

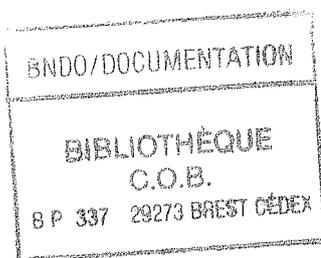
1828 T  
Jouy

11 36  
DAM  
P

TDI/CCTRME/82-31/GD-PV

PRODUCTION D'ÉNERGIE À PARTIR DE LA HOULE

BILAN PROVISOIRE APRÈS 2 ANS DE  
DÉROULEMENT DU PROGRAMME



Mars 1982

SOMMAIRE

- I. Historique du programme houle
  - II. Evaluation du potentiel sur la façade atlantique
  - III. Evolution des projets étrangers
    - III.1. Dispositifs à colonne oscillante et conversion hydro-pneumatique
    - III.2. Systèmes "redresseur"
    - III.3. Systèmes mécaniques
  - IV. Etudes effectuées en France
    - IV.1. Projets UIE
    - IV.2. Travaux effectués en collaboration avec l'ENSM
    - IV.3. Autres travaux français
  - V. Quel rendement peut-on espérer ?
  - VI. Perspectives houlomotrices pour les pays industrialisés
  - VII. Perspectives houlomotrices en région isolée
- CONCLUSION.
- REFERENCES.
- ANNEXE : Barrage ou atténuateur ?

## /I. HISTORIQUE DU PROGRAMME HOULE /

Le réajustement brutal des cours des produits pétroliers a provoqué vers la fin des années 70 une prise de conscience de l'opinion de la vulnérabilité et des limites de nos ressources énergétiques fossiles ainsi qu'un regain d'intérêt pour les énergies renouvelables.

Alors que dès 1972 le CNEXO avait réouvert le dossier Energie Thermique des Mers, aucune action n'avait été entreprise sur l'énergie de la houle. C'est dans ce contexte, et compte tenu des efforts de R&D entrepris à l'étranger, et notamment en Grande-Bretagne dans le domaine des "Houlomotrices", qu'il fut jugé nécessaire d'ajouter, fin 1978, ce thème de recherche aux programmes du CNEXO.

Au début de 1979, MM. GAUTHIER et MARTINAIS présentaient un rapport dans lequel ils analysaient les caractéristiques essentielles des vagues en tant que source d'énergie, faisaient le point des efforts accomplis dans le monde et proposaient une ligne d'action dont nous pouvons rappeler les points essentiels :

- 1) Compte tenu des options prises concernant la satisfaction des besoins énergétiques français, il ne semble pas raisonnable de lancer un programme dont l'objectif serait une contribution significative de l'énergie des vagues au bilan énergétique du pays.
- 2) Le développement de petits dispositifs produisant quelques dizaines de Watts pour alimenter une bouée de mesure ou de signalisation présenterait un certain intérêt s'ils permettaient une réduction effective des coûts de maintenance. Les initiatives dans ce domaine seront plutôt laissées aux utilisateurs (ou aux fournisseurs) concernés.
- 3) Un créneau intéressant pourrait exister pour des unités de quelques centaines de kW à quelques MW, destinée à des communautés isolées ne disposant essentiellement que du diesel-électrique pour couvrir

leur besoin en électricité. Dans un site propice (houle régulière) et dans un contexte économique favorable, l'énergie de la houle pourrait se révéler compétitive.

- 4) La première tâche à effectuer dans une étude de faisabilité d'installation houlomotrice est l'évaluation de la ressource potentielle sur le site envisagé. Les sites correspondant au créneau d'application défini au point 3 n'offrent en général qu'un faible soutien logistique. Il est alors préférable d'utiliser des bouées houlographes dont les mesures peuvent être collectées par satellite plutôt que par une station de réception à terre. A titre de rodage et de démonstration de cette méthodologie, il a été proposé de mettre en place un tel réseau de bouées sur la façade Atlantique. En outre, cette opération présente évidemment l'intérêt de procurer des données objectives pour justifier l'orientation indiquée au point 1.
- 5) Sur le plan technologique, les houlomotrices submergées, bien qu'elles puissent paraître a priori plus futuristes, semblent mériter un effort de recherche particulier pour certains avantages qu'elles présentent par rapport aux systèmes flottants. A l'opposé, les projets qui présentent le plus de "maturité technologique" concernent des installations côtières fixes type "Ile Maurice".
- 6) Pour l'évaluation des rendements de houlomotrices, le C.O.B. recherchera un partenaire disposant de moyens d'essais sur houle et d'une équipe spécialisée dans ce type d'essais en modèle réduit. Ils mettront au point ensemble une méthode expérimentale à laquelle seront soumis quelques dispositifs retenus pour une première phase d'étude.
- 7) "Veille Technologique" : d'autres pays, le Royaume Uni en particulier, consacrent un effort de recherche beaucoup plus important que celui envisagé en France, sur ce sujet ; il est indispensable de se maintenir au courant de ce qui est fait dans ces pays (et éventuellement de déceler des points de coopération).

- 8) Le développement de houlomotrices posera des problèmes technologiques nouveaux, en particulier au niveau de la longévité de certains composants (ancrages, articulations, etc...). Parallèlement aux actions portant directement sur les capteurs d'énergie, il est souhaitable de mener des actions de support technologique au département COB/TDI.

\*\*\*\*\*

Un programme défini à partir de ces recommandations a effectivement débuté dans la deuxième moitié de l'année 1979. Seul le point 8 "Actions technologiques de soutien" n'a pas été suivi faute de moyens. En ce qui concerne les actions du point 4 "Evaluation de la Ressource" et compte tenu du temps nécessaire à la préparation d'une telle opération, des bouées de mesure de houle ont été mouillées à partir de Septembre 1980 sur notre façade Atlantique. L'objectif d'un an de mesure ayant été atteint, il nous est apparu intéressant, à cette occasion, de dresser le bilan de ce programme après environ 2 ans de travaux.

Afin de ne pas alourdir la rédaction de ce rapport, la plupart des informations contenues dans la version 81 du document "Production d'Energie à partir de la Houle", réf.(1) en particulier la description des différents types de houlomotrices sont supposées connues.

## /II. EVALUATION DU POTENTIEL SUR LA FACADE ATLANTIQUE/

L'objectif d'un an de mesure étant atteint (et même dépassé), l'expérience sera terminée lorsque les bouées actuellement en place cesseront de fonctionner, leur maintenance n'étant plus assurée. Des résultats provisoires sont toutefois présentés dans le rapport de M. OLLITRAULT DEOC.(2).

Le rapport GAUTHIER-MARTINAIS proposait de mouiller les bouées à la côte de -300 m, donc très au large vu les dimensions du plateau continental : la comparaison de ces mesures avec celles relevées par certaines stations des Phares et Balises aurait permis d'étudier la propagation et l'amortissement des houles longues sur le plateau continental. D'autre part, le mouillage risquait moins d'être dragué par un pêcheur. Cependant, la fiabilité des bouées étant encore douteuse, il est apparu préférable de les mouiller par 35 m de profondeur en moyenne en des sites accessibles par le N/O "Thalia" ou par des baliseurs.

Nous pouvons également mentionner dans ce chapitre les résultats enregistrés par les Britanniques. C'est en effet le Royaume Uni qui a entrepris l'effort le plus systématique pour évaluer son potentiel houlomoteur. Ses côtes disposant de fetchs importants, reçoivent plus de 35 kW par mètre de côte en moyenne. Sur les îles Hébrides extérieures, cette puissance moyenne atteint 44 kW/m (par un peu plus de 40 m de profondeur);

## LE TRI DES PROJETS BRITANNIQUES

Pour effectuer ce tri, un des critères dont disposeraient les Britanniques était basé sur une méthodologie d'évaluation des coûts applicables à tous les dispositifs. A partir du schéma de principe ou de la maquette testée en bassin, des bureaux d'études élaborent un "dessin de référence", qui doit faire appel à des technologies actuelles. Ces dessins sont ensuite soumis à des groupes industriels qui évaluent ce coût de construction dans l'hypothèse suivante : aménagement prévu 2GW (par exemple 1000 unités de puissance moyenne 2MW), puissance maximale fixée à 2,5 fois la puissance moyenne. L'amortissement du coût de l'investissement sur la durée de vie escomptée et l'évaluation des coûts de maintenance permet de calculer un prix de revient du kWh.

Se trouvent éliminés du programme tous les dispositifs qui ne parviennent pas à un coût inférieur à 15 pence/kWh et pour lesquels aucun progrès technologique ne semble susceptible de faire rentrer le coût dans la limite admise.

Les coûts ne sont toutefois pas estimés avec une fiabilité suffisante pour servir de base à une comparaison entre dispositifs. Cet exercice a pour objectif principal de cerner pour chaque projet quels sont les postes les plus importants, sur lesquels doivent porter les efforts d'études.

### III. EVOLUTION DES PROJETS ETRANGERS

Le nombre de brevets déposés sur l'énergie des vagues dépasserait le millier ! Si une grande majorité d'entre-eux se révèlent irréalistes ou faisables mais inutilement compliqués, au premier examen, il en reste un grand nombre dont on ne peut évaluer l'intérêt qu'au prix de quelques études (expérimentale, numérique ou économique).

C'est ainsi qu'en 1978, une dizaine de dispositifs étaient étudiés au Royaume Uni : 4 projets soutenus par le Department of Energy et environ 6 challengers. En 1981, ce D.o.E. avait choisi de regrouper ses efforts sur 3 dispositifs et encore ceux-ci avaient-ils considérablement évolué.

Il est évident que le bilan de la "décantation" qui s'est opérée parmi les projets britanniques peut nous aider à évaluer les projets qui nous sont soumis ainsi qu'à éviter de nous engager dans des voies reconnues peu prometteuses.

Ce qui suit peut être considéré comme une mise à jour du rapport "Houle" 1981 (réf.(1)). Nous avons adopté, pour la commodité de l'exposé, une classification en 3 catégories. Nous allons suivre à nouveau ce plan pour examiner quelles solutions semblent aujourd'hui à éliminer ou à recommander.

#### III.1. Dispositifs à colonne oscillante et conversion pneumatique

- *Projet japonais KAIMEI* : L'origine du projet KAIMEI remonte à 1976 au Japan Marine Science and Technology Center. Le projet est devenu international en 1978, dans le cadre de l'I.E.A. (International Energy Association) dont la France ne fait pas partie. En 1979 et 1980, deux campagnes d'essais se sont déroulées : La première, avec un équipement partiel en turbines à air, alors que lors de la seconde toutes les chambres étaient coiffées de turboalternateurs. Le KAIMEI constituait une sorte de banc d'essai pour divers types de turbines.

La largeur de capture relevée (5% en moyenne, 10% au maximum) s'est révélée beaucoup plus faible que ne laissaient prévoir les essais en modèle réduit. Cette contre-performance serait en partie due à un mauvais comportement marin et plus précisément à une mauvaise répartition de la flottabilité, et à des diamètres de tuyères mal adaptées.

Le JAMSTEC tente actuellement de lancer un projet KAIMEI n° 2 tenant évidemment compte des défauts constatés sur le premier. Le rendement pourrait également se trouver amélioré en disposant les ouvertures de la coque sur les côtés plutôt que sur le fond.

*- Projet britannique du National Engineering Laboratory.*

Ce projet, toujours retenu par le D.o.E. a considérablement évolué afin de diminuer le coût de la structure.

Système initialement flottant, dont la stabilité était essentiellement liée à l'inertie, le projet du N.E.L. a évolué vers un système fixe posé sur le fond. La perte d'énergie disponible en passant de 50 m de profondeur à 20 m environ, seraient largement compensée par la réduction des dimensions et du poids de la structure. Les publications les plus récentes affirment que l'objectif de 5 pence/kWh serait désormais accessible (dans les conditions NW du Royaume Uni).

*- Le projet de cloche hydropneumatique de l'Université de*

*Belfast n'est pas retenu ; ce laboratoire se consacre surtout au développement de la turbine à air réversible dite "Well's turbine". Les travaux portent notamment sur la recherche d'un bon compromis entre un couple au démarrage important et un rendement élevé.*

*- Le système à sacs flexibles de l'Université de Lancaster*

est également retenu par le D.o.E. ; le développement technologique de ce projet est confié à la Société Wavepower Ltd qui travaillait auparavant essentiellement sur les radeaux de Cockrell. La géométrie du système a légèrement évolué (sacs flexibles latéraux). Le gros problème technologique reste toutefois la longévité des enveloppes flexibles.

- Les systèmes hydropneumatiques submergés continuent à être étudiés par la Société Vickers, semble-t-il sur fonds propres. Les recherches visent là aussi à diminuer le volume et le coût de construction de la structure. Le schéma de capteur omnidirectionnel, à colonne oscillante annulaire a évolué vers un système linéaire, constructible sous forme de modules mis bout à bout. Le système existe en version "attenuator" et en version "terminator". Ce point est discuté en annexe 1.

### III.2. Système "redresseurs"

- Le projet de la *Hydraulic Research Station* (Russel's rectifier) n'a pas été retenu dans le programme britannique. Les travaux de Génie Civil mettent en jeu des volumes très importants : l'investissement est trop lourd pour que le kWh puisse être produit à un prix acceptable (estimation de 1978 : 58 pence de kWh).

- En revanche, une société d'ingénieurs conseils, *Gibb and Partners*, continue à promouvoir un système plus simple, à rampe de déferlement.

Le dossier d'aménagement de l'île Maurice, réactualisé en 1978, fait l'objet d'une demande de financement auprès de la C.E.E..

Une installation de démonstration de faible puissance est en cours de construction aux Fidji.

Une étude prospective sur les possibilités d'application à la Barbade a été réalisée à la demande du gouvernement de cette île.

- Aux Etats-Unis, *Lockheed* ne semble pas avoir poursuivi d'études très actives sur son projet de Dam-Atoll. Dans leur souci de soumettre également des projets étrangers à leur méthodologie d'évaluation, les Britanniques ont effectué quelques travaux sur ce dispositif : il semblerait qu'après optimisation, la largeur de capture actuelle de 0,1 pourrait atteindre 0,35 (voire même 0,4 d'après Lockheed). Dans ce cas, le Dam-Atoll rentrerait dans la catégorie des systèmes prometteurs, selon les critères britanniques.

- *Les Norvégiens* travaillent également sur un projet de "redresseur" associé à des ouvrages de focalisation. Sa célérité dépendant de la profondeur, la houle a tendance à converger au passage d'un haut-fond. Ce principe peut conduire à la réalisation d'une véritable lentille formée de hauts-fonds artificiels. Toutefois, l'effet de la profondeur sur la célérité - et donc sur la "distance focale de la lentille" - dépend de la période. Dans la mer réelle, l'énergie des vagues est répartie sur une gamme continue de périodes: au lieu d'obtenir un point focal, on obtient donc un chenal dans lequel la hauteur des vagues est amplifiée.

Le procédé norvégien consiste à matérialiser par des murs, les côtés de ce chenal : les vagues amplifiées font déborder l'eau de chaque côté et remplissent un bassin dans lequel l'eau présente une certaine hauteur de chute par rapport à la mer. Le rendement est accru en utilisant un canal convergent. Toutefois, nous n'avons pas encore d'informations sur les perspectives économiques de cette solution. De toute manière, ce système suppose que la direction prédominante de la houle soit très stable.

### III.3. Systèmes "mécaniques"

Aucun projet de système mécanique de surface n'a été retenu dans le programme officiel britannique. La société WAVEPOWER Ltd, qui travaillait sur les radeaux de Cockerell, s'intéresse aujourd'hui à un système hydropneumatique.

*Le Royal Military College of Science* a abandonné le système "triplaque", pour un projet qui rappelle les premières idées de Sir Cockerell (chaîne de pontons) et qui ne semble guère plus retenir l'attention du D.o.e.

Enfin, *les "Canards" de Salter*, bien qu'hydrodynamiquement très efficaces, butent sur un problème technologique : l'absence d'une référence quasi-fixe pour récupérer de l'énergie. Ni la solution de l'épine dorsale, ni celle utilisant des gyroscopes ne paraissent satisfaisantes.

Par contre, les cylindres submergés de l' *Université de BRISTOL* sont retenus dans le programme du D.o.E. Dans l'évaluation qui en a été faite, s'ils n'apparaissent pas comme les plus compétitifs au plan économique, ils sont cependant crédités du meilleur rendement.

En Norvège, les travaux de *BUDAL & FALNES* portent sur des "absorbeurs ponctuels" - donc des capteurs omnidirectionnels - avec l'objectif de maximiser la puissance recueillie par unité de volume du flotteur. Le dispositif étudié est une bouée conique, coulissant autour d'un pieu et muni d'un système de "contrôle de phase" : il s'agit d'immobiliser le flotteur lorsque la résultante des forces de pression serait de sens opposé à son mouvement et qu'il restituerait de l'énergie au milieu. C'est un principe qui pourrait d'ailleurs être transposé à d'autres dispositifs. Toutefois il est probable que le gain soit moins important en mer réelle que sur houle monochromatique.

On aura noté que, dans cette partie, nous nous sommes limités au Royaume Uni, au Japon et à la Norvège et aux USA : ce sont les seuls pays, à notre connaissance, qui entretiennent des recherches importantes ou originales sur ce sujet.

#### IV. ETUDES EFFECTUEES EN FRANCE/

De fin 1979 à début 1982, les travaux effectués sous l'égide du CNEXO ont porté :

- sur l'évaluation de projets proposés par la Société UIE,
- sur des recherches plus fondamentales en collaboration avec le Laboratoire d'Hydrodynamique Navale de l'ENSM de Nantes

##### IV.1. Projets UIE

La Société UIE proposait initialement, en 1979, d'étudier un dispositif hydropneumatique, présentant certaines améliorations par rapport au système japonais KAIMEI. Cette société offrait en outre une contribution financière importante, sous forme d'apport en nature pour la conception et la réalisation de maquette (= une équipe de 3 personnes). Une collaboration s'est donc instaurée entre le CNEXO et l'UIE, bien que la démarche proposée par cet industriel se soit révélée trop purement expérimentale : 3 séries d'essais en bassin de houle ont été réalisées de fin 1979 à début 1982, pris en charge par le CNEXO.

Pour la première, le CNEXO a obtenu une aide à l'Innovation de la DIT et fait réaliser des essais au Bassin des Carènes de Paris. Deux types de dispositifs ont été testés : hydropneumatique, et "redresseur" sur support flottant, voir (1) et (8).

A la suite de ces premiers essais, l'UIE a choisi de se consacrer uniquement au système flottant type "redresseur" (ou à déferlement).

La deuxième série d'essais effectuée à l'ENSM de Nantes fin 1980, a surtout permis d'éliminer le concept du support flottant semi-submersible qui n'offre pas suffisamment de "réserve de flottabilité" et rend le réglage de l'engin très pointu. D'autre part le système de mesure imaginé par l'UIE n'a pas donné entière satisfaction.

Pour la troisième série d'essais effectuée au début de 1982, l'architecture navale du support a bénéficié des expériences précédentes : la flottabilité est procurée par 6 grosses colonnes verticales traversant la surface libre, le réservoir de recueil est implanté au centre. L'acquisition et le dépouillement des mesures sont en cours à l'ENSM.

#### IV.2. Travaux effectués en collaboration avec l'ENSM (réf.(6) et (7))

Un récapitulatif des actions effectuées ou en cours avec l'ENSM est donné en annexe 2.

Lorsque les premiers contacts ont été pris avec ce laboratoire pour élaborer un programme de recherche, nous avons prévu de l'orienter vers les systèmes submergés. Ces derniers nous semblent intéressants parce que :

- a) en immersion, ils trouvent des conditions moins hostiles qu'en surface (impact de déferlantes, corrosion plus forte à l'interface)
- b) ils pourraient être mieux compatibles avec le maintien d'autres activités (tourisme, plaisance).

\* *Le premier contrat* portait sur l'étude d'un houlomoteur immergé linéaire. Un profil d'aile immergé peut dans certaines conditions subir de la houle une force propulsive constante lorsqu'il se déplace avec une vitesse égale à la célérité de la houle. La théorie a été parfaitement vérifiée par une expérience en bidimensionnel en bassin de houle. Une seconde expérience, effectuée à plus petite échelle (trop petite ?) en tridimensionnel a montré qu'un profil submergé pourrait sinon propulser, du moins compenser par la force qu'il subit la résistance à l'avancement d'un catamaran.

La conception d'une houlomotrice reprenant ce principe ferait probablement appel à des mécaniques lourdes et complexes, nous avons donc préféré ne pas approfondir cette voie par la suite.

Une solution élégante, (qui a fait l'objet de brevet aux USA) pourrait consister à utiliser une structure hélicoïdale, dont la rotation équivaut pour un fluide parfait à une translation. La longueur optimum de dispositif doit être un peu supérieure à la longueur d'onde de la houle. Il faudrait réaliser une poutre fine, longue et cependant capable d'encaisser les efforts de flexion dus à la houle : le problème mécanique est remplacé par un problème de résistance des matériaux.

\* *Le second contrat* avait pour principal objectif le développement (ou plus exactement l'adaptation) et le rodage de modèles numériques permettant de prévoir les performances sur houle régulière de houlomotrices utilisant des corps flottants ou submergés, bi ou tridimensionnels.

Les résultats théoriques en bi-dimensionnel montrent qu'un corps submergé peut atteindre un rendement de 100% : une houlomotrice submergée n'est donc théoriquement pas pénalisée par rapport à un engin de surface bien que l'amplitude des mouvements orbitaux décroisse avec la profondeur.

En bi-dimensionnel, un corps possède 3 degrés de liberté : pilonnement, embardée + 1 rotation (roulis). Un rendement de 100% peut être atteint en utilisant deux composantes du mouvement (par exemple : rotation et pilonnement) et en laissant la 3ème composante libre.

Mais surtout les systèmes submergés présentent un avantage en ce qui concerne les possibilités de réglage. Les systèmes oscillants présentent leur rendement optimum lorsqu'ils sont accordés, c'est-à-dire quand leur période propre en roulis ou en pilonnement est égale à celle de la houle. Pour un système flottant, la période propre dépend des coefficients d'inertie et, les forces de rappel étant des forces de flottaison, de la géométrie du flotteur.

Pour un flotteur submergé, les forces de flottaison sont constantes, les périodes ne dépendent que des raideurs de l'ancrage tendu. On conçoit que ce paramètre puisse être réglé - ne serait-ce que de manière discrète - pour adapter le dispositif à la période moyenne d'une mer donnée.

Cet avantage peut également être obtenu sur un système flottant en lui ajoutant un ancrage tendu. Sa position ne dépend plus du seul équilibre du poids et de la poussée ; aussi parle-t-on alors de flotteur non-Archimédien. Mais un ancrage tendu serait sollicité de manière beaucoup plus brutale par un flotteur de surface que par un corps immergé.

Remarquons enfin que la possibilité d'accorder en permanence le dispositif à la période sur laquelle est centrée l'énergie explique sans doute pourquoi le système à cylindres submergés est crédité du meilleur rendement, en moyenne sur l'année, de tous les projets britanniques.

#### IV.3. Autres travaux français

Parmi les travaux français récents, citons également, bien que le CNEXO n'ait pu s'y associer, faute de moyens financiers suffisants, les recherches effectuées par BERTIN : Cette société a étudié, sur financement C.E.E., un amortisseur passif submergé (du type attenuator). Il s'agit d'un caisson allongé muni de clapets qui permet de dissiper de l'énergie. A partir de ce système, BERTIN a conçu une houlomotrice hydropneumatique submergée (voir(1)), très proche dans son principe de l'atténuateur VICKERS : la différence réside surtout dans la forme de la structure, les colonnes d'eau oscillantes étant en U dans le système VICKERS.

V. QUEL RENDEMENT PEUT-ON ESPERER ?

Au cours des paragraphes précédents, nous avons tenté de donner les raisons techniques ou économiques pour lesquelles les recherches ont été abandonnées ou, au contraire, intensifiées sur les différents projets de houlomotrices. Toutefois, quand bien même une filière semblerait présenter de grands avantages sur ses rivales, la diversité des sites que l'on peut songer à équiper, justifierait que l'on continue à développer différents types d'installations.

Mais pour un site identifié, et une fois son potentiel houlomoteur évalué, avant de choisir un type de dispositif et de concevoir un projet de centrale houlomotrice, il faut se poser les questions suivantes .

- Quelle part du potentiel énergétique pourra-t-on effectivement récupérer, et en fonction de son coût, quelle utilisation pourra-t-on en faire ?

Ceci nous amène à étudier quelle évaluation nous pouvons faire aujourd'hui du rendement global de la chaîne de conversion.

Dressons la liste des différents facteurs qui interviennent dans cette chaîne de conversion, en indiquant les fourchettes qu'il convient d'adopter d'après les publications anglaises :

- facteur de correction pour le site tenant compte du fait que les mesures ne sont pas nécessairement réalisées dans des conditions identiques à celles que rencontrera le dispositif, en particulier en ce qui concerne la profondeur et la distance à la côte. Fourchette adoptée 0,5-1,2.
- Facteur de directionnalité : les données de puissance disponible intègrent toutes les directions possibles de houle. Certains capteurs sont omnidirectionnels, d'autres au contraire doivent être orientés face à la houle dominante et leur rendement diminue vis à vis de l'énergie qui provient d'autres directions. Ce coefficient dépend donc à la fois des caractéristiques du capteur et de la régularité en direction de la houle sur le site. Fourchette adoptée : 0.65-1.

- Efficacité du capteur : le coefficient peut être déterminé à partir d'essais en bassin de houle en balayant toutes les périodes sur lesquelles se répartit l'énergie sur le site donné. Ce coefficient dépend aussi de la possibilité d'adapter le dispositif à des états de mer différents ou, s'il y a peu de réglage possible, du choix de la puissance nominale du dispositif vis à vis de la gamme d'états de mer possibles.  
C'est sur ce coefficient que la fourchette, telle qu'on peut l'évaluer aujourd'hui, est la plus large : 0.25-0.80.
  
- Rendement de la chaîne de transformation : le coefficient précédent caractérise essentiellement les caractéristiques hydrodynamiques du capteur. En aval, il faut encore transformer l'énergie recueillie en une forme d'énergie utilisable et la transporter vers les lieux d'utilisation ou le point d'injection à un réseau électrique. Il intervient là des pertes de charge hydraulique, des pertes en lignes électriques, des rendements de turbine, de générateur électrique, d'onduleur etc... Fourchette adoptée : 0.5-0.7.
  
- Enfin intervient un taux d'indisponibilité due aux pannes éventuelles et aux opérations de maintenance. Le coefficient correspondant pourrait se situer entre 0.7 et 0.95 selon le degré de complexité de la technologie employée.

Si l'on effectuait la multiplication brutale de ces coefficients, il apparaîtrait que le rendement global se situerait dans une fourchette très large : 3 à 60%. Ce serait oublier que ces facteurs sont en fait interactifs : par exemple, les systèmes fixes construits par faible profondeur reçoivent généralement moins d'énergie disponible qu'au large (facteur de correction pour le site faible). Mais en revanche l'éventail de direction d'où peut venir la houle est plus restreint, d'autant plus qu'elle a subi des réfractions tendant à rendre les lignes de crêtes parallèles aux courbes de niveau : le facteur de directionnalité peut donc être plus élevé qu'au large.

Il est donc préférable d'étudier pour chaque projet, les valeurs des coefficients qui semblent probables, puis d'en effectuer le produit - les rendements globaux obtenus pour les différents projets retenus se situent alors entre 10 et 23%.

S'agissant d'une source d'énergie gratuite, la notion de rendement n'a pas de lien direct avec la rentabilité économique : les projets les plus intéressants ne sont pas nécessairement ceux qui affichent le rendement le plus élevé. Mais il reste que pour obtenir une puissance donnée en un site fixé, plus le rendement est faible, plus les dimensions de la structure seront importantes.

Actuellement, nous proposons de retenir le chiffre raisonnablement optimiste, de 20% pour le rendement global.

/VI. PERSPECTIVES HOULOMOTRICES POUR LES PAYS INDUSTRIALISES/

Dans les conditions climatiques du N-W des Iles Britanniques, une centrale houlomotrice, fournissant une puissance moyenne de 1GW, donc significative par rapport aux besoins énergétiques d'un pays industrialisé nécessiterait l'équipement des côtes sur un peu plus de 100 Km.

Dans les conditions climatiques de la façade Atlantique française, il faudrait pour le même objectif équiper 500 km de côtes, soit en fait la totalité du gisement potentiel puisque l'équipement de l'entrée de la Manche serait probablement incompatible avec le trafic maritime dense dont elle est le siège. Un aménagement plus réduit, environ 100 km au large des côtes de Bretagne, permettrait de couvrir environ 15% des besoins actuels en énergie électrique de cette région.

Pour étudier comment l'énergie électrique produite à partir de la houle pourrait se situer par rapport aux moyens de production "classiques" d'un pays industrialisé, examinons leurs caractéristiques :

- *nucléaire* : coût du kWh (OF16, coût "officiel" au 1.1.81)  
part du combustible (y compris les opérations de traitement, enrichissement etc..) : 25% du coût de production.
- *hydraulique basse chute* : coût du kWh bas, part du combustible nulle;  
particularité : si la centrale ne fonctionne pas l'énergie est perdue.

Ces deux sources sont actuellement utilisées en base, c'est-à-dire qu'elles produisent constamment ce qui suppose que la puissance installée correspondante est inférieure au seuil minimum de la puissance demandée.

- *hydraulique de haute chute* : coût du kWh bas, part du combustible nulle. La présence d'un barrage et d'un lac de retenue permet de produire avec une forte puissance, quelques heures par jour, sans perte par rapport à un rythme de production régulier. L'installation peut aussi servir en pompage pour le stockage de l'énergie.

- *thermique fuel oil* : coût du kWh très élevé (OF55 au 1/1/81). Le combustible représente environ 85% du coût de production.

Ces deux formes de production sont caractérisées par une très grande disponibilité, c'est-à-dire la possibilité de fournir une forte puissance dans un délai très court, elles permettent de répondre aux pics de la demande très localisés dans le temps, sans que pour des raisons d'ailleurs différentes, le coût de production ne soit grevé par le mode de fonctionnement très discontinu (quelques heures par jour).

- *thermique charbon* : coût de revient du kWh (OF27) au 1/1/81) intermédiaire entre le nucléaire et le fuel oil - disponibilité moins bonne que fuel - part du combustible dans le coût : 60%.

En France, la production de base devant bientôt être entièrement assurée par le nucléaire et l'hydraulique basse chute, le charbon ne devrait plus à terme être utilisé qu'en semi-base (environ 4000 heures par an). En 1973, la France utilisait 4,5 fois plus de thermique fuel que de thermique-charbon ; en 1979 les parts étaient quasiment égales. A terme, le fuel-oil ne devrait plus être utilisé qu'en pointe.

- *énergie marémotrice* : avec une puissance installée de 240MW, la puissance moyenne fournie par l'usine de la Rance sur l'année est d'environ 70 MW. Compte tenu du mode de fonctionnement (double effet, possibilité de pompage) et de la modicité de cette puissance, cette centrale est rentable, c'est-à-dire que, globalement, l'énergie fournie devrait être produite par des moyens plus onéreux si elle n'existait pas.

Si la construction d'aménagements plus importants dans le golfe normano-breton s'avérait économiquement rentable et écologiquement acceptable, il s'agirait probablement d'une centrale de 2GW environ, fonctionnant avec deux bassins selon le cycle de Belidor : le rendement vis à vis de l'énergie marémotrice disponible n'est pas optimum mais la puissance disponible ne dépend quasiment pas des horaires de marée - l'énergie peut donc être utilisée au moment où elle est la plus précieuse, donc en pointe.

Nous allons maintenant tenter de caractériser, de la même manière

- *L'énergie houlomotrice* :

- \* elle est très chère : les estimations les plus optimistes la situe à environ 0F60 du kWh dans les conditions climatiques du N-W des îles britanniques. L'énergie disponible sur les côtes atlantiques françaises est 2 à 3 fois plus faible ; des conditions d'exploitation plus clémentes (vague de projet, la gamme de période dans laquelle se trouve continue l'énergie à récupérer), une puissance installée à prévoir plus faible se traduiraient-elles par des coûts de construction suffisamment réduits pour que l'estimation reste aussi optimiste dans le cas de nos côtes atlantiques ?
- \* le coût dépend uniquement des postes investissements et maintenance,
- \* la disponibilité est très médiocre : l'énergie disponible peut fluctuer dans de très grandes proportions et de manière peu prévisible: délai courant des prévisions météo (12 à 48 heures selon le type de situation)

L'irrégularité de cette ressource en exclut d'emblée l'utilisation en production de base.

En semi-base, tant que le thermique charbon occupe une grande place, l'énergie de la houle pourrait, lorsqu'elle est disponible, permettre d'économiser ce combustible fossile : l'énergie houlomotrice étant au moins deux fois plus chère, il faudrait que la nécessité de réduire nos dépenses extérieures dues aux importations de charbon soit bien plus vitale qu'aujourd'hui. Notons toutefois que la variation saisonnière de la puissance houlomotrice disponible coïnciderait assez bien avec celle de la demande.

En pointe, c'est-à-dire quelques heures par jour, les mois d'hiver, l'énergie de la houle pourrait permettre des économies de fuel oil. Cette utilisation est en fait peu intéressante car le coût du kWh donné ci-dessus suppose une utilisation à 100% de l'énergie produite par la centrale houlomotrice. Il faudrait donc utiliser des kWh

houle à des heures où il n'y a aucune raison de recourir à une énergie aussi chère.

L'utilisation en couplage avec une capacité de stockage hydraulique (réservoir + station de pompage) présenterait un intérêt si l'irrégularité de cette ressource était compensée par un faible coût de production, ce qui est loin d'être le cas.

Bien entendu, les conclusions seraient différentes s'il survenait à moyen terme, des difficultés de nature à remettre en cause le programme nucléaire français. Elles pourraient être également modifiées, à plus long terme, si après l'épuisement de ressources d'uranium aucune filière énergétique ne prenait le relais...

Le contexte énergétique britannique est assez différent : les ressources hydrauliques sont très faibles, l'équipement nucléaire, après un départ rapide, est aujourd'hui moins important qu'en France. Le charbon étant donné l'importance des réserves des gisements britanniques occupe une place importante dans les moyens de production de base. D'autre part, le potentiel houlomoteur est plus intéressant : l'énergie moyenne est environ 2 à 3 fois plus élevée qu'en France, et les périodes de calme sont sans doute plus rares. De plus, les défenseurs de cette énergie peuvent s'estimer encouragés par l'évolution des coûts estimés : les efforts de recherche et de tri des projets ont permis de ramener la fourchette de 20-50 pence par kWh à 5-15 pence. Il est cependant peu probable que d'autres progrès parviennent à rendre, dans des perspectives raisonnables, cette énergie compétitive par rapport au thermique-charbon. Ceci ne devrait donc pas conduire à des conclusions radicalement différentes. Seuls les risques évoqués précédemment peuvent justifier un effort de recherche à long terme, plus important que celui de la France. Vis à vis de ces risques, celle-ci peut en effet s'estimer dans une position privilégiée, parce qu'elle dispose de ressources importantes en uranium et d'une certaine avance technologique dans le domaine des surrégénérateurs.

## VII. PERSPECTIVES HOULOMOTRICES EN REGION ISOLEE

Dans le cas de la plupart des régions isolées, les conclusions du chapitre précédent seraient en revanche très différentes : la filière thermique diesel est le moyen le plus courant de production de l'électricité, en base comme en pointe. Seules quelques îles, hautes et suffisamment grandes, peuvent compter sur un appoint hydro-électrique.

L'énergie est donc chère (prix du kWh supérieur à 0F60). Lorsque, de plus, elle bénéficie d'un potentiel houlomoteur important, l'exploitation de celui-ci constitue une alternative qui vaut la peine d'être étudiée.

C'est le cas d'Ouessant, dont la position à la pointe de Bretagne lui procure une ressource sans doute supérieure à la moyenne de nos côtes atlantiques. C'est aussi le cas d'un grand nombre d'îles situées dans les régions d'alizés, parmi lesquelles la France possède plusieurs DOM-TOM. Ces îles ont en outre un avantage : la marée n'y est, généralement, pas amplifiée par des phénomènes d'interactions avec les masses continentales. Sa faible amplitude permet d'envisager, plus facilement qu'ailleurs, des installations côtières ou posées sur le fond.

Toutes ces remarques ne sont pas nouvelles : elles figuraient déjà dans le rapport (1) et nous ont incités à étudier plus en détail les possibilités de développement de houlomotrices dans les DOM-TOM : c'est l'objet d'un rapport (4), dont nous pouvons reprendre ici les conclusions.

Des centrales houlomotrices du type redresseur, à rampe de déferlement, nous semblent toujours une des voies les plus prometteuses.

Il y a toutefois peu de sites capables d'accueillir une installation dans la gamme 10-20 MW utilisant directement un lagon comme réservoir de recueil.

Une centrale dans la gamme 100 kW à 2 ou 3 MW, utilisant un réservoir de recueil artificiel pourrait convenir à une quinzaine de sites dans nos DOM.TOM : un "projet d'école" étudié au cours de l'été 81 par un étudiant de 3ème cycle (5), conduit à des résultats encourageants en ce qui concerne la faisabilité technique et économique d'un tel aménagement.

A une autre échelle, de petites unités utilisant directement l'énergie mécanique des vagues pour produire de l'eau douce par osmose inverse pourrait trouver une application dans une cinquantaine d'îles isolées ; c'est l'objet d'un projet proposé à l'ANVAR en collaboration ACB/CNEXO/ENSM.

\* \*  
\* \*

### CONCLUSION

Le bilan provisoire des recherches sur l'énergie des vagues que nous avons tenté de dresser, ne devrait pas remettre en question la ligne d'action définie en 1979 et que nous avons rappelée au début de ce rapport.

Il devrait surtout permettre, nous l'espérons, d'éclairer le choix de la priorité plus ou moins grande à accorder aux actions du CNEXO dans ce domaine. Toutefois quels que soient l'ampleur du programme qui sera poursuivi et le rythme auquel il pourra s'accomplir, il nous semble logique qu'il s'articule autour des axes suivants :

\* Etude du "gisement houlomoteur" : une opération d'évaluation de la ressource houlomotrice a été effectuée sur la façade atlantique française. La phase suivante devra comporter une opération similaire dans un site choisi en région isolée, de préférence, parmi nos DOM-TOM. Elle utilisera des bouées houlographes à transmission Argos de "seconde génération" (calculateur à microprocesseur) et, de préférence, directionnelle. Le prototype d'une telle bouée est en cours de fabrication.

\* Développements de filières technologiques. Dans le dernier chapitre, nous avons présenté deux types de dispositifs qui pourraient déboucher sur une réalisation à court ou moyen terme dans des régions isolées propices : les centrales type "redresseur" (à remplissage de bassin) et les petites unités associées au pompage d'eau de mer. Ces projets présentent suffisamment de maturité pour que l'on puisse définir un programme de développement sur environ 3 ans.

Parallèlement, il nous semble souhaitable de soutenir un effort de recherche à plus long terme sur des systèmes de production d'énergie (100 kW à 1 ou 2 MW), plus universels quant à leur adaptation à un site mais dont la faisabilité ou la rentabilité reste à démontrer. Nous pouvons cependant recommander d'organiser cet effort autour d'un système submergé dont l'ébauche correspond à la synthèse des

réflexions menées depuis deux ans avec le Laboratoire d'Hydrodynamique Navale de l'ENSM.

Enfin, si nous avons pu au cours de cette première phase, nous dispenser, faute de moyens, d'un effort de "soutien technologique", il ne serait pas cohérent de continuer à négliger cet aspect alors que, par exemple :

- \* Le développement des filières que nous avons retenues nécessitera la mise au point de composants identifiés dès aujourd'hui (turbine basse chute marine, pompe volumétrique à eau de mer, etc..)
- \* La faisabilité d'une opération de mesure de houle en une zone éloignée de tout soutien logistique important, dépend largement de la fiabilité d'un mouillage longue durée.

\*\*\*

## REFERENCES

- (1) Production d'énergie à partir de la houle,  
Version 81, G. DAMY & M. GAUTHIER, Février 1981.
- (2) Evaluation de la ressource énergétique des vagues sur la façade  
atlantique française, M. OLLITRAULT, à paraître.
- (3) Estimating the cost of power from sea waves,  
COJ Grove Palmer, Avril 1981.
- (4) Développements possibles de houlomotrices dans les DOM/TOM,  
G. DAMY, Août 1981.
- (5) Examen de différents systèmes de houlomotrices fixées - Avant-  
projet d'une mini-centrale sur la côte Est de Tahiti.  
M. SPIRIDAKIS, Septembre 1981.
- (6) Fonctionnement d'un houlomoteur linéaire synchrone.  
P. GUEVEL, J.P. CORDONNIER, ENSM, ATMA 1981.
- (7) Considérations sur le fonctionnement de houlomoteurs de type  
oscillant.  
P. GUEVEL, D. HONG, J. MARTI, G. DELHOMMEAU, ENSM, ATMA 1981.
- (8) Etude et expérimentation de systèmes houlomoteurs (essais au Bassin  
des Carènes de Paris des systèmes UIE), G. DAMY, Septembre 1980.

## ANNEXE 1

- BARRAGE ou ATTENUATEUR ? -

"Terminator" ou "Attenuator" : selon la terminologie adoptée par les Britanniques, les "terminators" se présentent comme des sortes de barrages continus disposés perpendiculairement à la direction de la houle dominante.

Les forces s'exercent donc en phase sur de grandes longueurs du dispositif : il en résulte des efforts d'ancrage très importants si le système est flottant. Les "attenuators" se présentent au contraire comme des unités isolées ou disposées selon un réseau assez lâche. Les expériences britanniques montrent que les meilleurs résultats sont obtenus en s'écartant du schéma pur d'attenuator ou de terminator.

Un terminator pur ne peut capter, au rendement de conversion près et par mètre de longueur, que l'énergie disponible dans cette unité de longueur : le fonctionnement est de caractère bidimensionnel. Si le barrage n'est plus continu mais formé d'unités espacées, chaque unité peut alors capter de l'énergie sur une longueur supérieure à sa longueur propre.

Ainsi un dispositif affichant un rendement de 40% en bi-dimensionnel pourrait atteindre par exemple un rendement de 50% (ou de manière plus correcte, un rapport de capture égal 0.5), ce qui permet d'augmenter le rapport énergie produite/volume de la structure. Ceci a été pris en compte, en particulier, dans l'optimisation du projet à cylindres submergés (Université de Bristol).

Le principe de l'attenuator est d'absorber progressivement l'énergie au cours de sa propagation sur un peu plus d'une longueur d'onde. Ce sont typiquement des structures allongées ancrées bout'aux vagues dominantes (KAIMEI japonais, système à sacs flexibles britanniques). Le rapport de capture peut dépasser 1 dans ces conditions

mais on constate que l'efficacité peut être augmentée en disposant la structure entre 40 et 50° de la direction de houle, tout en conservant des forces d'ancrage réduites par rapport à une disposition travers à la houle : la fourchette d'angle indiquée correspond au meilleur compromis constaté pour le système à sacs flexibles de Lancaster.

\*\*\*\*\*

2/ 1981 (contrat n° 80/6348) : études théoriques sur les houlomoteurs.

- développement de modèles numériques bi et tri-dimensionnels, calculs sur systèmes submergés,
- vérification par essais bi-dimensionnels des modèles mis au point,
- rodage d'une méthode de mesure de rendement tenant compte des ondes réfléchies par la maquette.

Contrat exécuté à environ 80%. Montant 109.000 F HT.

3/ 1982 : contrat en cours de négociation.

Les études, essentiellement expérimentales, porteront sur 2 thèmes :

- système à déferlement fixe : détermination des performances d'un système à plan incliné, amélioration possible par convergent (trièdre), efforts sur les structures,
- système submergé : le capteur, omnidirectionnel serait un cylindre court d'axe vertical qui produirait de l'énergie par action sur un ancrage en trois points. L'étude comporterait une partie numérique : optimisation du système sous contraintes (limite d'amplitude sur les mouvements) et une partie expérimentale.

Montant prévu : 250.000 F.

#### Contrat en collaboration tripartite

CNEXO-ENSM-ACB : dépôt d'un dossier ANVAR pour développer un dessaleur par osmose inverse mû par la houle. Le "Capteur" sera un flotteur sphérique immergé ; ne s'agissant pas d'une partie très importante du système, le flotteur ne fera pas l'objet d'une optimisation très poussée. L'ENSM interviendra essentiellement pour la part expérimentale. Montant engagé : 110.000 F HT.

CNEXO-ENSM-CFD : le projet soutenu par CFD n'a pas été retenu par le concours houle. Cependant, le principe d'oscillation de liquide dans une cuve pourrait constituer une variante intéressante pour transformer l'énergie captée par un caisson submergé. Nous en discuterons le 24 Février avec MM. GUEVEL, LATRON et SCARPI.

ANNEXE 2

RECAPITULATIF ACTIONS EFFECTUEES ou en COURS avec l'ENSM

Comme je te l'avais promis à NANTES quand nous assistions aux essais "Liataud", je t'ai préparé un récapitulatif des actions que nous avons effectuées ou qui sont en cours de négociation avec l'E.N.S.M.. Je distingue ici les contrats d'essais, financés par le CNEXO pour des tiers : VIE, Liataud, H et F, etc., des contrats de recherche dont le sujet est défini en commun par le CNEXO et l'ENSM. Administrativement il s'agit dans les deux cas de contrat type universitaire.

Contrats d'essais

- 1/ n° 80/6304 : essais du dispositif BIWI de VIE  
montant : 40.560 F H.T.  
analyse des résultats à notre charge.
- 2/ n° 81/6644 : essais du BIWI deuxième version de M. Liataud, entièrement à la charge de l'ENSM.  
Ces essais sont en cours. Montant prévu initialement 90.000 F H.T.. Accord pour allonger la durée de l'essai à 3 semaines pour un montant total de 115.000 F H.T.
- 3/ Essais H et F (gagnant du concours houle)  
Ce contrat ne serait pas confié au Laboratoire d'Hydrodynamique Navale de l'ENSM mais à celui des essais de structures. Il s'agirait de réaliser une table capable de simuler des mouvements de roulis-tangage au moyen de 2 vérins hydrauliques pilotés par un enregistrement fourni par le CNEXO.  
Devis en cours d'élaboration.

Contrats de recherche

- 1/ 1980 : étude d'un houlomoteur linéaire avec vérification du principe sur maquette (catamaran propulsé par une aile immergée.  
Montant : 50.000 F H.T.

