (de 4° à 6° c entre 1 000 et 600 m de profondeur) ces eaux ont été pendant une très longue période isolées des eaux superficielles et donc soustraites à l'effet de la photosynthèse. Elles se sont à la fois enrichies en constituants nutritifs et débarrassées de la plupart des organismes présentant des risques pathogènes pour les espèces vivant dans les tranches d'eaux supérieures. Des expériences modestes ou avortées sont entreprises (dès 1972 par le Dr ROELS aux Iles Vierges - en 1976, pose et rupture d'une conduite de pompage de diamètre 100 mm au Centre CNEXO de Vairao à Tahiti).

Energie Thermique des Mers : le programme français jusqu'au milieu des années 80

Synthèse de documents rédigés, en 1985 et 1989, par Michel Gauthier, chef de projet ETM

Pendant cette période (qui se terminera vers 1985 avec la baisse spectaculaire des produits pétroliers), on assiste, dans le monde, à une intense activité R et D sur tous les thèmes reconnus d'exploitation de cette ressource G.T.M. (Gradient Thermique des Mers).

Plusieurs petites centrales ETM électrogènes de démonstration sont construites. Celle d'Hawaï baptisée "MINI-OTEC" est la première à fonctionner à l'ammoniac en cycle fermé. 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.

C'est pendant cette période qu'a été réalisée en France, sous la maîtrise d'œuvre d'IFREMER et avec la participation du GIE Industriel ERGOCEAN, l'étude d'un avant-projet de centrale dite "prototype de démonstration" de 5 MWe net qui devait être construite à Papeete en Polynésie Française.

Le Projet ETM 5MW - Tahiti

Située au cœur de l'énorme ressource ETM que constitue la zone intertropicale de l'océan Pacifique, l'île de Tahiti apparaissait, après inventaire des sites potentiels d'implantation, comme un site particulièrement propice à la démonstration de la compétence de l'industrie française à développer cette nouvelle filière énergétique.

L'enjeu était de taille car l'ETM est susceptible d'intéresser de nombreux pays de la zone intertropicale dans le cadre de la recherche d'une certaine autonomie énergétique, d'une diversification des sources d'approvisionnement et d'une protection contre les fluctuations des prix des ressources primaires fossiles (pétrole, gaz et charbon).

Au début des années 1980, la promotion du prototype ETM de démonstration pour TAHITI avait été faite en présentant aux tutelles de l'IFREMER le double attrait politique et économique de l'entreprise. S'agissant d'une centrale électrogène, elle apparaissait comme une première étape d'un plan d'équipement préparant le Territoire à faire face au renchérissement inexorable et bientôt économiquement insupportable des prix du pétrole. S'agissant d'un investissement pour le développement d'une technique "pacifique" et non polluante, l'initiative ne pouvait qu'être favorablement accueillie dans cette région du monde.

C'est donc à l'initiative de l'IFREMER (ex CNEXO) qu'en 1982 il fut proposé de réaliser un premier pilote de puissance suffisamment grande pour dépasser le stade de la faisabilité technique et permettant d'approcher, en toute connaissance de cause, les problèmes posés par l'exploitation commerciale de cette nouvelle filière énergétique.

Une puissance nette de l'ordre de 5 MW électriques apparut compatible avec cet objectif.



Vue d'artiste du projet de centrale « cycle ouvert »
sur la digue de Fare Ute à Papeete

L'étude technique d'avant projet de cette centrale ETM de 5MWe fut accompagnée :

- d'une étude détaillée du site d'implantation (impliquant plus de 2 années de mesures météo-océaniques et la mise en œuvre de tous les moyens de cartographie et de reconnaissance des fonds RAIE, Sea Beam, SAR et CYANA),
- d'une étude prospective des effets socio-économiques de la construction et de l'exploitation de la centrale sur le Territoire français de Polynésie,

Energie Thermique des Mers : le programme français jusqu'au milieu des années 80

Synthèse de documents rédigés, en 1985 et 1989, par Michel Gauthier, chef de projet ETM

- d'une étude d'impact sur l'environnement marin, avec une approche originale de modélisation numérique de l'écosystème côtier dans la zone de rejets des effluents.

Le coût total de ces travaux d'avant projet a dépassé 50 MF (7.6 M€) sur 5 années (Rapport de synthèse final : "Avant projet Tahiti - Centrale ETM de 5 MWe - Doc IFREMER-ERGOCEAN)

Il existe une abondante littérature sur tous les travaux de la décennie 1975-1985 (Energie thermique des mers - Evaluation pour la CEE - Contrat XVII 496-83 F. - EUR 9895 FR 1985).

La connaissance du site

Une excellente connaissance du site s'avère nécessaire pour fixer les paramètres d'environnement indispensables au dimensionnement des composants de la centrale, mais aussi pour l'étude des effets que le fonctionnement de la centrale induira sur le milieu océanographique.

De 1982 à 1985, le programme d'exploration du site réalisé par l'IFREMER a permis d'acquérir, avec la fiabilité souhaitable au stade de l'avant projet, toutes les données nécessaires, tant aux ingénieurs de conception qu'aux "environnementalistes" et qu'aux économistes : l'évaluation précise de la ressource thermique c'est-à-dire les variations saisonnières de l'écart de température entre la surface et le fond étant, de ce point de vue, essentiel pour chiffrer la productivité de la centrale. Les variations saisonnières des températures telles qu'elles apparaissent après plus de 2 ans de mesures sont indiquées sur le tableau n° 1. La ressource thermique existante a permis d'évaluer à 38 millions de kWh la production annuelle moyenne de l'usine.

Tabl. 1. - Fluctuations saisonnières moyennes des eaux entre la surface et la profondeur 1 200 m sur le site de Tahiti étudié par l'IFREMER

Immersion	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
20	27,11	28,38	28,56	28,53	27,87	26,97	26,60	25,89	26,49	26,27	27,18	26,86	27,22
50	26,60	27,94	27,41	27,95	27,15	26,75	26,46	25,80	26,36	26,04	26,79	26,50	26,81
100	24,70	25,48	24,88	25,10	25,17	25,50	25,58	25,43	25,78	25,43	25,65	25,07	25,31
200	21,30	21,60	21,59	21,45	21,15	20,90	21,85	21,72	21,54	21,50	21,89	21,25	21,48
300	16,45	16,30	15,79	16,38	16,00	15,95	17,15	15,45	15,42	15,80	15,64	16,90	16,10
400	11,50	10,82	10,95	10,63	11,40	11,54	11,95	10,87	10,47	11,07	10,25	12,38	11,15
500	8,05	7,85	8,00	7,76	7,90	8,13	8,40	8,12	7,97	7,78	7,64	8,45	8,00
600	6,48	6,51	6,44	6,42	6,30	6,39	6,87	6,55	6,72	6,35	6,34	6,50	6,49
700	5,59	5,62	5,49	5,51	5,46	5,54	5,83	5,58	5,77	5,54	5,50	5,71	5
800	4,92	4,95	4,87	4,87	4,86	4,90	5,05	4,90	5,00	4,93	4,87	4,99	4,92
900	4,40	4,42	4,37	4,37	4,39	4,40	4,45	4,36	4,41	4,44	4,37	4,42	4,40
1 000	3,98	4,00	3,97	3,97	4,00	3,99	3,98	3,93	3,94	4,05	3,97	3,98	3,98
1 100	3,64	3,65	3,65	3,63	3,68	3,66	3,59	3,58	3,56	3,72	3,63	3,61	3,63
1 200	3,35	3,36	3,37	3,35	3,42	3,38	3,27	3,28	3,24	3,45	3,35	3,30	3,34

La centrale projetée devant être implantée à terre sur la zone portuaire du Port de Papeete, le relevé précis de la topographie des fonds où devait être posée la conduite d'eau froide a nécessité la mise en œuvre de toute la panoplie des moyens d'investigation disponibles : sondeurs multi-faisceaux (Sea Beam), submersible habité (Cyana), etc. ..., pour découvrir au cours de ces travaux que le relief sous marin était plus accidenté que ne l'avait laissé prévoir les données bibliographiques disponibles au départ du projet et qu'en particulier une falaise verticale entre les cotes - 100 et - 200 m suivie d'une zone d'éboulis obligerait à imaginer pour la conduite d'amenée d'eau froide un concept d'installation plus complexe qu'une simple pose sur le fond. La principale difficulté rencontrée au cours de cette exploration provenait du manque de moyens légers pour la mesure des caractéristiques mécaniques des sols sous-marins.

Etudes et développements techniques

Un Groupement d'Intérêt Economique (ERGOCEAN) créé en décembre 1982 entre ALSTHOM ATLANTIQUE, CREUSOT LOIRE (FRAMATOME), JEUMONT SCHNEIDER, CG DORIS, SGE, SPIE BATIGNOLLES, pour la promotion et le développement de la filière ETM, s'est vu confier par l'IFREMER l'essentiel des travaux d'ingénierie relatifs aux principaux sous-systèmes c'est-à-dire au sous-système de production énergétique, au sous-système prises et rejets des eaux et à l'infrastructure générale de la centrale.

Energie Thermique des Mers : le programme français jusqu'au milieu des années 80

Synthèse de documents rédigés, en 1985 et 1989, par Michel Gauthier, chef de projet ETM

Le sous-système énergétique

Rappelons qu'à partir des sources chaude et froide de l'ETM, différents concepts thermodynamiques peuvent être proposés pour produire de l'énergie. L'installation de G.CLAUDE, à Cuba en 1930 utilisait le concept dit "du cycle ouvert" dans lequel c'est l'évaporation sous vide de l'eau de mer chaude qui fournit le fluide moteur, en l'occurrence la vapeur d'eau, pour actionner la turbine.

Dans les deux réalisations américaine et japonaise précédemment évoquées, ce sont respectivement l'ammoniac et un fréon qui étaient utilisés comme fluide de travail. Ces fluides sont évidemment recyclés d'où la dénomination de "cycle fermé" généralement utilisée pour désigner ce concept.

Compte tenu de l'état, dans les années 80, de la technologie des machines thermiques pour le domaine de puissance choisi, c'est-à-dire des petites unités jusqu'à quelques dizaines de mégawatts électriques, les avantages et les inconvénients des deux concepts sont partagés et le programme des travaux ERGOCEAN/IFREMER englobait des travaux expérimentaux sur les deux cycles.

Pour le cycle fermé il s'agissait de vérifier les performances de mouillabilité et de transferts thermiques de tubes d'échangeurs de diverses natures : tubes en titane lisses ou « corrugués » et aussi de mesurer le taux de dégradation du transfert thermique en fonction de la croissance du microfilm de substances biochimiques qui se forme inévitablement sur les surfaces métalliques immergées dans l'eau de mer.



Vue de la boucle d'essais en eau de mer réalisée au Centre Ifremer de Brest pour l'étude des phénomènes de corrosion et de salissures marines dans les tubes d'échangeurs

Pour le cycle ouvert, l'essentiel des travaux porta sur la vérification des taux de dégazage des eaux de mer chaudes soumises à l'évaporation flash et à l'optimisation des performances thermiques des échangeurs : évaporateurs et surtout condenseurs à mélange.

Les principales caractéristiques des deux avant-projets de centrale sont indiquées ci-dessous :

CENTRALES ETM de 5 MWe – IFREMER/ERGOCEAN			
	Cycle ouvert	Cycle fermé	
Débit d'eau chaude	14,6	19,8	m ³ /s
Débit eau froide	7,6	12	m ³ /s
Puissance brute	6,990	6,800	kW
Puissance de pompage			
eau chaude	340	600	kW
eau froide	670	940	kW
Autres auxiliaires	780	270	kW
Puissance électrique nette	5,200	4,990	kW
puissance nette			
puissance brute	0,74	0,73	

L'infrastructure et les conduites d'aménées d'eau

Le faible écart de température existant entre les sources chaude et froide entraîne évidemment que le rendement thermique global d'une telle centrale ne peut dépasser quelques pourcents et que les débits d'eau nécessaires à son fonctionnement sont relativement énormes. La difficulté principale pour

Energie Thermique des Mers : le programme français jusqu'au milieu des années 80

Synthèse de documents rédigés, en 1985 et 1989, par Michel Gauthier, chef de projet ETM

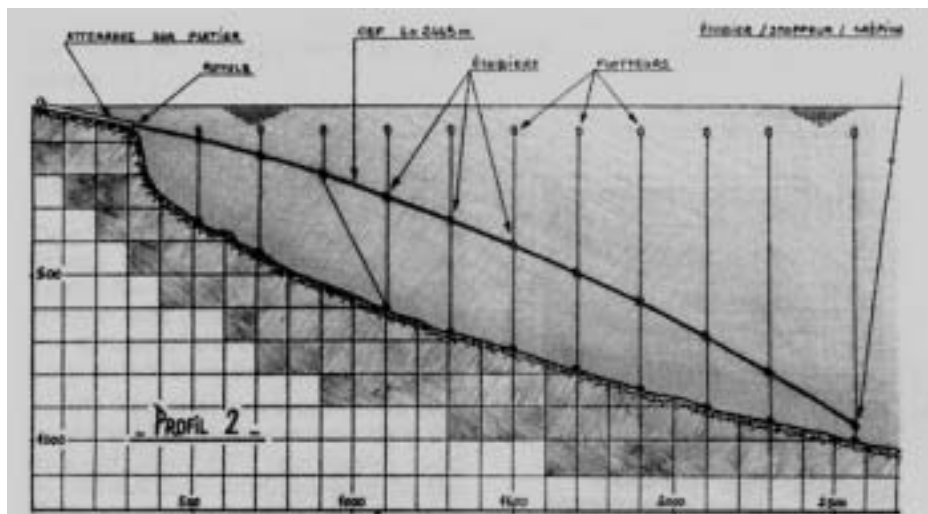
la réalisation de l'usine réside donc dans la construction des amenées d'eau, notamment celle d'eau froide profonde, qui, compte tenu des débits requis et de l'impérieuse nécessité de minimiser les pertes de charge, seront à puissance donnée de diamètre impressionnant entre 2 et 3 m pour 5 MWe (5 à 6 m pour 20 MW, etc. ..).

Un large inventaire des solutions envisageables fut donc entrepris très tôt par ERGOCEAN afin de dégager les choix essentiels concernant, non seulement la construction de la conduite proprement dite, mais aussi les méthodes de pose. Il se dégagait rapidement que l'extrapolation des techniques de pose de type "pipe" pétrolier conduisait à concevoir des matériels dont le coût était rédhibitoire pour l'économie du projet et qu'il fallait concevoir un concept construction - pose qui satisfasse à la fois aux trois conditions :

- ne pas nécessiter de moyens navals lourds ni d'équipements spécifiques dont le coût serait trop élevé pour être raisonnablement amorti sur la première centrale prototype ;
- s'adapter aux caractéristiques physiques du site et en particulier au relief des fonds marins ;
- pouvoir être extrapolé à des dimensions de conduite compatibles avec des puissances de plusieurs dizaines de MWe.

A l'issue de ces travaux, la solution proposée par ERGOCEAN pour l'amenée d'eau froide était constituée d'une conduite dont le poids dans l'eau est proche de zéro, supporté en pleine eau par une série "d'écubiers" guides au travers desquels la conduite est enfilée à la pose.

La disposition finale est représentée sur la figure ci-après. La longueur totale de la conduite était de 2.800 m et son diamètre 3 m. La hardiesse de l'entreprise doit être relativisée en se rappelant qu'il y a plus de 50 ans G. CLAUDE réussit à poser à Cuba une conduite de 2000 m de long en tôle ondulée soudée de 2 m de diamètre !



Conduite d'eau froide : solution « conduite sur écubiers suspendus »

L'abandon du projet à l'issue de la phase d'avant-projet en 1986

Les résultats des travaux d'évaluation terminés en 1985 montraient qu'un prototype de 5 MWe aurait fourni environ 15% de l'énergie nécessaire à Tahiti en 1990 à un prix de revient de 1,8 F (0.275 €) le kWh. Le coût du kWh Diesel début 1985 sur le territoire dépassait déjà 1 F (0.15 €) et l'argumentation développée pour accréditer la perspective de viabilité économique de la filière ETM n'apparaissait pas dérisoire.

Cette argumentation s'effondra en même temps que s'effondrèrent les cours des produits pétroliers entre 85 et 86. Au cours de cette période le prix du fioul à Tahiti passa de 2,70 F à 1,60 F le litre (de 0.41 à 0.24 €).

L'échéance d'une éventuelle compétitivité entre l'électricité produite par ETM et celle produite par diesel disparaissait des perspectives à court terme et il fut décidé de laisser le projet dans ses cartons.

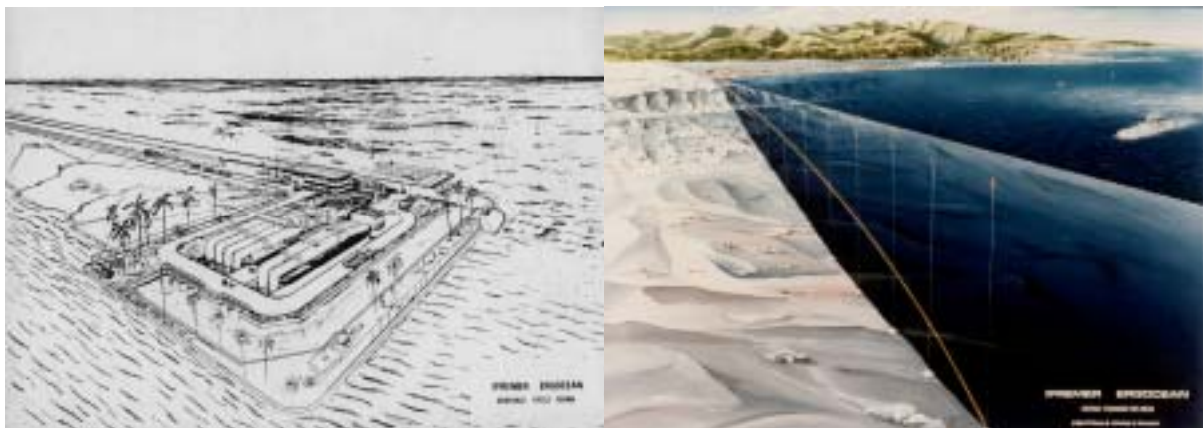
Energie Thermique des Mers : le programme français jusqu'au milieu des années 80

Synthèse de documents rédigés, en 1985 et 1989, par Michel Gauthier, chef de projet ETM

Pour tenter de valoriser les connaissances acquises par l'équipe ETM de l'IFREMER, une activité minimum fut maintenue entre 1985 et 1986 sur le seul thème de la production d'eau douce, intéressante pour certaines zones côtières arides de la bande océanique intertropicale. Le coût très bas du fioul ne permettait pas non plus au dessalement par GTM d'être compétitif avec les procédés classiques, mais l'investissement nécessaire à la construction d'une unité de dessalement GTM produisant quelques centaines de mètres cubes d'eau douce par jour était inférieur d'au moins un ordre de grandeur au coût d'une centrale ETM électrogène de taille démonstrative. Ainsi, une unité GTM 400 m³/j étudiée pour BORA BORA aurait-elle coûté 20 MF (3 M€) alors que l'usine ETM de 5 MWe de Tahiti avait été estimée à plus de 500 MF (76 M€). Le problème technique de la tuyauterie d'amenée de l'eau froide se trouvait aussi simplifié puisque pour la démonstration envisagée de 400 m³/j, le diamètre de la conduite aurait été de 0,5 m à comparer aux 2,5 m de la conduite nécessaire pour la démonstration électrogène de 5 MWe.

Pour ces deux raisons principales, l'IFREMER avait espéré susciter les intérêts convergents de pays-clients et d'industriels-constructeurs (Les sociétés SIDEM et ENTROPIE, notamment.) pour participer au financement d'une entreprise dont le niveau de risques techniques et financiers apparaissait acceptable.

Malgré plusieurs tentatives aucun montage financier n'apparut possible et l'IFREMER cessa toute activité technique sur ce thème fin 1987, hormis l'achèvement de quelques actions en cours: une étude technico-économique de modules de dessalement et l'expérimentation en collaboration avec le CENG (CEA - Grenoble) d'une boucle en eau de mer, à la station d'essais de dessalement de Toulon.



Vue d'artiste d'une centrale cycle fermé et de la solution proposée, en 1985, pour la pose du tuyau d'eau froide

Ce document résulte de la synthèse de 2 documents rédigés par Michel Gauthier, chef de projet ETM, en 85 (L'énergie thermique des mers – Géothermie actualités vol 2, n°4 – 1985) et 89 (Rapport sur les recherches scientifiques et les développements techniques en cours dans le monde pour l'exploitation de la ressource que représentent dans les eaux intertropicales les eaux océaniques intermédiaires et le gradient thermique des mers (DREC/MG 89.064))