Les centrales hydro-solaires

Hydro-Solar Power Stations

PAR L. VADOT

INGÉNIEUR AUX ÉTABLISSEMENTS NEYRPIG

Centrales hydrauliques dont l'évacuation de l'eau se fait à l'aval par évaporation dans un bassin. — Sites favorables à l'établissement de ce genre d'installation. — Évaluation du taux d'évaporation, et critique des formules classiques. Mode d'exploitation pendant la période d'abaissement du plan d'eau ou de remplissage. — Utilisation de l'énergie. Évaluation de l'énergie disponible et de l'importance des travaux nécessaires pour les sites les plus importants. Mise en évidence de l'intérêt de l'équipement, par ce procédé, du lac Assal aux Somalies françaises, du lac Assalé en Érythrée, et de la Mer Rouge.

Hydraulic power stations for which the evacuation of water downstream is effected by evaporation from a basin.—Sites favourable to this type of installation.—Evaluation of the rate of evaporation, and review of the classical formulae. Mode of exploitation during the period of raising or lowering of the water surface. Utilization of the energy. Evaluation of the energy available and the size of the works necessary for the most important sites. Illustration of the possibility of equipping in this way, Lake Assal in French Somaliland, Lake Assalé in Eritrea, and the Red Sea.

Les pays arides à faible précipitation et forte insolation ne possèdent généralement pour seule ressource naturelle d'énergie que la chaleur solaire, chaleur trop abondante, inutilement perdue, que l'on ne sait pas encore exploiter directement d'une façon économique. Utiliser cette chaleur pour créer des conditions favorables à l'exploitation d'un équipement hydraulique normal, tel est le but que nous nous proposons.

La chaleur solaire par l'évaporation qu'elle provoque assure la circulation générale de l'eau dans la nature, et, en particulier, dans le circuit qui se ferme par la conduite des centrales, mais alors que dans les installations hydrauliques habituelles la chaleur solaire pompe l'eau des mers pour la transporter sous forme de nuages sur les montagnes où elle se condense, nous envisageons ici une combinaison dans laquelle l'évaporation assure non pas l'apport de l'eau à l'amont de la centrale, mais son évacuation à l'aval, ce qui constitue un caractère essentiel de ce genre d'installation.

Alors que dans les installations normales le

lieu où se produit l'évaporation de l'eau peut être situé à une grande distance du point de l'utilisation de l'énergie hydraulique, par contre, dans les installations dont il est question ici, la zone d'évaporation est obligatoirement très voisine de la centrale. C'est donc la chaleur solaire du lieu d'établissement de la centrale qui entre directement en ligne de compte; aussi avons-nous donné à ces installations le nom de centrales hydro-solaires.

L'établissement d'une centrale hydro-électrique peut être réalisé de deux façons différentes suivant les conditions locales.

1° CENTRALES HYDRO-SOLAIRES MARINES.

Imaginons qu'il soit possible de trouver, dans une région de faible précipitation et de forte évaporation, une baie, un golfe ou un bassin normalement en communication avec la mer par un défilé assez étroit pour être facilement fermé. Le barrage est alors établi dans ce défilé afin d'obtenir l'isolement d'un bassin d'une assez grande surface. Par suite de l'évaporation beaucoup plus

forte que les apports naturels, la surface libre du bassin se met à baisser et une différence de niveau s'établit entre le bassin et la mer libre. Lorsque cette différence de niveau est jugée suffisante, on déverse alors dans le bassin, à travers les turbines d'une centrale, un débit correspondant exactement à la quantité d'eau évaporée, ce qui maintient l'état d'équilibre à la cote convenue. Notons que si un cours d'eau naturel se déverse dans le bassin ainsi constitué, on utilisera également l'énergie disponible dans la chute ainsi créée. La chose n'est évidemment possible que si le débit moyen du cours d'eau est au plus égal au débit évaporé par le bassin, compte tenu de la réduction de surface due à l'abaissement du plan d'eau.

Dans ce genre d'installation, on voit que le soleil intervient non seulement pour évacuer le débit, mais également pour créer la chute. La centrale hydro-solaire marine ne sera réalisable que si la fermeture du bassin est économique. Les exigences sont analogues à celles de l'établissement d'un barrage en montagne; le volume d'eau évaporée par an dans le bassin doit être grand par rapport au volume des matériaux constituant la digue de fermeture.

La mise en œuvre d'une installation hydro-solaire marine conduit donc à la suite d'opérations suivantes :

- 1° Etablissement du barrage de fermeture;
- 2° Période d'attente pour que le niveau dans le bassin fermé autorise une exploitation avantageuse;
- 3° Marche normale à un régime assurant l'équilibre entre les apports et l'évaporation.

La variation saisonnière de température n'influe généralement pas sur la production d'énergie par suite de la valeur relativement faible des variations saisonnières de la tranche d'eau évaporée par rapport à la chute utilisée.

Cette succession d'opérations peut être modifiée comme on le verra par la suite. D'une part, la fermeture peut être assurée avant que la construction du barrage ne soit terminée afin de limiter la période d'attente. D'autre part, toujours pour limiter la période d'attente improductive, on peut envisager un début d'exploitation avant que l'état d'équilibre final ne soit atteint.

L'établissement d'une installation de ce type nécessite que soient réunies certaines conditions géographiques et climatiques : bassin naturel facile à fermer et présentant une évolution favorable du fond, apport naturel aussi faible que possible, surtout pour les précipitations (les apports par cours d'eau peuvent être équipés), insolation fortes. Ces conditions limitent pratiquement les recherches aux zones tropicales arides.

2° CENTRALES HYDRO-SOLAIRES DE DÉPRESSION.

Supposons qu'il existe au voisinage de la mer une zone en dépression présentant une surface appréciable de terrain situé au-dessous du niveau de la mer; si on établit, par une galerie ou un canal, une communication entre la mer et cette dépression, il sera possible de déverser

FIG. 1

dans la dépression une quantité d'eau telle que l'évaporation assure exactement l'évacuation de cette quantité d'eau. Le niveau d'eau dans la dépression s'établira à une cote assurant l'équilibre entre les apports et l'évaporation. On dispose ainsi d'un certain débit tombant d'une hauteur égale à la différence de niveau existant entre la mer et le niveau de la nappe d'eau en régime d'équilibre dans la dépression; d'où production d'une certaine quantité d'énergie.

Il conviendra naturellement de rechercher quelle est la cote du plan d'eau dans la dépression qui assure la production maximum d'énergie. Cette disposition, toujours basée sur l'utilisation de l'énergie solaire pour évacuer le débit turbiné, présente néanmoins de notables différences avec la disposition hydro-solaire marine. Au lieu d'effectuer la fermeture d'un détroit par une digue, on aura à creuser une galerie ou un canal. D'autre part, l'évolution dans le temps de la production d'énergie est différente. Les principales phases de l'exploitation sont les suivantes :

- 1° Percement de la communication entre la mer et la dépression;
- 2° Remplissage de la dépression jusqu'à la cote d'équilibre;
- 3° Marche normale.

Mais ici, dans la phase 2, on dispose immédiatement d'une certaine quantité d'énergie.

A égalité de surface d'évaporation et de chute utilisable, la disposition en dépression est plus avantageuse que la disposition en usine marine, puisque non seulement la production d'énergie peut être envisagée plus tôt, mais encore on dispose d'un surcroît d'énergie correspondant au remplissage de la dépression jusqu'à la cote de régime normal. Notons, d'ailleurs, que la période transitoire de remplissage nécessite une étude économique spéciale, afin de déterminer quel est l'équipement qui permet la production la plus avantageuse, alors que la chute et le débit varient dans d'assez grandes proportions jusqu'à ce que l'état de régime normal soit atteint.

Ici encore, l'établissement d'une installation en dépression nécessite que soient réunies certaines conditions géographiques et climatiques : dépression naturelle à distance assez faible de la mer, apport naturel faible et insolation forte.

Il faut noter que dans les deux cas d'installation envisagés on n'utilise que l'énergie solaire disponible sur la nappe d'eau où elle serait difficilement récupérable par d'autres procédés. Il n'est donc nullement exclu d'utiliser l'énergie solaire avec un meilleur rendement en dehors du plan d'eau, et, en particulier, sur les terrains mis à sec par l'évaporation.

Les sites favorables à l'équipement hydro-solaire

Les conditions géographiques et climatiques exigées limitent sérieusement le nombre des sites susceptibles de se prêter aux installations des centrales hydro-solaires; il en existe néanmoins plusieurs d'un certain intérêt. Parmi les bassins dont la fermeture pourrait être envisagée, la Méditerranée constitue certainement le premier site qui vient à l'esprit, tant sa forme se prête à l'opération. La Mer Rouge, avec l'étranglement du Babel-Manded, le Golfe Persique, avec le détroit de d'Ormuz, constituent deux autres sites. Nous examinerons plus en détail les possibilités d'utilisation de ces trois bassins de grande superficie. On rencontre ensuite un certain nombre de sites de moindre importance, parmi lesquels nous indiquerons le golfe de Kara-Bogaz dans la Caspienne, la baie de Maracaïbo au Venezuela, le golfe de Van Diemen en Australie et quantité de sites de faible importance.

Les dépressions naturelles sont en nombre plus faible. Certaines ne peuvent entrer en ligne de compte pour les installations hydro-solaires; telles sont les dépressions hollandaises et de Prusse Orientale en Europe. La dépression de Tourfan (— 130 m), isolée au centre de l'Asie en Mongolie, ne peut recevoir d'eau; le lac Eyre (— 12 m), en

Australie, présente une dénivellation trop faible et se trouve à une trop grande distance de la mer. En Amérique du Nord, la Death Valley (— 85 m), le lac Salton (— 91 m) sont également sans intérêt.

Les dépressions susceptibles d'être équipées sont toutes situées dans la même région du globe. La plus grande, la Caspienne (— 28 m) est susceptible de recevoir les eaux du Don, ou celles de la Sibérie. La plus profonde, le sillon de la Mer morte (— 392 m), peut recevoir soit les eaux de la Méditerranée, soit celles de la Mer Rouge.

En Tunisie, le Chott Melhir (— 31 m) et le Chott Rharsa (— 25 m), ont une étendue importante. En Egypte, on trouve la grande dépression de Kattara (— 137 m) et quelques dépressions de moindre importance, l'Oasis de Siwa (— 25 m), la Vallée du Natron (— 23 m), la dépression du Fayoum (— 44 m). En Erythrée, la dépression du lac Assalé (— 120 m), et aux Somalis Françaises celle du lac Assal (— 174 m) se trouve sur le prolongement du grand sillon africain en pleine région volcanique. Circonstance favorable, la plupart de ces dépressions sont proches de la mer, et jouissent d'un climat tropical avec de très faibles précipitations.

Les problèmes particuliers que pose l'étude d'un projet hydro-solaire

Quoique présentant un grand nombre de points communs avec les installations hydrauliques classiques, les centrales hydro-solaires posent un certain nombre de problèmes particuliers. En premier lieu, citons l'évaluation du taux d'évaporation (hauteur de la tranche d'eau évaporée en un an) qui est à la base de l'économie du projet, puisqu'il fixe le débit disponible. La détermination des apports naturels dans le bassin, dans le cas d'une centrale en dépression, se pose ici de façon différente que pour une centrale hydraulique normale, car il convient de tenir compte des apports par infiltration à travers le sol, apports sensibles seulement par l'humidité du sol, et difficile à évaluer avec précision.

L'accroissement continu de la salinité dans le bassin ou dans la dépression, pour n'être généralement pas grave demande, néanmoins, à être examiné de près. La production d'énergie au cours de la phase transitoire, avant que l'état de régime normal ne soit atteint, pose des problèmes peu courants. Enfin, il n'est pas jusqu'à l'utilisation de l'énergie des centrales hydro-solaires qui ne soulève certaines difficultés du fait de l'éloignement des centres habituels de consommation. L'énergie devra-t-elle être transportée, ou convient-il, au contraire, de l'utiliser sur place par des industries électrochimiques, ou à la préparation d'eau douce? C'est une question qui devra être examinée dans chaque cas.

EVAPORATION

Il existe un bon nombre de formules permettant théoriquement de calculer la quantité d'eau évaporée par une nappe d'eau en un temps donné. Ces formules sont de deux sortes. Les unes, comme la formule de BOWEN, sont basées sur l'évaluation du pourcentage d'énergie solaire absorbé par l'évaporation. Les autres, d'ailleurs les plus nombreuses, font intervenir certaines caractéristiques de l'atmosphère surmontant la nappe d'eau. Elles sont basées en gros sur le fait que la quantité d'eau évaporée est proportionnelle à la différence entre la tension de vapeur saturante à la température de la surface liquide et la tension de vapeur de l'air.

La formule de BOWEN établit un bilan énergétique de l'insolation de la nappe d'eau. La quantité d'eau évaporée est :

$$E = \frac{(I - B - S - C)}{L(1 + R)}$$

I l'énergie contenue dans la radiation incidente, est assez facile à déterminer;

B l'énergie absorbée ou réfléchiée par l'atmosphère ne soulève pas de grosses difficultés pour son évaluation, si on connaît la nébulosité moyenne du lieu considéré;

S représente l'énergie absorbée par l'eau en profondeur (ici commencent les difficultés);

C est un terme correctif, tenant compte des échanges de chaleur par les bords ou des apports ou pertes de chaleur par les apports d'eau naturels;

L est la chaleur de vaporisation de l'eau. Enfin,

R est un terme correctif tenant compte des caractéristiques de l'air ambiant. Il s'écrit :

$$R = \frac{0,46(t_1 - t_2)}{P_1 - P_2} \frac{P}{760}$$

t_1 , étant la température de la surface de l'eau en degrés centigrades;

t_2 , la température de l'air;

P_1 , la tension de vapeur saturante à la température t_1 en millimètres de mercure;

P_2 , la tension de vapeur dans l'air et,

P, la pression barométrique.

Les formules de la deuxième catégorie s'efforcent de faire apparaître les éléments intervenant dans la diffusion de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. La formule de THORNTHWAITTE et HOLMANN, par exemple, est basée sur des mesures faites dans l'atmosphère à deux altitudes différentes, Z_1 et Z_2 , au-dessus de la nappe d'eau.

D'après cette formule, la quantité d'eau évaporée, exprimée en inch par heure, est :

$$E = \frac{833 K^2 (e_1 - e_2) (v_2 - v_1)}{(T + 459,4) \log_e (Z_2/Z_1)^2}$$

avec K = constante de KARMAN = 0,4.

e_1, e_2 = tension de vapeur dans l'air en inch de H_g aux altitudes Z_1 et Z_2 ;

v_1, v_2 = vitesse du vent en mille par heure aux altitudes Z_1 et Z_2 ;

T = la température moyenne en degrés Fahrenheit.

On peut admettre que de telles formules permettent d'évaluer l'évaporation d'une nappe d'eau existante, sur laquelle peuvent être effectuées les mesures des éléments entrant dans les expressions considérées. Mais elles ne sont pas d'un grand secours pour déterminer l'évaporation d'une nappe non existante ou d'une nappe qui se trouvera dans des conditions de surface et de profondeur différentes des conditions actuelles. Cette difficulté tient essentiellement au fait que les éléments avec lesquels sont bâties les formules d'évaporation dépendent étroitement de la quantité à calculer. Elles supposent en fait le problème physiquement résolu. Dès lors, la seule façon de s'en tirer est d'opérer par analogie avec des mesures faites dans des conditions à peu près semblables.

Un élément fondamental qui n'apparaît pas dans les formules pour la raison que nous venons de donner, c'est l'importance de la nappe d'eau et surtout sa profondeur. Toutes choses égales d'ailleurs, l'évaporation sera plus forte sur une nappe d'eau de faible profondeur que sur une nappe de grande profondeur, car l'eau

FIG. 2. — Influence de la profondeur de la nappe d'eau d'après S.T. HARDING.

s'échauffe plus vite avec une faible profondeur. Ce fait est mis clairement en évidence par les cycles annuels d'évaporation relevés sur certains lacs. Sur un lac peu profond, l'évaporation suit assez exactement les variations saisonnières de températures moyennes. Par contre, sur un lac profond, l'inertie thermique de la masse d'eau intervient de telle façon que l'évaporation suit avec un retard l'évolution de la température moyenne. A égalité de température moyenne, l'évaporation du mois de juin, par exemple, sera plus faible que celle du mois d'août, car l'eau est moins chaude en juin qu'en août.

Dans le cas d'une nappe d'eau de faible profondeur moyenne (de l'ordre de 5 m) et d'après des mesures effectuées sur des lacs, on peut établir une certaine correspondance entre la température moyenne de l'air et le taux d'évaporation. Cette correspondance est évidemment assez approximative puisqu'elle ne tient pas compte de facteurs comme la vitesse du vent, le degré de turbulence de l'atmosphère, le degré hydrométrique de l'air avant son passage sur la

FIG. 3.
Evaporation
en fonction
de la température.

nappe, etc. Néanmoins, telle quelle, cette correspondance donne des ordres de grandeur raisonnables pour l'évaporation des nappes d'eau de faible profondeur.

D'autre part, des mesures d'évaporation sur l'Atlantique et le Pacifique donnent quelques valeurs approximatives pour les nappes d'eau de grande profondeur. Ces chiffres doivent d'ailleurs être majorés dans le cas des mers fermées ou presque fermées comme la Mer Rouge dont les eaux sont plus chaudes que celles des océans. La majoration doit être un peu plus grande pour le Golfe Persique dont la profondeur moyenne est faible. Il faut enfin tenir compte du fait que le taux d'évaporation est réduit de quelques % par la présence du sel dans l'eau.

Les chiffres que l'on obtient ainsi montrent nettement qu'une fraction seulement de l'énergie solaire est absorbée sous forme de chaleur de vaporisation. Dans le cas de la Mer Rouge, par exemple, le rayonnement solaire moyen est de l'ordre de 0,14 cal/m²/s, ce qui utilisé intégralement à l'évaporation permettrait d'évacuer une

tranche d'eau d'un peu plus de 7 m par an. L'évaporation sur laquelle il faut compter pratiquement paraît être de l'ordre de 2,50 m à 3 m par an.

Notons à ce propos que l'énergie hydraulique, récupérable dans une installation hydro-solaire,

FIG. 4. — Evaporation pour l'océan Atlantique d'après SVERDRUP.

ne représente qu'une très petite fraction de l'énergie thermique rayonnée sur la surface d'évaporation. Pour fixer les idées, prenons le cas d'une installation sur la Mer Rouge, le rayonnement solaire fournit environ 1 kW/m² pendant 3.000 heures par an, soit 3.000 kWh par an par m². Avec une évaporation de 3 m par an et une installation fonctionnant sous 50 m, l'énergie disponible par an est de 0,42 kWh par m²; le rendement est donc de 1,4/10.000; ce rendement croît proportionnellement à la chute utilisée mais reste toujours extrêmement faible. En dépit de la valeur très faible du rendement compté à partir de l'énergie solaire, l'installation est parfaitement rentable car les travaux se réduisent aux ouvrages de fermeture ou de communication, alors que toute la surface du bassin est intéressée. On compense le mauvais rendement par l'importance de l'énergie mise en jeu, et finalement le prix du kWh garde une valeur raisonnable.

PHASE TRANSITOIRE

La phase transitoire qui précède le fonctionnement en régime normal est un aspect particulier des usines hydro-solaires. Le problème est différent suivant qu'il s'agit d'une usine du type marine ou du type dépression. Considérons d'abord le cas de l'usine marine.

Lorsque la fermeture du bassin est complète, il faut attendre un temps assez long avant que le niveau dans le bassin ne soit abaissé par évaporation à la cote convenable pour l'exploitation régulière; ce temps, quotient de la chute désirée par le taux d'évaporation, ne peut pas être modifié. Il y a donc une période assez longue pendant

FIG. 6.
Phase transitoire
pour
une installation
hydrosolaire
de dépression

l'énergie théorique disponible est donnée par l'aire $A B' C'$ égale d'ailleurs à l'aire $A B C$. L'énergie supplémentaire produite est représentée par l'aire $A D E F$ dont il faut déduire l'énergie perdue par accroissement des pertes de charge dans la conduite d'amenée, accroissement qui limite l'emploi du procédé.

2° On peut établir à une cote h_2 , intermédiaire entre le fond h_0 et la cote finale h_1 , une usine provisoire travaillant avec le débit normal Q_1 . Cette usine fonctionnera jusqu'à l'instant t_2 où elle sera noyée, et produira une énergie correspondant à l'aire $A D' E' F'$. Il est également possible de prévoir pour cette usine intermédiaire un accroissement de débit, comme il est indiqué plus haut, ce qui fournira l'énergie correspondant à l'aire $A D'' E'' F''$.

Notons enfin que ces procédés provisoires d'accroissement de production ne sont valables que dans la mesure où on a la possibilité d'absorber ce surcroît d'énergie.

ACCROISSEMENT DE SALINITE DU BASSIN

Dans tous les sites qu'il est possible d'envisager, les installations hydro-solaires sont alimentées par de l'eau de mer; or, si l'eau est évacuée par évaporation dans le bassin aval, les sels contenus dans l'eau, par contre, s'y accumulent. Il en résulte un accroissement continu de la salinité du bassin. A égalité de taux d'évaporation, l'accroissement est d'autant plus rapide que la profondeur du bassin est plus faible. Si la hauteur d'eau dans le bassin était égale à la hauteur évaporée en un an, on atteindrait l'état de saturation au bout d'une durée de dix ans environ. Mais, étant donné la profondeur du bassin utilisable, la saturation de l'eau sera obtenue au bout d'une période beaucoup plus longue atteignant ou dépassant un siècle. A partir du moment où la saturation est atteinte, le sel com-

mence à se déposer, mais l'évaporation continue à jouer jusqu'à ce que le niveau du sel déposé atteigne le niveau du plan d'eau de régime. C'est à partir de ce moment seulement que la puissance de l'installation décroît sérieusement par suite de la diminution de la chute utilisable.

Il est vrai qu'auparavant la diminution du taux d'évaporation par accroissement de salinité provoque déjà une diminution d'énergie. Dans le cas le plus défavorable où la profondeur d'eau dans le bassin est égale à la tranche d'eau évaporée en un an, il faut compter sur une durée totale de fonctionnement de l'ordre d'une cinquantaine d'années, mais dans la plupart des sites utilisables, la durée de fonctionnement normale est de plusieurs siècles.

Mise à part une baisse du taux d'évaporation, l'accroissement de salinité ne présente pas d'inconvénient particulier dans les installations en dépression. Pour les installations marines, l'accroissement de salinité aura une répercussion sur la faune du bassin, mais il faut remarquer que cet accroissement est très long dans ce cas, de sorte que, tout au moins pendant une certaine période, on peut compter sur une adaptation de la faune aux nouvelles conditions.

UTILISATION DE L'ÉNERGIE

Les sites les plus intéressants se trouvant dans les régions arides, il est évident que dans la majorité des cas les centres normaux de consommation seront à une distance assez grande. On peut alors se demander s'il convient de transporter l'énergie produite et comment, ou si, au contraire, il est préférable d'établir à proximité de la centrale des installations capables de consommer l'énergie disponible. L'industrie chimique ou électro-métallurgique offre à ce sujet des possibilités que la présence du sel ne fait que favoriser. La première idée qui se présente à l'esprit est la production de magnésium à partir du chlorure de magnésium contenu dans l'eau de mer. L'eau de mer, par addition de lait de chaux, donne un précipité de magnésie qui, traité par l'acide chlorhydrique, donne le chlorure de magnésium. Par électrolyse à la cuve de WARD, on obtient le magnésium. On compte environ une consommation de 20 kWh par kg de magnésium, plus l'énergie consommée dans l'usine pour pomper les saumures et alimenter les différents appareils.

Il n'est pas exclu d'utiliser l'énergie à traiter des minerais éventuellement disponibles dans la région où se trouvent les centrales.

Une autre possibilité réside dans la fabrication d'eau douce. Une telle fabrication serait d'un grand intérêt dans des régions naturellement dépourvues d'eau utilisable. Plusieurs procédés permettent d'obtenir de l'eau douce à partir de l'eau

de mer. Les procédés par distillation ou par congélation sont au point, mais le prix de l'eau ainsi obtenue est encore assez élevé. Le procédé de l'électrodialyse paraît offrir des possibilités intéressantes.

On arrive, en effet, pour un dessalage de 20.000 à 300 mg de chlore par litre à une consommation d'énergie de l'ordre de quelques kWh par m³. Une installation de dessalage par électrodialyse, prévue pour traiter 1.000 m³ par jour, conduirait actuellement à un prix de 130 fr. par m³ avec un investissement de 50 millions de fr. Il semble d'ailleurs que le prix de revient du m³ puisse être sérieusement réduit par un accroissement de la production.

L'installation des centrales hydro-solaires soulève encore beaucoup d'autres questions parmi lesquelles il convient de citer les influences géophysiques :

- Influences sur le climat de la région considérée, cet aspect peut d'ailleurs devenir l'élément dominant;
- Influences sur la nappe phréatique des régions avoisinant le bassin d'évaporation;
- Influences sur l'équilibre de la croûte terrestre, surtout sensibles pour des projets intéressants une grande surface, comme le projet de la Mer Rouge.

Les problèmes de Génie Civil, s'ils se posent parfois à une échelle encore inusitée, ne sont pas particuliers aux installations hydro-solaires.

Les principales installations hydro-solaires réalisables

Nous nous proposons seulement d'indiquer, avec quelques chiffres à l'appui, les possibilités des principaux sites qui peuvent être équipés :

MÉDITERRANÉE

Avec une surface de 2.105.000 km², à laquelle il faut ajouter les 360.000 km² de la Mer Noire, la Méditerranée assure une évaporation importante. Ses côtes, généralement très abruptes, sont telles que la surface d'évaporation diminue peu lorsque le niveau baisse, ce qui est très favorable. A la cote — 50, on peut encore compter au total sur 2.200.000 km². En admettant une évaporation moyenne dans l'année de 1 m (chiffre faible), on obtient un débit évaporé de 70.000 m³/s à la cote — 50, ce qui représente une puissance disponible de 28.000.000 de kW, et une énergie annuelle de 245 milliards de kWh. La fermeture du détroit de Gibraltar, avec ses 15 km de large et 450 m de profondeur, pose un problème, mais le volume d'enrochement nécessité par cette fermeture n'est nullement hors de proportion avec l'importance de l'énergie mise en jeu. Ce volume est en effet de l'ordre de 3 milliards de m³, soit 1 m³ d'enrochement pour 82 kWh par an, ce qui est très favorable.

Le débit évaporé par la Méditerranée est assuré par trois sources distinctes :

1° Les précipitations;

FIG. 7

2° L'apport de l'Atlantique par le courant de Gibraltar;

3° Les apports des fleuves.

Il en résulte que la modification de salinité du bassin sera lente. La présence des fleuves conduirait à construire sur chacun d'eux une usine particulière, ce qui est assez avantageux car, de ce fait, une partie des usines productrices serait voisine des centres de consommation (l'usine principale restant celle de la digue de Gibraltar).

Si ce projet présente des aspects favorables, deux points, par contre, en contrarient la réalisation. L'apport important de débit par les fleuves contribue à augmenter la durée de la période d'attente entre le moment de la fermeture et celui où l'état de régime normal est atteint. Etant donné que le débit des fleuves principaux se déverse dans la Mer Noire, le projet pourrait être complété par une fermeture de la Mer Noire, dont les évaporations compensent sensiblement les apports. Il y a enfin un aspect du problème étranger à la production d'énergie qui est d'un poids considérable; c'est la modification importante qu'un tel projet apporterait à la vie de tout le bassin méditerranéen. L'ensemble des installations portuaires et des agglomérations correspondantes serait à déplacer. Ces modifications seraient vraisemblablement trop importantes pour qu'un tel projet puisse être retenu.

LA MER ROUGE

Nous rencontrons ici des conditions beaucoup plus favorables qu'en Méditerranée. Le taux d'évaporation est beaucoup plus élevé, les apports naturels extrêmement faibles et l'activité humaine sur les rives très réduite. A l'échelle du projet, la navigation par le Canal de Suez n'est pas un obstacle insurmontable. Des écluses devront seulement être prévues aux extrémités Nord et Sud du bassin. La Mer Rouge présente au niveau normal une superficie de 425.000 km² en communication avec l'Océan Indien par le détroit de Bab-el-Mandeb, large seulement de 25 km. La plus grande profondeur de la Mer Rouge est à la cote — 2.360, et les fonds évoluent, d'une façon très favorable, par suite du caractère de zone d'effondrement. A la cote — 50, la superficie est de 375.000 km² et encore 220.000 km² à — 200. L'évaluation du taux d'évaporation n'est évidemment qu'approximative, mais compte tenu de la température élevée de l'eau dans ce bassin presque fermé, on conserve une marge de sécurité en prenant 2,50 m par an.

Il n'est pas possible d'envisager le fonctionnement d'une usine à la cote la plus favorable pour la production d'énergie, car le niveau dans le bassin devrait être ramené au voisinage de la cote — 700 : la période d'attente serait beaucoup trop

grande. Il faut donc limiter la chute à une valeur telle que la période transitoire ne soit pas trop longue; un abaissement de 50 m paraît être encore admissible. Voici quelques chiffres indiquant, en fonction de l'abaissement du niveau, l'énergie disponible.

Les temps d'attente indiqués peuvent évidemment être réduits par une exploitation transitoire. L'accroissement de salinité est lent puisque la salinité de la Mer Rouge serait doublée seulement au bout d'une période de l'ordre de un siècle. Il n'y a donc pas, de ce fait, de problème dans l'immédiat.

Abaissement	Temps d'attente	Débit m ³ /s	Puissance installée kW	Energie annuelle kWh/an
10 m	4 ans	32.800	2.600.000	23 millions
20 m	8 ans	32.000	5.070.000	45 —
30 m	12 ans	31.200	7.400.000	65,5 —
40 m	16 ans	30.500	9.600.000	85 —
50 m	20 ans	30.000	12.000.000	105 —

Au point de vue Génie Civil, l'installation comprendrait une digue de fermeture du détroit de Bab-el-Mandeb, un ensemble d'écluses sur cette digue et un ensemble identique à Suez. L'usine peut occuper deux emplacements : soit sur la digue avec alimentation par l'Océan Indien, soit à Suez avec alimentation par canal par la Méditerranée. Cette dernière solution est plus coûteuse que la précédente, mais elle rapprocherait l'usine du centre de consommation et permettrait d'économiser un transport d'énergie sur une distance de 2.500 km.

La fermeture du détroit de Bab-el-Mandeb serait réalisée (fig. 8) par une digue en enrochement avec masque d'étanchéité. Les éléments pris sur les rives seraient transportés par bateaux à fonds ouvrants jusqu'au lieu d'utilisation. Plusieurs tracés peuvent être envisagés pour la digue : le tracé A le plus court relie le Ras Si Ane sur la côte africaine à l'île de Perim, ce qui représente une distance de 20,500 km avec une profondeur maximum de — 256 m. Un autre tracé B plus au nord relie le Ras Dumeira sur la côte africaine à l'île de Perim par une digue en arc de cercle de 30 km de long. Ce tracé suit une ligne de haut fond et atteint seulement en un point la cote — 200. Enfin, la fermeture serait achevée par une petite digue de 4 km avec des fonds de 15 à 20 m entre l'île de Perim et le cap de Bab-el-Mandeb.

Des relevés de fonds plus détaillés que ceux

nissant annuellement une énergie de 15 milliards de kWh. Enfin, conséquence non négligeable, l'abaissement du niveau d'eau, en découvrant de nouveaux terrains, offre des possibilités à l'industrie pétrolière.

La fermeture du détroit d'Ormuz comprendrait une digue en enrochement avec écluse de navigation. Le tracé le plus favorable comporte une digue de 50 km avec une profondeur maximum de — 86 m et deux éléments de digue totalisant 8 km à faible profondeur. Le volume total des enrochements nécessaires est de l'ordre de 400 millions de m³, soit 1 m³ pour 37,5 kWh par an. Ce projet apparaît donc comme moins favorable que celui de la Mer Rouge.

Examinons maintenant les possibilités d'exploitation de quelques usines en dépression.

LAC ASSAL (fig. 10)

Sur le territoire des Somalis françaises, au fond du Golfe de Djibouti, se trouve à peu de distance de la côte une dépression atteignant — 170 m. La forme de cette dépression, avec bords à forte pente, est particulièrement favorable. La cote — 100, au voisinage de laquelle se situe un changement de pente, apparaît comme la plus avantageuse pour établir le plan d'eau. Le fond est actuellement occupé par un lac salé, mais en relevant le niveau à — 100, on dispose d'un gain de surface d'évaporation de 120 km².

En première approximation, on peut compter sur un taux d'évaporation de 2,50 m, valeur confirmée par la connaissance de la surface du plan d'eau actuel, et des apports naturels dans la dépression. Dans ces conditions, la puissance disponible est de l'ordre de 8.000 kW, soit une production annuelle de 67 millions de kWh. L'énergie supplémentaire disponible pendant la période de remplissage est de l'ordre de 1 milliard de kWh justifiant un équipement provisoire. Le volume de la dépression est tel que l'installation définitive pourrait fonctionner pendant 7 siècles avant que le dépôt de sel atteigne la cote — 100. Du point de vue du Génie Civil, la disposition du lieu est très favorable. Le débit de 10 m³/s demandé par la centrale serait amené par une canalisation de 7,600 km, comprenant une galerie de 3,600 km entre la mer et la cote 0 de la dépression, un canal de 2 km suivant la ligne 0, et une conduite en charge de 2 km. Quoique étant d'une puissance relativement faible, le site du Lac Assal apparaît comme remarquablement intéressant pour l'installation d'une centrale hydro-solaire. L'énergie obtenue au Lac Assal permettrait soit la production de 3.000 tonnes de magnésium par an, soit l'adoucissement de 20 millions de m³ d'eau par an.

LAC ASSALÉ

La dépression du lac Assalé située à faible distance des côtes d'Erythrée est longue de 200 km environ, avec une largeur moyenne d'une trentaine de km. Elle présente à la cote 0 une étendue approximative de 5.000 km², sa profondeur

FIG. 10. — Projet de centrale hydrosolaire du lac Assal

maximum est de — 120 m. C'est au voisinage de la cote — 40 que se situe le maximum d'énergie disponible (cette cote est d'ailleurs estimée par défaut, par suite du manque de précision des données topographiques, mais d'après l'allure du relief au voisinage des bords de cette zone d'effondrement, il semble qu'il soit possible de compter sur une cote inférieure, ce qui augmenterait l'énergie disponible). A la cote — 40, on dispose d'une surface de 3.200 km², dont il faut déduire environ 500 km² actuellement partiellement recouverts d'eau. Avec un taux d'évaporation de 2,50 m, on dispose d'un débit de 215 m³/s, ce qui, compte tenu des pertes de charge dans la canalisation d'amenée, permet d'équiper une centrale de 60.000 kW, produisant annuellement 540.000.000 de kWh. Ainsi qu'il a été dit, ces chiffres constituent plutôt une sous-estimation de l'énergie disponible. Le canal d'amenée aurait une longueur de 25 km seulement; étant donné l'étendue de la nappe d'eau une telle installation aurait une influence favorable certaine sur le climat local; aussi un tel projet apparaît-il très intéressant.

DÉPRESSION DE KATTARA

Cette importante dépression, située dans le désert à l'ouest de l'Égypte, présente une étendue de 19.000 km² à la cote 0 et une profondeur maximum de — 137 m. A la cote — 50, la surface d'évaporation disponible est de 10.000 km², ce qui, avec un taux d'évaporation de 2 m, permet d'évacuer un débit de 630 m³/s. L'équipement comprendrait une usine de 250.000 kW capable de produire annuellement 2 milliards de kWh. A côté de la production d'énergie, il faut considérer l'influence climatique due à la présence d'une importante nappe d'eau dans une région initialement aride. Mais à cet élément favorable vient s'opposer le coût des ouvrages de Génie Civil. En effet, les 630 m³/s évacués par l'évaporation doivent être acheminés de la mer à la dépression par une canalisation longue de plus de 60 km, et d'une section suffisante pour éviter des pertes de charge excessives.

DÉPRESSION DU SUD TUNISIEN

Les Chotts Melrhir et Rharsa dans le sud tunisien offrent des conditions d'exploitation qui présentent, en plus accentués, les caractères rencontrés à propos de la dépression de Kattara. Ces deux chotts ont une étendue totale à la cote 0 de 7.290 km² avec une profondeur maximum de — 25 m dans le chott de Rharsa et de — 31 m dans le chott Melrhir. Le taux d'évaporation admissible dans cette région est de l'ordre de 2 m. La cote qui paraît la plus avantageuse se situe aux alentours de — 15 m pour laquelle la surface d'évaporation est de 4.900 km² et le débit disponible de 310 m³/s. Mais où apparaît la difficulté, c'est que l'extrémité est du chott Rharsa est à 180 km de la mer.

Fig. 11

On peut penser utiliser le chott el Djerid pour y aménager un canal, mais celui-ci étant au-dessus du niveau de la mer, une station de pompage devient nécessaire. L'installation se présenterait alors de la façon suivante : une station de pompage au bord de la mer refoule le débit nécessaire jusqu'à la cote + 20 dans le canal aménagé dans le chott el Djerid. La cote atteinte à l'extrémité ouest du chott el Djerid serait + 15. De là une conduite de 20 km de long amènerait le débit à la centrale dans le chott Rharsa avec une perte de charge de 5 m, ce qui laisserait une chute utilisable de 25 m. Dans ces conditions, l'usine fournirait 62.000 kW, mais la station de pompage absorberait 70.000 kW. On peut améliorer ce bilan en adoptant une cote plus basse

pour le plan d'eau d'évaporation. En l'établissant à — 25, le débit serait réduit à 168 m³/s, car la surface n'est plus alors que de 2.650 km². La puissance de la centrale serait dans ces conditions de 47.000 kW, et celle absorbée par la station de pompage de 40.000 kW. Le bilan énergétique est alors bénéficiaire mais des travaux supplémentaires doivent être entrepris pour acheminer l'eau de l'usine jusqu'aux fonds de — 25 m. Il y a lieu de dire que, temporairement, durant la période de remplissage, on disposerait d'un important excédent d'énergie, qui ne pourrait toutefois être utilisé que dans la mesure où les canalisations permettraient d'acheminer le débit correspondant dans des conditions économiques.

Finalement on voit qu'un tel projet doit être orienté plus sur les conséquences climatiques que sur la production d'énergie, et la rentabilité d'une telle installation est très problématique. Notons que l'aménagement d'une petite dépression, la Sebkra de Moknine sur la côte tunisienne entre Sfax et Sousse, est envisagé à titre expérimental; cette installation serait d'une puissance moyenne d'environ 200 kW.

Les chiffres que nous venons de donner dans ce rapide exposé doivent être considérés comme des ordres de grandeur des possibilités des différents sites. Il est évident que les études plus détaillées sont susceptibles de les modifier de façon appréciable. Néanmoins, tels quels, ils font ressortir le très grand intérêt de l'équipement du Lac Assal et de la dépression du Lac Assalé. Ils mettent enfin en avant les ressources considérables qu'offre la Mer Rouge.

BIBLIOGRAPHIE

- ADDISON AND SHOTTON. — Collecting Galleries along the Mediterranean coast of Egypt and Cyrenaica. *Water and Water Engineering*, aug. 1946.
- DEGOUTIN. — *Annales des Mines*, 12^e série, Mémoires, T. II, 1922.
- MAURICE DREYFUS. — Etudes géologiques et géographiques des Somalies françaises. Thèse.
- S. T. HARDING. — Evaporation from free water surfaces. *Physic of the Earth. Hydrology*, edited by Meinzer.
- LINSLEY KOHLER PAULHUS. — Applied Hydrology.
- J. LUGEON. — Précipitations atmosphériques. Ecoulement et hydro-électricité.
- MAURER UND LUTSCHG. — Einige Ergebnisse über die Verdunstungsgrösse freier Wasserflächen im schweizerischer Hochgebirge. *A.N. der Schweizmeteor Zentral Anstalt*, Zurich, 1923.
- SHOTTON. — Water supplies adjacent to the Cairo-Alexandria desert road. *Water and Water Engineering*, sept. 46.
- HAMED SULEIMAN. — Groundwater table in the Libyan desert. Commission Internationale des Irrigations et du Drainage.
- H. V. SVERDRUP. — On the evaporation from the oceans. *Sears Foundation Jour. Marine Research*, vol. I, n° 1.
- WEGELIN. — Déminéralisation d'eau salée par électrodialyse. *Bulletin du Centre Belge d'Etude et de Documentation des Eaux*, 1953/III.
- G. A. WHETSTONE. — La Houille d'Or, *Water Power*, jul. 1954.