Utilisation de l'énergie thermique des mers Observations sur les matériels utilisés Conclusions générales

The utilization of the sea's thermal energy
Remarks on the equipment used. General conclusions

PAR C. BEAU

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES E. R.

- A. — Electricité et sous-produits (eau douce, froid, sel et industries chimiques, et éventuellement poissons, plancton et engrais).
- B. — Matériels utilisés.
- C. — Résultat des essais d'Abidjan.
- D. — Conclusions d'ensemble.

-
- A. — Electricity and by-products (fresh water, refrigeration - salt chemical industries, and possibly fish, plankton and fertilizers).
 - B. — Equipment used.
 - C. — Results of the Abidjan Tests.
 - D. — General conclusions.

RAPPEL HISTORIQUE

On peut se demander au siècle de l'énergie atomique quel est l'intérêt de cette nouvelle source d'énergie qu'est l'énergie thermique des mers, énergie qui provient de l'exploitation dans des machines thermiques appropriées d'un faible écart de température entre deux sources d'eau de débit quasi illimité, l'eau chaude de surface dans les mers tropicales ou équatoriales et l'eau froide des profondeurs venant des régions polaires par suite de leur densité plus élevée.

Pourquoi a-t-on fait l'effort de reprendre les idées et les essais antérieurs de Georges CLAUDE, effort qui a été considérable comme on le verra.

A ces questions, il est facile de répondre.

L'intérêt de l'énergie thermique des mers ne

réside pas en effet uniquement dans la production d'électricité bien que cette raison suffirait à elle seule dès lors que le prix du kilowatt/heure obtenu est compétitif, il réside également, et pour une part tout aussi importante, dans le fait qu'elle peut donner lieu à toute une série de sous-produits que nous passerons en revue plus loin.

Auparavant, il n'est pas inutile de faire un bref résumé de l'effort réalisé et sur lequel la communication de MM. SALLE et CAPESTAN s'étend plus longuement.

Après la présentation de la conception de l'énergie thermique des mers, avec machine de laboratoire à l'appui, faite devant l'Académie des Sciences par BOUCHEROT et Georges CLAUDE en

FIG. 1

Projet de centrale d'énergie thermique des mers d'Abidjan.

Implantation schématique de l'usine. On voit notamment la ligne figurant la conduite d'eau froide qui atteint les fonds de 400 m dans la vallée sous-marine appelée « Trous sans fond ».

1926, et les tentatives de Cuba en 1929 et 1930 de ce dernier, qui fit tourner pendant 11 jours devant un jury officiel cubain une turbine de démonstration mue par l'énergie thermique des mers, les études d'une réalisation sur le plan industriel, qui avaient été interrompues pour diverses raisons, notamment financières, furent reprises en 1941 par le Gouvernement français en vue d'une application au cas d'Abidjan, point particulièrement favorable en raison de l'existence (fig. 1) d'une vallée sous-marine dite « Trou sans Fond » permettant aux eaux froides de s'approcher de la côte et pour l'étude duquel a été fondée, en juillet 1948, la Société d'économie mixte « Energie des Mers ».

Ces études furent conduites avec beaucoup de minutie et ont porté sur tous les problèmes qui se posaient : problèmes physiques visant notamment la nécessité d'éviter que les perturbations du pompage ne mélangent les eaux froides des profondeurs et les eaux chaudes de surface; problèmes industriels, tels que l'étude de la conception même de la turbine fonctionnant sous vide et les meilleures dispositions à adopter pour le dégazeur, l'évaporateur et le conden-

seur; problèmes maritimes, et particulièrement ceux de l'hydrographie des fonds et de la pose en mer de la conduite de grand diamètre amenant les eaux froides des profondeurs; problèmes économiques enfin, car il s'agissait de déterminer les conditions de rentabilité industrielle d'une telle centrale.

On vient de terminer actuellement ce cycle d'études et de travaux par le rodage, sur des tronçons de conduite, de la méthode de construction de la prise d'eau froide en mer, seul point où antérieurement subsistait encore un aléa.

Ajoutons enfin, avant de développer ci-après les raisons qui ont motivé l'effort résumé ci-dessus, qu'à l'idée générale de l'utilisation de températures de la mer peuvent également se rattacher des conceptions d'un ordre très différent telles que celle de M. ROUGERON sur le réchauffage possible de la mer du Nord par le Gulf-Stream dont il expose le mécanisme et l'intérêt, au point de vue, notamment, des conséquences climatiques, dans une remarquable communication.

A. — INTÉRÊT DE L'ÉNERGIE THERMIQUE DES MERS ÉLECTRICITÉ ET SOUS-PRODUITS

Production d'énergie :

Aucune source d'énergie à l'heure actuelle ne peut être considérée comme négligeable étant donné le rythme avec lequel la consommation d'énergie augmente dans le monde. Cette consommation est rapide et régulière; on estime qu'elle double en moyenne tous les dix ans, et cette loi expérimentale approximative se vérifie curieusement quel que soit le niveau de la consommation, aussi bien, par exemple, au Portugal qu'en un pays où la consommation est 40 fois plus forte comme au Canada. Prenons l'exemple de la France qui consomme actuellement 40 milliards de kWh par an, c'est donc 40 milliards de plus qu'il faudra trouver d'ici 10 ans. De tels chiffres donnent un peu le vertige quand on considère l'effort d'équipement auquel ils correspondent. En pays neufs et dans les débuts des équipements, il semble même que la loi du doublement décennal soit en retard sur la réalité. A Abidjan, notamment, la consommation du deuxième semestre 1952 n'atteignait pas 2 millions de kWh; en 1953, elle dépassait 6 millions, en 1954, elle dépassait 10 millions pour arriver à 7.500.000 kWh durant le premier semestre 1955. Pour 1960, on prévoit une consommation de 33.000.000 kWh et, pour 1965, 50.000.000

Pour parer à de telles situations, il faut donc prévoir sans cesse de nouveaux équipements et, en s'en tenant en première approximation à la règle du doublement décennal, on est conduit, et ceci vaut pour le monde entier, à entreprendre tous les dix ans un programme de production d'énergie d'un potentiel équivalent à la totalité de ce qui existe déjà.

Alors la question se pose immédiatement : la production va-t-elle pouvoir suivre indéfiniment le train des exigences de la consommation? L'électricité ne naît pas de rien, la généralité de sa production mondiale a une origine thermique à base de charbon et de pétrole. Or charbon et pétrole ne sont pas inépuisables, ils ne sont d'ailleurs pas seulement destinés à fournir de l'électricité. Ce sont, en effet, les matières premières de la chimie organique, et, d'autre part, le chauffage industriel et domestique et les transports en dépendent. Dans ces domaines, la cadence de consommation est loin d'être en régression, tout comme dans le domaine de l'énergie. On estime que, pour soutenir ce rythme progressif de consommation, il faudrait d'ici vingt ans tripler la production actuelle de charbon et pétrole. Est-ce possible? De toute façon n'avons-nous pas intérêt à ménager des produits qui ne sont pas inépuisables et pour

lesquels on n'a certes pas fini de trouver des emplois?

Une autre source importante d'énergie réside dans la houille blanche. Equipements de barrages et constructions de centrales hydrauliques se multiplient. Mais fleuves et chutes d'eau sont limités, de même que le nombre de points favorables à la construction d'usines marémotrices.

Il semble donc qu'il devienne impératif de faire flèche de tout bois et qu'aucune source nouvelle d'énergie ne doive être négligée.

C'est ainsi que l'Italie a déjà tiré parti, à grande échelle, des vapeurs naturelles de Larderello, préfiguration d'un des espoirs de l'humanité, l'énergie géothermique, à laquelle les noms des Français de LARDEREL et Georges CLAUDE sont déjà attachés.

C'est ainsi également que la plupart des pays cherchent à utiliser l'énergie atomique et que plusieurs centrales pilotes utilisant cette énergie commencent à tourner dans le monde, bien que le kilowatt/heure produit ne soit pas encore compétitif.

C'est ainsi enfin que plusieurs pays entreprennent actuellement des réalisations à l'échelle industrielle en vue de rendre compétitive l'énergie du vent.

Dans cette perspective impérative d'utilisation de toutes les sources d'énergie susceptibles de devenir économiquement rentables doit être placée en bonne place l'énergie thermique des mers dont les possibilités de production sont quasi illimitées grâce au renouvellement incessant des masses d'eau froide et d'eau chaude susceptibles d'être captées.

Choix du fluide moteur et sous-produits :

Mais l'intérêt de l'énergie thermique des mers ne réside pas seulement dans un apport d'énergie, il se trouve également, et de façon de plus en plus appréciée, dans le potentiel de sous-produits qui peut accompagner la libération de cette énergie grâce à des dispositions appropriées dans l'installation des centrales ou à quelques compléments d'équipement. Et ceci nous amène à méditer un instant sur la question du choix du fluide employé.

On pourrait en effet aussi bien concevoir des machines thermiques spécialement construites pour l'emploi d'un fluide auxiliaire et M. DARIC, dans son intéressante communication aux *Quatrièmes Journées de l'Hydraulique*, préconise une solution de ce genre.

Depuis longtemps d'ailleurs des gaz liquéfiables servant à la réfrigération — tels que l'ammoniac, le gaz carbonique, le chlorure de méthyle — ont été proposés comme fluides-moteurs (BOGGIA, CAMPBELL, KUNTZIGER, etc.);

l'ingénieur italien AMALIO a même préconisé certains mélanges binaires (brevet USA du 29/3/1940). Mais, comme l'expliquait G. CLAUDE dans sa conférence du 11 février 1928 à la Sorbonne, l'emploi des gaz liquéfiés comporterait des inconvénients majeurs, pertinemment rappelés par M. NISOLLE (revue belge *Energie*, mai 1949); car de deux choses l'une :

- Ou bien les échanges de chaleur se feraient par surface, et le fluide auxiliaire exigerait un double système d'échangeurs tubulaires, nécessairement très importants vu les énormes débits d'eaux et les faibles différences de températures, et soumis à l'action corrosive de l'eau de mer ou du fluide;
- Ou bien les échanges de chaleur se feraient par mélange dans un évaporateur et un condenseur immergés aux profondeurs convenables, avec un fluide auxiliaire non miscible à l'eau de mer; mais il faudrait pour que l'opération soit pratiquement viable que la solubilité de ce fluide dans l'eau de mer soit tellement infime qu'un tel fluide est encore à découvrir.

Les complications qu'impliquerait en conséquence l'emploi d'un fluide auxiliaire se traduisant, sans avantage de puissance, par une augmentation sensible des investissements, la Société « Energie des Mers », après étude approfondie de la question, a adopté, quant à elle, l'emploi de la vapeur d'eau, sous vide assez poussé, ce qui permet de n'avoir qu'un seul échangeur au lieu de deux et de le réduire à un système très simple : échangeur à pluie d'eau froide, c'est-à-dire à mélange si l'on ne vise que la production de l'énergie. Si l'on vise en outre la production d'eau douce, on n'aurait en tout cas qu'un seul échangeur à surface à prévoir. De toute façon l'utilisation d'un fluide auxiliaire priverait de la possibilité d'obtenir de l'eau douce et du sel.

Eau douce :

Parmi les sous-produits liés au choix du fluide-moteur, l'eau douce produite par la condensation de la vapeur d'eau sur des condenseurs à surface parcourus par l'eau de mer froide issue des profondeurs présente un intérêt capital pour les pays arides au bord des mers tropicales. Cette perspective, qui a d'ailleurs été mise en relief au Congrès International des Zones Arides à New-Delhi en 1954, intéresse énormément les spécialistes américains chargés d'étudier le problème de la conversion d'eau de mer en eau douce pour les besoins de certaines régions sèches des Etats-Unis comme la Californie.

Pour donner une idée de l'importance quan-

titative de ce sous-produit, on peut préciser que le premier groupe de 3.500 kW net de la future Centrale d'Abidjan condensera 300 tonnes de vapeur à l'heure et pourrait donc produire 300 m³ d'eau douce à l'heure à bas prix, l'eau douce n'ayant pratiquement à supporter que l'intérêt et l'amortissement de la différence de prix entre les deux types de condenseurs.

D'une façon plus générale, et en envisageant la desserte d'une population urbaine, on peut dire que la production possible d'eau douce correspondrait sensiblement aux besoins d'une ville dont une centrale thermique des mers d'une puissance déterminée suffirait à assurer la consommation d'électricité.

Il est d'ailleurs facile, au cas où l'eau douce constituerait en certains endroits le problème n° 1, primant par conséquent celui de l'électricité, d'augmenter, au détriment de la quantité d'énergie produite, le tonnage de l'eau douce obtenue en partant des mêmes quantités d'eau de mer entrant dans la centrale. On pourrait utiliser également des écarts de température inférieurs à 20° et descendre jusqu'à 14 ou 15° si la question de la production encore plus massive et à tout prix d'eau douce effaçait toutes les autres considérations. Les centrales se convertiraient ainsi en usines de distillation sous dépression, mais le prix de production s'éloignerait évidemment dans ce cas de la gratuité et tendrait à se rapprocher de ceux des usines de distillation classiques les plus modernes.

Sel et industries chimiques :

En continuant à pousser sous vide, grâce à l'eau froide, la concentration des saumures après réexposition au soleil dans des installations accessoires, on peut obtenir du sel qui, indépendamment de sa valeur commerciale au point de vue alimentaire, peut, du fait de son association à la production d'énergie, au même point et au bord d'une côte maritime, constituer une

matière première prédestinée en ce point, pour l'installation d'industries chimiques.

L'électrolyse, par exemple, utilisant le courant des heures creuses pourrait, en partant du sel, fournir de la soude, de l'acide chlorhydrique et du chlore. On aperçoit, de ce fait, de multiples conséquences possibles telles que l'hydrolyse des bois ou le blanchiment des pâtes à papier. Par ailleurs l'exploitation éventuelle et parallèle des autres sels, tels que ceux de magnésium ou de brome, contenus dans l'eau de mer, peut également être envisagée.

Climatisation :

Autre sous-produit à peu près gratuit de l'énergie thermique des mers : l'eau froide résiduelle des condenseurs et, le cas échéant, l'eau encore plus froide venant directement des profondeurs sous-marines en période de surabondance d'énergie. Cette eau froide peut assurer une climatisation à bon marché pour les habitations ou les marchandises périssables, et fournir en outre à l'industrie un élément de développement intéressant dans tous les domaines où l'on a besoin d'une paroi froide pour assécher les produits.

Autres perspectives :

Bien que la notion en soit assez nouvelle et résulte notamment des enseignements des récentes plongées à grande profondeur des bathyscaphes, il n'est pas exclu non plus que plancton et poissons puissent être aspirés et recueillis en grande abondance par les conduites d'eau chaude et d'eau froide, ce qui pourrait constituer pour l'humanité, dont la population s'accroît sans cesse, un appoint alimentaire appréciable; les déchets ou espèces non susceptibles d'utilisation alimentaire pouvant en outre servir éventuellement de matière première à une industrie d'engrais.

B. — MATÉRIELS UTILISÉS

La question du matériel pose tout d'abord celle du type d'usine envisagé : usine à terre reliée aux grands fonds par une conduite immergée, usine à terre reliée aux grands fonds par un puits et un tunnel sous-marin débouchant en mer à grande profondeur, usine flottante avec conduite d'aspiration verticale, usine flottante sous-marine à faible profondeur avec conduite d'aspiration verticale, usine immergée dans les

grands fonds et aspirant les eaux chaudes de surface par une conduite verticale. Toutes les idées ont été lancées ainsi qu'on le voit. Des conceptions encore plus audacieuses ou visant des problèmes connexes ont même été avancées, telle une usine sur île flottante de glace entretenue par un prélèvement sur l'énergie produite, telle également une usine polaire utilisant l'eau froide à 4° des profondeurs comme eau chaude

COUPE DE LA CENTRALE AVEC CONDENSEUR PAR MELANGE

FIG. 2

Schéma d'un groupe de la future centrale d'énergie thermique des mers d'Abidjan (condenseur par mélange).

et la glace très froide, ou la neige, de surface comme source froide.

Il est certain que, si l'on n'avait eu, dans le champ de vision le plus immédiatement réalisable, que le type d'usine à terre, l'intérêt de l'énergie thermique des mers aurait été relativement limité, car le nombre de points favorables où les grands fonds s'approchent des côtes, tout en étant beaucoup plus important que celui des points favorables convenant aux installations marémotrices, reste cependant susceptible d'inventaire. Mais il est hors de doute que le type d'usine flottante sous-marine peut au moins très rapidement, sans extrapolation hasardeuse, entrer également dans le champ des réalisations d'un avenir prochain. Or, ce type peut s'accommoder aisément d'une certaine distance des grands fonds à la côte, car la pose d'un câble sous-marin de transport d'énergie, ou même d'une conduite de diamètre encore maniable pour le transport d'eau douce, ne soulève pas de difficultés; cette possibilité permet donc d'as-

surer à l'énergie thermique des mers une base de production quantitativement quasi-illimitée.

Georges CLAUDE avait d'ailleurs déjà conçu et tenté de réaliser une usine flottante (tentative du cargo *Tunisie* relatée dans la communication de MM. SALLE et CAPESTAN). Mais les enseignements de cette tentative soulignent le danger d'une liaison entre une installation fixe sous-marine et une installation de surface soumise à l'effort alternatif de la houle et confirment la nécessité de s'orienter plus tard dans la voie indiquée ci-dessus, voie qui ne condamne d'ailleurs pas toute installation de surface intermittente ou non, c'est-à-dire télescopique ou fixe, pourvu que la superstructure envisagée offre le minimum de résistance à la houle.

Pour en revenir au type d'usine à terre qui a été finalement choisi pour le projet de centrale d'Abidjan en Côte-d'Ivoire (fig. 2), précisons que le matériel prévu et en partie essayé, et qui a d'ailleurs été maintes fois décrit, dérive, sans extrapolation aléatoire, soit de matériels clas-

siques construits par des firmes spécialisées, soit de matériels nouveaux créés par la Société elle-même et mis au point au cours de ces dernières années.

La communication de MM. SALLE et CAPESTAN précise, avec vues à l'appui, comment sont conçus le projet de centrale, la longue conduite de près de 2 m de diamètre d'amenée de l'eau froide avec tronçons métalliques séparés par des joints souples en caoutchouc armé, les engins de mise à l'eau de cette conduite en lagune (avec vue des pontons bardeurs) et enfin les engins de transport et de mise en place en mer, c'est-à-dire les flotteurs spéciaux, dits « antihoule », conçus par M. l'Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées NIZERY.

La Société a également mis au point, dans son laboratoire solaire de Dakar, un matériel d'étude pour tenter de surchauffer les eaux de surface destinées à servir de source chaude en les exposant préalablement au soleil dans des bassins peu profonds, naturels ou artificiels, protégés si possible contre le vent et l'évaporation par un écran de verre, d'huile ou de matière plastique laissant passer les rayons solaires. L'intérêt de cette étude connexe permettrait, en effet, soit d'améliorer le rendement des centrales situées en zones favorables, car l'énergie produite est proportionnelle au carré des écarts de température entre source chaude et source froide, soit d'étendre l'aire géographique de l'énergie thermique des mers à des régions côtières particulièrement ensoleillées mais où, par suite de circonstances particulières, telles que les remontées d'eau froide au bord des côtes par phénomène d'upwelling, il serait très difficile d'obtenir, en partant de l'eau de mer de surface, les 20° de température nécessaires au fonctionnement de l'énergie thermique des mers.

Rappelons à cet égard que MM. GOUGENHEIM et ROMANOWSKI ont exposé dans leurs très intéressantes communications aux *Quatrièmes Journées de l'Hydraulique*, l'un le mécanisme de ce phénomène d'upwelling dû à un vent continu parallèle à la côte qui chasse au large les eaux chaudes de surface du fait de la combinaison de son action avec la force de Coriolis, et l'autre, les conditions naturelles favorables à la naissance de ce phénomène et qui déterminent ainsi les régions côtières où, en fait, on le constate. La Californie, par exemple, à laquelle le gouvernement américain s'intéresse particulièrement au point de vue de la production d'eau douce, est une des régions où, par suite de ce phénomène, l'énergie thermique des mers serait pratiquement impossible sans utilisation de bassins de réchauffage préalable des eaux de surface. Or, le problème de l'eau douce à bon marché est capital en Californie.

Dans d'autres circonstances, la possibilité d'un surchauffage préalable pourrait permettre d'obvier à une insuffisance des écarts des températures naturelles entre surface et fond par suite de la présence d'un seuil interdisant l'accès des eaux profondes dans une mer intérieure comme, par exemple le seuil de Gibraltar dans la Méditerranée ou le seuil de Bab El-Mandeb pour la mer Rouge. On voit, par ces exemples, tout l'intérêt de la poursuite des études entreprises sur les bassins de réchauffage solaire, études dont la difficulté principale ne réside pas tant dans l'obtention de quelques degrés de température supplémentaires, mais dans la nécessité où l'on se trouve d'obtenir ce résultat avec des investissements extrêmement réduits au m² si l'on veut maintenir un niveau compétitif au kilowatt/heure.

C. — RÉSULTATS DES ESSAIS D'ABIDJAN

Rappelons que lorsque la Société d'économie mixte « Energie des Mers » déposa un projet de centrale pour Abidjan, elle fut priée, avant de passer à exécution, de roder la méthode préconisée pour la pose de la conduite d'eau froide, point sur lequel avait buté Georges CLAUDE et où paraissait subsister de ce fait encore quelques aléas.

Il s'agissait essentiellement pour effectuer ce rodage, d'une part, de construire effectivement des flotteurs antihoule mécanisés du type Nizery, et des sections de conduite rigides et souples, et, d'autre part, d'essayer ces matériels sur place à Abidjan au cours de diverses manœuvres. Celles-ci devaient permettre de se rendre

compte, notamment, de la tenue en mer de ces engins, de la qualité antihoule des flotteurs (composés essentiellement de deux cylindres principaux entièrement immergés sous charge et surmontés au-dessus de la surface d'une plateforme de manœuvre), de la souplesse et du fonctionnement des joints souples, du transport en mer de sections de conduite expérimentale (fig. 3), suspendues aux flotteurs convenablement mis au point, de la bonne marche des manœuvres de descente, de pose, de dragage et de remontée de ces conduites ainsi suspendues et enfin, et surtout, de la possibilité de raccorder et de boulonner facilement, sous l'eau, deux sections de conduite (fig. 4), opération-clé permettant d'envisager sans appréhension

FIG. 3

Transport en mer d'une conduite de 1,80 m de diamètre suspendue à des flotteurs antihoule.

la construction et la pose en mer de la future longue conduite qui aurait près de 5 km de longueur et devrait être posée par éléments successifs raccordés en mer.

Ces essais ont donné lieu à de multiples enseignements et ont permis de nombreuses mises au point, en général dans le sens de la simplification et du renforcement de certains dispositifs. Elles ont conduit, notamment, à la réalisation

d'un type de flotteur plus léger, d'un type de treuil plus robuste avec suppression du principe de moullage et d'un dispositif de suspension par palonnier, à la fois plus simple, plus robuste et plus souple. Quant à l'opération-clé de raccordement de sections de conduite en mer, elle a été, malgré une houle d'environ 1,50 m de creux, pleinement et facilement réussie après une période d'entraînement en lagune.

D. — CONCLUSION D'ENSEMBLE

Les diverses communications rappelées dans ce rapport ainsi que l'historique des faits, l'exposé des conceptions, des matériels préconisés ou utilisés, des essais entrepris et des perspectives d'avenir de l'énergie thermique des mers au point de vue électricité, eau douce et autres sous-produits, montrent avec évidence que la

question de cette source-nouvelle d'énergie, qui a fait couler beaucoup d'encre depuis les travaux de pionnier de Georges CLAUDE, peut-être considérée comme arrivée à maturité maintenant.

Elle n'est plus en avance sur son époque comme elle l'était peut-être entre les deux

guerres. Le perfectionnement des techniques sous-marines, qui est une acquisition récente, a notamment rendu relativement aisées des opérations considérées comme fort aléatoires autrefois.

L'heure de la décision approche donc. Même au seuil de l'ère atomique, la conquête de cette nouvelle source d'énergie ne doit pas, en effet, être négligée car, indépendamment de la production d'électricité, elle peut apporter avec elle toute une série de sous-produits de première nécessité pour l'homme : eau douce, froid, sel et peut-être poissons et plancton.

Le champ à exploiter est, comme on le voit, extrêmement vaste. Grâce à l'utilisation éventuelle d'un surchauffage solaire préalable, il peut s'étendre en outre à une aire géographique considérable et, par ailleurs, la maîtrise qui, au fur et à mesure de la réalisation, s'affirmera en matière de centrale à dépression, pourra s'appli-

quer également à d'autres problèmes s'inscrivant dans la même technique de base, tels que l'équipement de sources d'eau chaudes naturelles ou industrielles, l'exploitation des importants écarts de températures entre le jour et la nuit dans certains pays désertiques tropicaux ou celle des écarts de température entre les glaces et neiges polaires et l'eau de mer à 4° sous-jacente.

Ajoutons en terminant, pour ramener les yeux sur des perspectives plus immédiates, que l'étude économique faite dans le cas d'Abidjan a permis de se rendre compte que, même sans tenir compte de la valeur des sous-produits, la réalisation d'une centrale d'énergie thermique des mers est une opération économiquement rentable sous la seule réserve d'atteindre un certain niveau de puissance installée, niveau qui, dans le cas en question, est d'ailleurs parfaitement en harmonie avec le développement énergétique de l'agglomération intéressée puisqu'il ne correspond qu'à une petite étape de ce développement.

FIG. 4

Raccordement en mer à 15 m sous l'eau de deux sections de conduite. L'approche de deux sections de conduite étant sensiblement terminée, le scaphandrier (homme-grenouille), qui a surveillé la manœuvre de rapprochement et d'emboîtement, s'apprête à commencer le boulonnage.

DISCUSSION

M. BEAU, rapporteur général, signale qu'il a reçu un nouveau rapport de M. ROUGERON qui lance l'idée d'un mariage entre l'énergie atomique et l'énergie thermique des mers, idée qui est à ajouter à son rapport sur le « réchauffement de la mer du Nord par le Gulf Stream » (voir plus loin l'exposé de M. ROUGERON).

Après une interruption, la séance reprend sous la présidence de M. BEAU qui fait projeter, en les commentant, un film et des vues fixes sur les essais de mise à l'eau, de pose et d'aboutage en mer, d'éléments articulés de la future conduite sous-marine de la Centrale d'Abidjan projetée.

Le film montre successivement le site de la Centrale constitué par la lagune d'Abidjan, les scaphandriers se préparant à la plongée, les flotteurs à ballast transportant la conduite et tirés par un remorqueur commun — non sans quelques incidents, d'ailleurs.

Les vues fixes représentent un élément de conduite de 50 m avec cône femelle à l'extrémité, un joint souple protégé par des barres limiteurs d'efforts, l'emboîtement des cônes mâle et femelle, assurant une continuité de la circulation de l'eau à l'intérieur de la conduite, le palonnier à cheval sur le joint souple, avec ses crochets, pour chaîne de dragage, les flotteurs anti-houle utilisés pour le transport de la conduite et dont les graduations sur les caisses verticales stabilisatrices permettent d'apprécier le creux de la houle, etc. (quelques-unes de ces photographies figurent dans le rapport général de M. BEAU).

Après ces projections, M. le Président ouvre la discussion.

M. DARIC fournit quelques précisions sur sa communication.

En 1949, la lecture d'articles parus dans la presse technique sur le projet d'installation, à Abidjan, d'une centrale terrestre d'une puissance brute de 15 000 kW, l'incita à rechercher une solution différente au problème délicat de la conduite d'amenée de l'eau froide (dont le coût représente 55 % du prix de l'ensemble), solution susceptible de se conjuguer à des dispositions d'ensemble destinées à assurer une indépendance relative de la centrale par rapport aux sites marins et côtiers.

Considérant que seule une usine marine (flottante ou immergée) permet de réaliser les plus courtes distances de transport et l'égalisation du débit de l'eau froide à celui de l'eau chaude, M. DARIC fut amené à orienter son étude dans ce sens, en s'efforçant d'introduire des conceptions susceptibles d'éviter des mécomptes dont certains s'étaient déjà révélés au cours d'expérimentations antérieures.

Selon lui, le problème de l'usine marine est directement lié, en premier lieu, à la sujétion des effets de la houle.

Pour y échapper, il est nécessaire de prévoir une usine sous-marine.

Cela étant, l'économie de la construction conduisit à rechercher des encombrements réduits, et des enceintes dont les parois de séparation soient relativement minces, bien que devant assurer la résistance requise.

D'où l'idée de l'emploi d'un fluide thermodynamique

auxiliaire, en combinaison avec la meilleure « équipression » possible entre les différents circuits et le milieu extérieur.

A cet effet, il semble que les caractéristiques physiques de produits tels que le propane, puissent apporter une solution valable.

Bien entendu, l'adoption d'un fluide auxiliaire ne permet pas de produire directement, et en grande masse, de l'eau douce, et nécessite la construction d'échangeurs par surface importants (la dissolution possible, dans l'eau, du fluide auxiliaire et son entraînement mécanique par les courants semblent condamner présentement les échangeurs par mélange).

M. DARIC signale, à ce sujet, que la production d'eau douce dans la centrale du type Abidjan, exige aussi la construction de condenseurs très importants, puisque leur surface d'échange est liée à la densité particulièrement faible de la vapeur d'eau à condenser.

M. le Président fait remarquer l'intérêt d'avoir de l'eau douce comme sous-produit, dans la plupart des cas, et même, quelquefois, en priorité sur l'énergie. C'est une des raisons pour lesquelles le problème des échangeurs se pose. Par exemple, dans l'île de Curaçao, il y a de grandes raffineries de pétrole et la population est obligée d'importer ou distiller 4/5 de son eau (270 F le m³). D'autre part, les grands fonds sont près des côtes et les raffineries rejettent à la mer environ 50.000 m³ à l'heure d'eaux chaudes à 40°. On pourrait ainsi disposer facilement d'au moins 30° d'écart de température. Ces deux circonstances confèrent une grande valeur économique au site au point de vue de l'énergie thermique des mers. La grande pente des fonds côtiers favorise également dans le même ordre d'idées, toutes les îles volcaniques du Golfe du Mexique et du Pacifique. Dans d'autres régions, telles que la côte ouest de l'Arabie, où la production d'eau douce serait désirable pour la répandre dans le désert, on se trouve gêné, parce que la mer Rouge, malgré l'élévation de sa température en surface, est barrée à son origine par un seuil à 200 m environ qui s'oppose à la pénétration de l'eau froide des profondeurs; d'où l'intérêt, pour pallier cet inconvénient, de surchauffer préalablement l'eau de surface, dans des lagunes ou des bassins artificiels de faibles profondeurs. En général, les sites très favorables pour les centrales à terre ne sont pas très fréquents, du fait de l'existence d'un plateau continental et de l'éloignement des grands fonds et ceci conduit, pour l'avenir, à l'idée de centrale flottante dont M. DARIC a montré un aspect avec sa conception d'usine sous-marine. Ces centrales flottantes pourraient être installées dans tous les pays tropicaux à 20 ou 30 km de la côte; on transporterait l'énergie électrique par un câble au fond de l'eau et, éventuellement, l'eau douce par un tuyau de quelques décimètres de diamètre.

Entrant dans quelques détails, M. DARIC précise que, selon sa conception, la conduite d'eau froide, longue de 300 m environ, ferait un « monobloc » avec la centrale.

L'ensemble serait mis en station verticale en une seule opération. A cet effet, la canalisation d'eau froide comporterait concentriquement une conduite de diamètre réduit compartimentée par des cloisonnements trans-

versa. Chaque compartiment serait pourvu d'un dispositif d'injection et d'évacuation d'air comprimé et d'eau. On conçoit qu'un clavier permettrait d'effectuer, sans accélérations brutales, et au rythme fixé par l'opérateur, les manœuvres de mise en station et, inversement le cas échéant, de relevage.

M. DARIC estime qu'une telle mise en station serait de courte durée (moins d'une journée) ce qui permettrait de choisir les conditions atmosphériques les plus favorables.

M. LEFÈVRE demande à M. DARIC s'il est possible de réaliser dans son système, l'équipression aussi bien en marche normale que pendant l'arrêt de l'installation et pendant le transport pour la mise en place de l'ensemble.

M. DARIC répond que, dans le type d'usine proposée, l'équipression n'existe pas, en ce qui concerne l'enceinte de l'habitat, mais celle-ci est de diamètre réduit.

En ce qui concerne les échangeurs et les circuits de fluide auxiliaire, l'équipression ne peut être rigoureusement exacte en toutes circonstances, car les régimes de température varient selon que l'usine est à l'arrêt ou en marche, mais les différences ne sont pas très grandes.

L'équipression à l'arrêt pourrait, d'ailleurs, être réalisée par des gaz auxiliaires ou par des orifices libres assurant l'équilibre avec le milieu marin.

A une deuxième question de M. LEFÈVRE sur la possibilité d'éliminer les pompes de circulation de fluide auxiliaire, en disposant les échangeurs de telle façon qu'on puisse profiter de la différence d'élévation pour assurer le retour à l'évaporateur, et sur l'avantage d'utiliser du butane ou du propane, M. DARIC répond ne pas avoir étudié le problème de la suppression des pompes, s'étant limité, dans un premier temps, à considérer les éléments classiques, persuadé d'ailleurs que des économies de puissance seraient réalisables, telles que celles résultant de la dénivelation géométrique dans le cas du schéma figurant au rapport.

Le choix entre le propane et le butane dépend d'un certain nombre de considérations, notamment des températures des eaux des sources chaude et froide, de la puissance de la centrale, des encombrements acceptables et de la recherche de l'équipression.

M. LEFÈVRE pense que des ensembles pourraient être conçus comme un système clos entièrement automatique, ce qui permettrait d'éliminer les sorties d'arbre, raccords, et autres accessoires à l'origine des fuites.

M. DARIC rappelle que le rapport montre les dispositions de base prévues pour assurer l'étanchéité des circuits, et simplifier les sujétions d'exploitation en régime de fonctionnement normal.

Une automaticité quasi totale de l'usine pourrait être réalisée.

Aux questions posées par M. REIS, sur les perturbations causées par la houle, sur le fonctionnement régulier d'une usine sous-marine et s'il y a une évaluation économique des conditions d'exploitation d'une telle usine, M. DARIC répond qu'en effet, il est à craindre, en raison de la faible inertie du circuit d'eau chaude, que la houle puisse engendrer des variations périodiques du débit. Pour remédier à cet inconvénient, un dispositif spécial simple est prévu sur l'encolure de l'usine. Il consiste, grâce à une jupe annexe, à emprisonner une certaine quantité d'air agissant, comme dans les bouteilles d'air des pompes classiques, sur le débit de l'eau. L'existence de ces matelas d'air contribue aussi à une stabilisation souple de l'usine.

Quant à l'évaluation économique, M. DARIC répond qu'aucune étude de prix n'a pu être effectuée. Toutefois, l'idée directrice a été de réduire le prix au strict

minimum. En raison de la plus courte longueur des circuits d'eau, de l'adoption de l'équipression, de l'usage d'un fluide auxiliaire à tension de vapeur relativement élevée, des techniques classiques de construction, des opérations présumées simplifiées de mise en station et du relevage, le prix de l'installation doit être sensiblement plus faible que celui de l'usine terrestre de même puissance utile.

Le rapport présenté donne des calculs simples, qui seraient à revoir pour tenir compte notamment :

- De l'emploi avantageux qui pourrait être fait des turbines étagées;
- De la surchauffe éventuelle de la vapeur du fluide auxiliaire, soit par l'eau chaude, soit par l'énergie thermique libérée par l'effet Joule de l'alternateur;
- De l'adoption de turbines (de préférence à des moteurs électriques) pour la commande des auxiliaires, prélevant le fluide moteur aux mêmes sources que les turbines principales;
- D'un examen du circuit du fluide auxiliaire.

M. DARIC souligne qu'en définitive, il importe, sur le plan économique, d'apprécier, pour chaque type de centrale (terrestre, marine) en fonction non pas de la puissance brute, mais de la puissance nette réellement disponible à la vente, la variation du coût d'installation et d'exploitation.

Cette confrontation orienterait, dans chaque cas particulier, le choix entre les diverses solutions compétitives préalablement retenues.

M. ROUGERON expose, sur l'invitation de M. le Président, sa suggestion de combinaison de l'énergie maréthermique et de l'énergie géothermique. La difficulté fondamentale d'utilisation de l'énergie géothermique, en liaison avec l'énergie des mers, est la surface d'échange. Pour faire passer 80° de la terre à l'eau, il faut des centaines de km² pour une usine de 10 à 20.000 kW. Dans son idée, une bombe thermonucléaire de 20 mégatonnes donnerait un entonnoir de 2 000 m de profondeur et 4 000 m de diamètre. On obtiendrait ainsi une surface de 15 à 20 km², augmentée de l'énorme surface des roches fragmentées, sur lesquelles on déverserait l'eau de la surface de la mer pour la réchauffer. Au début on disposerait de la chaleur atomique, puis la chaleur de la terre, elle-même, entreprendrait ensuite le réchauffement.

Cette bombe revient à 70 millions. Du fait de l'explosion souterraine, ses effets dangereux seraient très localisés. On peut également faire ces explosions en mer.

M. DEYMIÉ demande pourquoi l'on n'utilise pas, dans le cas d'Abidjan, pour la pose des conduites sous-marines, la technique adoptée pour le lancement des sea-lines, au besoin en posant plusieurs conduites parallèles.

M. le Président fait remarquer que la multiplication des conduites parallèles augmenterait d'une façon prohibitive les pertes de chaleur par effets de parois dans les conduites.

M. GALERNE, Président-Directeur général de la Société Générale de Travaux Maritimes et Fluviaux, plus connue sous le nom d'hommes-grenouilles est invité par M. le Président à donner des précisions sur l'aboutage des conduites sous-marines. Les plongeurs, sous sa direction personnelle, ont exécuté, d'abord en exercice dans la lagune, puis en mer avec une houle de 1,50 m, le bouclage de ces conduites en moins d'une heure. Il est à remarquer que la houle amortie par des flotteurs n'est pas une gêne mais constitue au contraire une aide pré-

cieuse pour les plongeurs, car elle facilite l'emmanchement des deux cônes. Ils ont, au cours de ces manœuvres, rencontré différents petits incidents, tels que retournement d'un flotteur, rupture de goupille d'attache. Ils ont pu, à chaque fois, récupérer tout le matériel et recommencer l'opération qui a été un succès.

M. le Président ajoute quelques précisions sur la conception générale de la pose de la grande conduite d'eau froide : un élément de conduite étant déjà posé au moins partiellement au fond de l'eau, les 300 mètres suivants sont approchés, suspendus à une quinzaine de mètres de profondeur par les flotteurs antihoule. Pour réaliser l'aboutage, on maintient relevée l'extrémité de la dernière partie posée, qui se présente comme un serpent dressant la tête, jusqu'à 15 mètres au-dessous de la

surface; quand l'approche est terminée on procède à l'aboutage et, ensuite, on descend le tout progressivement, de façon à bien épouser toutes les sinuosités du fond, et on relève la partie terminale nouvelle à 15 mètres de profondeur pour préparer l'opération suivante.

Par éléments de 300 mètres, on opère ainsi la pose complète. Or, pour une conduite de 4 à 5 kilomètres, il suffit d'une quinzaine d'opérations de raccordement, analogues à celle que nous avons réalisée en moins d'une heure et on trouve certainement dans toutes les mers du monde une quinzaine de jours, au cours de la saison favorable, où la houle ne dépasse pas 1,50 m pour faire les raccordements nécessaires.

La séance est levée à 12 heures.

LES ÉNERGIES DE LA MER

Compte rendu intégral des QUATRIÈMES JOURNÉES DE L'HYDRAULIQUE.
de la Société Hydrotechnique de France

DEUX VOLUMES, brochés 8 000 F