



## ”L'Énergie

### Thermique des Mers: une énergie renouvelable oubliée mais pleine d'avenir.

L'Énergie Thermique des Mers (ETM) est le nom générique donné aux procédés qui permettent de produire de l'énergie électrique à partir de la chaleur stockée dans l'eau de l'océan chauffée par le soleil. C'est vers la fin du XX<sup>e</sup> siècle que les bases scientifiques et techniques se trouvèrent rassemblées grâce aux travaux des physiciens, Carnot et Clapeyron notamment, des marins comme Ellis et des océanographes du « HMS Challenger ». Les premiers démontrèrent qu'il était possible d'extraire de l'énergie mécanique d'un transfert de chaleur d'une source chaude vers une source froide. Les seconds découvrirent que dans les profondeurs de l'océan, l'eau était presque uniformément froide, toujours proche de 4 °C, à 1 000 mètres de profondeur même dans les régions tropicales où l'eau de surface est la plus chaude et peut dépasser 28 °C et où les cyclones tropicaux puisent leur énergie dévastatrice. Le nom d'Énergie Thermique des Mers et son sigle ETM désignent indifféremment la ressource énergétique de ce phénomène naturel et les procédés pour son exploitation.

### L'ETM des pionniers

En 1881 le médecin et physicien français Arsène d'Arsonval propose un procédé de conversion thermodynamique de l'ETM. C'est celui de la turbo-machine à vapeur qui fait appel à des technologies déjà bien connues et adaptées à son industrialisation. Il fonctionne suivant le schéma simplifié de la (Figure 1). D'Arsonval suggère ironiquement de placer la chaudière de la machine « dans les mers tropicales ..... et son condenseur aux pôles » en ajoutant : « Mais point n'est besoin de faire un si long trajet ; nous savons en effet que même à l'équateur, le fond de la mer est à 4° centigrade... ». Mais c'est avec G.Claude, à partir des années 1920, que commenceront vraiment les travaux de développement de la filière dont il est reconnu comme le pionnier.

Un personnage atypique que ce Georges Claude, né à Paris en 1870. Son père, un ancien instituteur devenu ouvrier puis industriel aisé, a pris en charge l'éducation de son fils Georges jusqu'à son admission à l'École de Physique et de Chimie Industrielle créée à Paris en 1882. Après une brève carrière dans l'industrie de l'éclairage par l'électricité et par le gaz, le jeune ingénieur s'intéresse, à partir de 1896, à la production et aux usages de l'acétylène, puis à la production de l'oxygène nécessaire à la soudure oxyacétylénique. Ses brevets sur la liquéfaction des gaz et la synthèse de l'ammoniac font de lui un jeune et riche industriel. Il est un

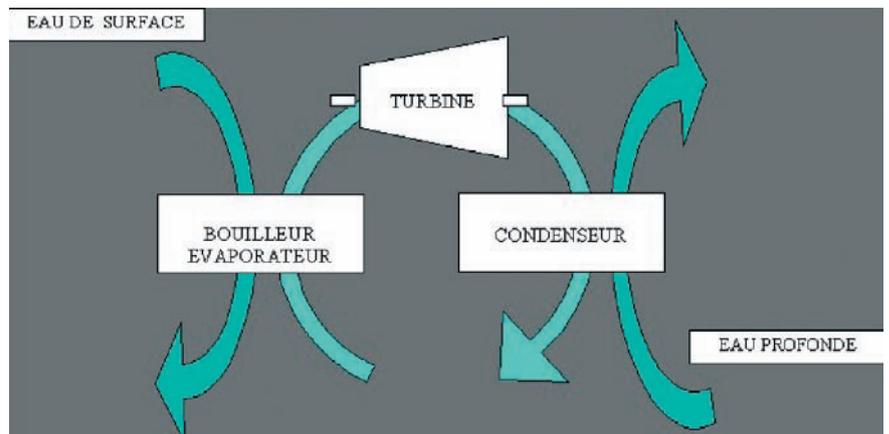
des fondateurs de la société l'Air Liquide au début des années 1900 et devient membre de l'Académie des Sciences, Section des Applications des Sciences à l'Industrie, en 1924 (Figure 2). À cette période de sa vie, il redécouvre la proposition de d'Arsonval pour l'exploitation de l'ETM et va dès lors y consacrer l'essentiel de son temps et de ses talents d'ingénieur. Déjà à cette époque, la perspective de l'épuisement des réserves de charbon suscitait la recherche de ressources nouvelles en énergie primaire pour répondre aux besoins croissants de l'industrie.



Fig. 2

Avec Paul Boucherot, un ancien camarade d'étude, ils imaginent d'utiliser une enceinte maintenue à une pression suffisamment basse - quelques milliers de Pascal - pour provoquer l'ébullition de l'eau pompée à la surface de l'océan dans la zone intertropicale, puis d'utiliser la vapeur ainsi formée pour produire de l'électricité dans un turboalternateur dont le condenseur est refroidi par de l'eau froide pompée en profondeur. En 1926 Claude présente leur invention à ses pairs de l'Académie et en

Fig. 1



montre la faisabilité de principe par une expérience dont le montage est représenté (Figure 3). « Pendant quelques instants, écrit-il dans ses Mémoires, l'électricité produite par ce joujou n'allumait que 3 lampes

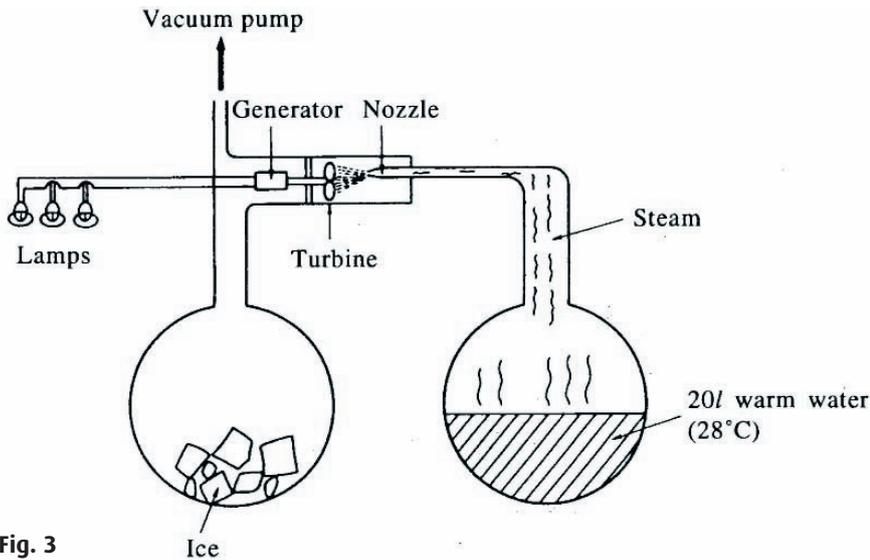


Fig. 3

miniatures faisant en tout 3 watts... ». Pour confondre ses détracteurs qui prétendaient que le procédé consommerait plus d'énergie qu'il n'en produirait, il fait construire, « à ses frais », une turbine couplée à une dynamo de 60 kW qui fonctionnera avec de l'eau douce et un écart de température de 20 °C, proche de celui que l'on peut trouver dans l'Océan Tropical. Il obtient une puissance nette de 50 kW. Lui restait encore à montrer que le procédé serait réalisable en mer. Claude choisit d'en faire la démonstration dans la baie de Matanzas, à Cuba. C'est un site relativement protégé mais peu profond où « la température au fond sera seulement de 11 °C ». C'est de l'avis même de Claude une « énorme tâche que construire, avec des éléments fabriqués en France, un tube de 2 kilomètres de long et 2 mètres de diamètre, puis d'immerger l'immense serpent d'acier qui remontera des abysses l'eau froide, lequel alimentera les appareils d'Ougrée ». Il s'y attelle et le 28 août 1929 le « tube » est terminé. Mais sa pose en mer est un échec. Claude entreprend la fabrication sur place d'un second tube, encore « à ses frais » comme il aime le répéter pour rappeler qu'il a de l'audace et sait prendre des risques. Hélas ! l'opération de pose échoue pour la seconde fois, 10 mois après la première tentative. Il faudra attendre septembre 1930 pour qu'enfin un

troisième tube, correctement posé, permette à la première micro usine ETM de fonctionner. Elle atteint la puissance de 22 kW, le 20 octobre 1930. Ce résultat conforte les prévisions de Claude : « les grandes sta-

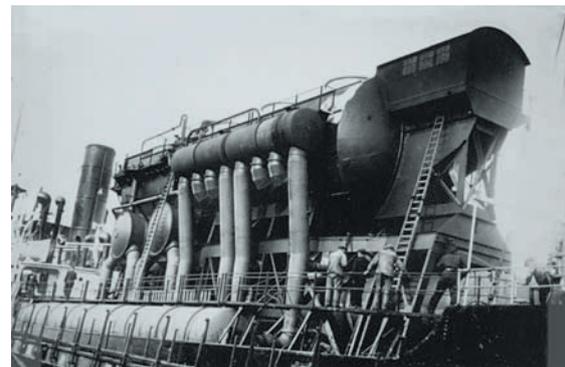
tions de l'avenir pourront produire plus de 600 kW nets par mètres cube d'eau froide par seconde ». Reste alors à Claude à montrer que la production d'électricité par ETM est économiquement viable. Il estime que cet objectif pourrait être atteint avec des centrales ETM de plusieurs centaines de MW installées sur des « îles flottantes » dont le coût d'investissement descendrait à 60 US\$ le kW (valeur 1930), mais qu'avant d'atteindre ce seuil il faudra franchir l'étape intermédiaire probatoire d'une usine pilote de 25 MW dont il estime le coût entre 3 à 4 millions de dollars ! Dans l'euphorie de la réussite de son expérience cubaine, Claude espère pouvoir lever les fonds nécessaires et obtenir l'autorisation du gouvernement pour construire et installer ce pilote en mer près de Santiago de Cuba. Mais la crise économique frappe le monde, et Claude ne trouve pas les soutiens financiers qu'il espérait. Il est obligé de modifier sa stratégie. Fidèle à l'image qu'il aime donner de lui-même il décide de construire, à nouveau sur ses fonds propres, une usine ETM flottante où il produira de la glace industrielle pour répondre au marché qu'offrent les habitants de Rio de Janeiro pour ce produit pendant les trois mois de l'été austral. Il est sûr que le succès commercial de l'opération prouvera qu'il a eu raison contre tous ses détracteurs et que l'ETM, même de peti-

te puissance – celle de l'usine à glace qu'il a conçue n'est que de 3,5 MW – peut être rentable en combinant à la fois la production d'énergie, d'eau douce et de froid.

C'était en 1932. Avec la « crise terrible qui pesait sur le monde, des bateaux quasi neufs se vendaient presque au prix de la ferraille ». Claude achète un cargo de 10 000 tonnes de déplacement : le « Tunisie » qu'il fait transformer aux Chantiers de Dunkerque en navire-usine conformément au plan qu'il a conçu (Figure 4). Mais arrivé sur le site prévu pour mouiller l'usine, à plus de 60 nautiques au large de Rio, c'est l'échec des opérations de pose de la conduite d'eau froide. Le 8 février 1935, pressé par le temps et presque ruiné, Claude renonce à poursuivre l'aventure.

Ses idées seront reprises et plusieurs projets seront étudiés par l'Électricité de France pour la réalisation de centrales de 3,5 MW en Guadeloupe et à Abidjan ; ils seront finalement abandonnés vers la fin des années 1950.

Fig. 4



## L'ETM : des années 1960 à 1986.

Aux Etats-Unis, J.H. Anderson, en 1963, anticipant avec raison les difficultés techniques pour réaliser les turbines de grande puissance des usines ETM selon le procédé de Claude propose de l'abandonner et d'utiliser non plus l'eau mais un autre fluide : le propane, comme fluide de travail. On retiendra de ces travaux les noms d'ETM en « cycle ouvert » pour le procédé G.Claude et celui d'ETM en « cycle fermé » pour celui d'Anderson, afin de différencier les deux filières selon le choix du fluide de travail. C'est la première crise pétrolière de 1973 qui va déclencher aux États-Unis et au Japon un nouvel essor de la recherche pour le développement de l'ETM, et principalement de la filière ETM « cycle fermé ». Aux Etats-Unis cet essor est marqué par la construction du NELH : le « Natural Energy Laboratory of Hawaii » sur la « grande île ». Dès 1975 y commenceront les premiers travaux à terre sur les échangeurs thermiques: évaporateurs et condenseurs, de la filière « cycle fermé ». Puis c'est la réalisation – sur financement mixte d'Industriels et de l'État d'Hawaï – et les essais en mer de la première centrale flottante ETM en cycle fermé : « Mini-OTEC ». Montée sur une barge ancrée par 900 mètres de fond et utilisant l'ammoniac comme fluide de travail, elle produit 50 kW électriques nets et fonctionnera de façon satisfaisante pendant 4 mois en 1979, avant son démantèlement programmé.

En parallèle c'est le DoE – le Département de l'Énergie des USA, qui finance en 1979 la réalisation d'un laboratoire flottant, « OTEC-1 » pour la mise au point d'échangeurs eau de mer-ammoniac. Monté sur un ancien ravitailleur de l'US Navy de 22 000 tonnes rebaptisé « SS Ocean Energy Converter », le laboratoire alimenté en eau froide pompée à 700 mètres de profondeur fonctionnera plusieurs mois avec une puissance thermique de 35 MW. Outre l'expérience acquise sur les échangeurs thermiques, ces expériences Mini-OTEC et OTEC-1, permettront aux industriels américains de valider leurs procédures d'installation et de tenue à la mer des équipements nécessaires aux futures usines ETM.

Le dynamisme américain est soutenu par l'administration démocrate du Président J. Carter. En 1980 le Congrès vote la Public Law 96-310 qui programme la construction par les Etats-Unis d'une capacité de production de 100 MW d'électricité ETM en 1986 et d'au moins 500 MW en 1989 ; avec l'objectif national (national goal) d'un parc US de centrales ETM de 10 000 MW en 1999 !

Aussi soucieux que les américains de leur dépendance énergétique et de la vulnérabilité qu'elle représente pour leur économie, les japonais proposent en 1974 un ambitieux programme de développement d'énergies nouvelles baptisé « Sunshine project », incluant l'ETM, avec l'ambition de démontrer la viabilité économique de centrales de 100 MW à l'horizon 1990. C'est dans cette perspective qu'ils réalisent :

- en 1979, une « Mini OTEC » japonaise en cycle fermé avec un fréon comme fluide de travail qui sera mouillée à Shimane dans la mer du Japon ;
- en 1980, l'usine expérimentale de Nauru, construite « onshore ». Elle est comme la précédente du type à cycle fermé -au fréon- et produira 31 kW d'énergie électrique pendant une période de plusieurs mois d'essais terminée en 1982 ;
- en 1982, une petite centrale ETM de 50 kW en cycle fermé utilisant l'ammoniac, sur l'île de Tokunoshima au sud de l'île de Kyushu.

Il s'agit là des réalisations les plus marquantes de cette période. La contribution française à l'ETM pendant cette période fut l'étude entre 1982 et 1985 d'une centrale de 5 MW pour la Polynésie Française, sans apports scientifiques ou techniques significatifs, comparés à ceux des travaux américains et japonais.

Dès 1981, avec l'élection du Président Reagan, l'administration républicaine entreprit de réduire l'aide financière publique à l'ETM avec l'argument que les technologies de la filière étaient suffisamment bien connues (mature) pour que l'industrie privée puisse supporter le risque de son développement commercial. Le fait le plus marquant de ce changement politique fut l'abandon du projet de construction d'une centrale

de 40 MW à Hawaï qui devait être cofinancée par le DoE et l'industrie, et dont l'appel d'offres avait été lancé en application du programme proposé par l'Administration du Président Carter.

En 1986, la baisse des prix du pétrole sur le marché mondial, amplifia cette tendance au désengagement des fonds publics pour le développement de l'ETM. Le désengagement fut total en France, sévère aux USA et sensible au Japon. Il en résultera une « nouvelle donne » du savoir faire mondial en matière d'exploitation de la ressource ETM avec la domination incontestée des USA et du Japon.



## L'ETM après 1986 : la nouvelle « donne ».

Les cultures japonaises et polynésiennes ont en commun la croyance en des liens privilégiés entre les hommes et la mer, source de vie et de richesses. Beaucoup de politiciens, tant au Japon qu'à Hawaï, ont puisé dans cette conviction suffisamment d'arguments et de supports populaires pour maintenir une activité de recherche sur l'ETM après 1986 !

L'eau pompée en profondeur, indispensable au fonctionnement des usines ETM, est non seulement froide et peu polluée mais elle est aussi riche en nutriments. Ces propriétés sont les résultats combinés de la minéralisation des débris organiques, entraînés depuis la surface vers le fond, et de la circulation thermohaline qui entraîne de l'eau de mer froide vers les fonds marins dans les régions polaires et la fait remonter lentement à la surface dans les zones d'« upwellings » naturels après un voyage plusieurs fois séculaire !

Forcés par la nécessité d'atteindre la compétitivité et de réduire le coût de l'énergie produite par ETM, les chercheurs américains et japonais se sont ingénies à trouver d'autres utilisations pour ces eaux profondes qui apparaissaient comme des effluents inutiles après leur passage dans les condenseurs. C'est au NELH d'Hawaï que cette politique de valorisation baptisée « DOWA : Deep Ocean Water Application », fut pensée et mise en œuvre, selon plusieurs axes de recherches :

- l'économie d'énergie. Par exemple en utilisant ces effluents froids pour la climatisation de locaux ;
- la production d'eau douce. On savait déjà depuis les travaux de G. Claude que le condensat du procédé « cycle ouvert » était de l'eau distillée. Mais on a imaginé d'autres procédés : par exemple en condensant la vapeur d'eau de l'air humide tropical sur des tuyaux dans lesquels circulent les effluents froids ;
- l'élevage et la culture d'algues. On utilise les effluents d'eau profonde à la fois pour leur richesse en sels minéraux et leur faible teneur en organismes et substances pathogènes, et aussi pour ajuster la température des bassins aux exigences des produits d'élevage et bien d'autres encore !

L'imagination des chercheurs tant à Hawaï qu'au Japon les ont conduits à utiliser les eaux profondes à des fins thérapeutiques, culinaires : pour la production de sel de cuisine et de saké, voire à des fins touristiques ! (Figure 5).

Au Japon cette politique est encouragée par la création de nurseries d'entreprises, équipées d'installation de pompage d'eau profonde, financées par les préfectures : les collectivités territoriales japonaises. Il en existe une dizaine au Japon dont celles de Kochi (1980), de Toyama (1995), de Kumejima (2000). Le chiffre d'affaires généré par ces activités annexes de la filière ETM se compterait en millions de dollars.

En parallèle, et parfois en coopération bilatérale, le Japon et les USA continuent aussi leurs travaux pour augmenter l'efficacité de la production de l'énergie par ETM. Ainsi le NELH d'Hawaï a abrité les travaux du PICHTR (Pacific International Center for High Technology Research) pour la réalisation, puis les essais entre 1993 et 1998, d'une mini usine cycle ouvert à terre de 250 kW, en coopération avec le Japon. Le Japon en coopération avec l'Inde a mis à l'eau en 2001 une usine flottante ETM de 1 MW électrique (Figure 6). Elle serait en cours d'essai, mouillée quelque part au sud du continent indien.

Depuis près de vingt ans, les Etats-Unis et le Japon ont réussi à maintenir un certain dynamisme dans leur recherche de solutions techniques et d'options économiques rendant l'exploitation de l'ETM de plus en plus attrayante. Ils ont optimisé les performances des composants (échangeurs et turbines), conforté le degré de confiance de la tenue des équipements marins - notamment pour la construction et la pose de conduites d'aspiration d'eau profonde - et développé le concept d'usines ETM « multi-produits » de tailles modestes, jusqu'à quelques dizaines de MW. Ce concept d'usine, qui permet de valoriser les autres utilisations des eaux froides profondes pour le conditionnement d'air, la production d'eau douce et de produits aquacoles entre autres, est plus particulièrement adapté aux besoins de petites

communautés littorales isolées proches de la ressource.

Ils ont également étudié l'extrapolation de la filière ETM à des usines flottantes de plusieurs centaines de MW pour la production en mer de combustibles liquides synthétiques (hydrogène, ammoniac et méthanol) transportables par navires-citernes et répondant au besoin en énergie primaire des pays industrialisés éloignés des zones où la ressource ETM est disponible.

Enfin, les données acquises pendant le fonctionnement d'installations expérimentales, leur permettent une certaine appréciation des « impacts » – effets positifs et négatifs – des rejets dans le milieu naturel des effluents d'eau profonde encore froids et riches en sels minéraux, et d'ébaucher des limites à l'exploitation durable de la ressource.



Fig. 5

Fig. 6



## L'ETM, quelles perspectives ?

De 1986 à aujourd'hui, s'est développée l'idée que le recours aux énergies renouvelables et propres s'imposerait comme une nécessité. Non pas seulement pour pallier de possibles ruptures d'approvisionnements en combustibles traditionnels, du fait d'embargos d'origine politique ou de la raréfaction des ressources, mais aussi pour réduire, autant que faire se peut, les dégradations graves et durables - sinon irréversibles - que l'usage de ces combustibles cause à notre environnement.

A ce constat s'ajoute celui du changement en cours de la répartition des besoins énergétiques entre pays riches et pays pauvres. Si depuis le début de l'ère industrielle ce sont les pays riches du « Nord » qui furent à la fois les plus importants consommateurs d'énergie et les plus gros pollueurs, demain ce seront les pays « du Sud », les plus pauvres, qui prendront le relais du fait de la conjonction de leur croissance démographique et de la demande d'amélioration des conditions de vie de leurs populations.

Or, c'est dans ces pays que la ressource ETM est la plus accessible !

Ne rien faire dans cette perspective c'est accepter d'être confronté à la fois à des modifications climatiques aux conséquences encore imprévisibles et à l'exacerbation des conflits pour l'appropriation des ressources énergétiques dites traditionnelles : fossiles et nucléaires.

Pour agir, les voies sont multiples :

- économiser l'énergie,
- produire en polluant moins,
- exploiter des ressources nouvelles, propres et renouvelables.

Pour suivre cette troisième voie la ressource ETM, parce qu'elle est abondante, stable et renouvelable, offre un potentiel de production accessible à tous et commensurable avec nos besoins.

Au Club des Argonautes, un club de réflexion sur le rôle de l'Océan dans la genèse des climats de la Terre et sur la résolution des problèmes posés par le réchauffement climatique, nous partageons la conviction que les hommes embarqués sur le vaisseau Terre ont, aujourd'hui, les

moyens d'en comprendre le fonctionnement et qu'ils doivent apprendre à le piloter de façon à permettre le développement harmonieux des générations à venir. « Savoir-Terre pour Savoir-Vivre » est l'objet de la « Géonautique » et nous sommes tous des apprentis Géonotes. Apprendre à exploiter l'énergie solaire en général et l'ETM en particulier fait partie de cet apprentissage.

.....  MICHEL GAUTIER\*

<http://www.clubdesargonautes.org>.

*(\*) Michel Gauthier, après avoir obtenu son diplôme d'Ingénieur des Arts et Métiers et un « Master of Sciences » aux Etats Unis d'Amérique, a exercé une carrière d'ingénieur dans plusieurs entreprises ou organismes français et internationaux tels que Euratom, l'INSTN de Saclay, le Centre National d'Études Spatiales (CNES) et l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer). Il a publié de nombreux articles dans de nombreuses revues scientifiques, françaises et étrangères.*

*Aujourd'hui à la retraite, il est un membre très actif du Club des Argonautes, [www.clubdesargonautes.org](http://www.clubdesargonautes.org)*

*Très préoccupé, comme beaucoup d'entre nous, du devenir du vaisseau qui nous porte tous, la Terre, il essaye de promouvoir l'utilisation de l'énergie renouvelable que l'on peut obtenir en utilisant la différence de température qui existe dans les océans tropicaux entre l'eau de surface et celle de profondeurs.*

*Il a accepté d'écrire cet article qui explique comment pourrait être obtenue et utilisée cette énergie, une des façons efficaces de lutter contre le changement de climat. Je tenais à le remercier pour sa contribution à notre revue.*

.....  JEAN LABROUSSE