

L'énergie thermique des mers, une énergie renouvelable oubliée mais pleine d'avenir...

Michel Gauthier

Ingénieur retraité de l'IFREMER, membre du Club des argonautes

L'énergie thermique des mers 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 XIX^e 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*¹. 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 turbomachine à vapeur qui fait appel à des technologies déjà bien connues et adaptées à son industrialisation. Il fonctionne suivant un cycle de Rankine². Arsène 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

¹ « A Sea Change »; Nature Vol 439 - 19 January 2006.

² En 1859, William Rankine publie un mémoire sur les machines à vapeur : « *Manual of the steam engine and other prime movers* ». Il y propose le cycle qui porte son nom. Le cycle de Rankine est le cycle des transformations thermodynamiques successives réelles au sein d'une machine thermique alors que le cycle de Carnot est un cycle idéal. Le processus comprend la vaporisation de l'eau, la détente de la vapeur dans la turbine et sa condensation dans un condenseur. NDR

à l'équateur, le fond de la mer est à 4° centigrade³... »⁴. Mais c'est avec Georges 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 son éducation 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. 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.

Avec Paul Boucherot, un ancien camarade d'étude, il imagine d'utiliser une enceinte maintenue à une pression suffisamment basse - quelques milliers de Pascals⁵ - 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, Georges Claude présente leur invention à ses pairs de l'Académie et en montre la faisabilité de principe par une expérience qu'il relate ainsi dans ses mémoires : « Pendant quelques instants, l'électricité produite par ce joujou n'allumait que trois lampes miniatures faisant en tout 3 watts... »⁶ 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 fonctionne à Ougrée⁷, 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.

Georges 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 à 700 mètres sera seulement de 11° C. C'est de l'avis même de Georges Claude une « énorme tâche que de 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

³ En fait, il se trompait... Les bathythermographies montrent que l'eau des abysses est beaucoup plus froide, plus proche de 2° C que de 4° C et atteint parfois des valeurs négatives que la salinité autorisent à ce liquide que l'on appelle eau de mer. NDR

⁴ « L'utilisation des forces naturelles », Revue scientifique, 17 Septembre 1881. D'après J.M. Meurville « Histoire et politique française en matière d'énergie thermique de mers » ; DEA CNAM -1995.

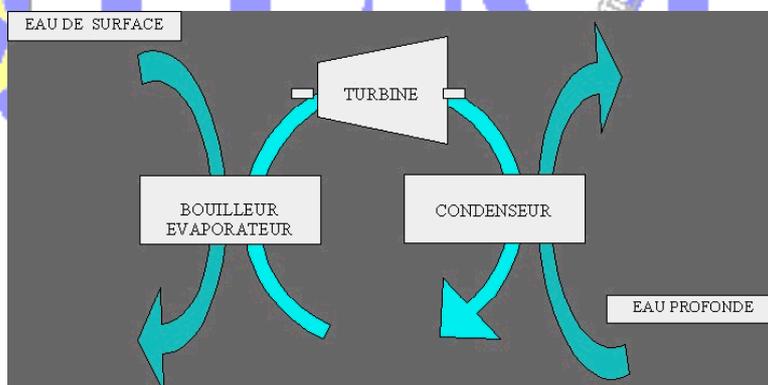
⁵ Le Pascal est l'unité légale de pression : il est 100 000 fois plus petit que l'ancien « bar » (1 bar est à peu près la pression atmosphérique). Les pressions de vapeur d'eau de l'ETM « cycle ouvert » sont de quelques dizaines de millièmes de bar (mb) soit quelques milliers de Pascals.

⁶ G.Claude : « Ma vie et mes inventions », chap.12, L'énergie thermique des mers ; Plon 1957, page 133.

⁷ Il s'agit de l'expérience d'Ougrée, en Belgique. L'eau chaude provenait du circuit de refroidissement d'un haut-fourneau et l'eau froide était pompée dans la Meuse.

« 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 stations de l'avenir pourront produire plus de 600 kW nets par mètre cube d'eau froide par seconde »⁸.

Reste alors à Georges 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 dollars US par 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, Georges 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 petite 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 ». Georges 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. 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

⁸ G.Claude : « Ma vie et mes inventions », chap. 12, L'énergie thermique des mers ; Plon 1957, page 144. Dans un article publié dans la revue américaine Mechanical Engineering vol 52 n° 12 de décembre 1930, il estimait possible une production de seulement 240 kW nets par mètre cube d'eau avec une différence de température de 24° C. La valeur de 600 kW donnée en 1957 infère probablement de multiples améliorations techniques que G. Claude avait imaginées entre temps pour améliorer le rendement de son procédé.

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 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

L'ETM : des années 1960 à 1986

Aux États-Unis, James Hilbert Anderson, en 1963, anticipant avec raison les difficultés techniques pour réaliser les turbines de grande puissance des usines ETM selon le procédé de Georges Claude propose de l'abandonner et d'utiliser non plus l'eau mais un autre fluide : le propane, comme fluide de travail⁹. On retiendra de ces travaux les noms d'ETM en «cycle ouvert» pour le procédé Georges 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 États-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'Hawaii - et les essais en mer de la première centrale flottante ETM en cycle fermé « Mini-OTEC¹⁰ ». 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 États-Unis, 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 MW¹¹. Outre l'expérience acquise sur les échangeurs, 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 Jimmy Carter. En 1980, le Congrès vote la *Public Law 96-310* qui programme la construction par les États-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 de centrales ETM de 10 000 MW en 1999 !

⁹ James Hilbert Anderson propose le propane. Aux températures disponibles avec l'ETM, la pression de vapeur saturante du propane est plusieurs centaines de fois supérieure à celle de l'eau et pour une puissance donnée les dimensions d'une turbine à vapeur d'eau de type G. Claude sont plus proches de celles d'une éolienne que de celles d'une turbine à vapeur de propane de même puissance ! Pour des raisons de sécurité - ou de protection de l'environnement - le choix de l'ammoniac semble préféré à celui du propane - ou du fréon - dans les projets modernes.

¹⁰ OTEC : *Ocean Thermal Energy Conversion*, l'équivalent en anglais d'ETM.

¹¹ La technologie des turbines à ammoniac est bien connue et il s'agissait surtout de tester des échangeurs. La puissance thermique disponible de 35 MW aurait pu fournir 1 MW d'électricité, mais par souci d'économie, OTEC-1 n'était pas équipé de turboalternateur.

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 Ronald 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'offre¹² 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 États-Unis 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 États-Unis 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 ingéniés 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 que cette politique de valorisation, baptisée

¹² Rappelons pour l'Histoire que le groupe industriel créé en France pour la réalisation d'une centrale ETM à Papeete avait répondu à cet appel d'offre. Ergocean rassemblait les compétences des firmes Alstom, SPIE-Batignoles, CG-Doris, Framatome, Jeumont-Schneider, SGE-BTP et SGTE.

DOWA pour *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 Georges 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 !

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 États-Unis 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 co-opération 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. Elle serait en cours d'essai, mouillée quelque part au sud du continent indien.

Depuis près de vingt ans, les États-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 taille modeste, jusqu'à quelques dizaines de MW. Ce concept d'usine qui permet de valoriser les autres

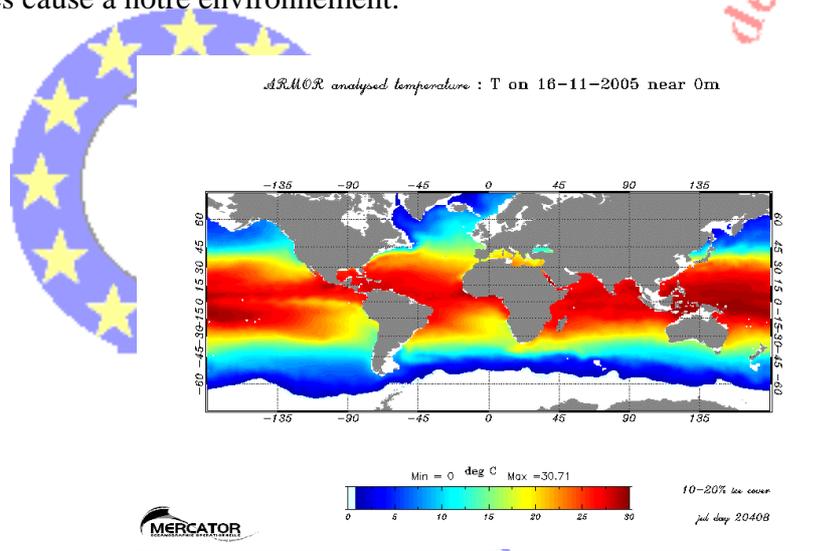
utilisations des eaux froides profondes pour le conditionnement d'air, la production d'eau douce et de produits aquacoles entre autres, est plus particulièrement adapté aux besoins de petites communautés littorales isolées proches de la ressource.

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.

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.



À 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 « géonautique¹³ » et nous sommes tous des apprentis géonautes. Apprendre à exploiter l'énergie solaire en général et l'ETM en particulier fait partie de cet apprentissage.



¹³ La Géonautique est un concept développé par le Club des Argonautes. Voir <http://www.clubdesargonautes.org>, rubrique « Géonautique. Nous sommes tous des Géonautes ». NDA Nous laissons à l'auteur la responsabilité de l'usage des néologismes *savoir-terre* et *géonaute*. NDR