QUELQUES CONSIDÉRATIONS SUR LE CHOIX DU SYSTÈME PRISE-REJET DES GRANDS AMÉNAGEMENTS THERMIQUES SELON LEUR LOCALISATION

par **J.-C. LEBRETON**

Chef du Département Laboratoire National Hydraulique
de Chatou

et **R. BONNEFILLE**

Chef de la Division Hydraulique Maritime
du Département L.N.H.

Dans les perspectives actuelles d'un développement accéléré des grands aménagements thermiques d'E.D.F., deux faits importants conduisent à considérer avec attention les problèmes posés par la source froide :

- d'une part, la puissance installée sur un même site atteint souvent dix fois celle qu'on envisageait il y a dix ans : 5 000 MW par exemple contre 500 MW;
- d'autre part, la valeur attribuée à la qualité de l'eau a considérablement augmenté, ce qui va sans doute conduire au contrôle plus étroit de cette qualité.

Ajoutons également que l'emploi de la filière nucléaire et en particulier des réacteurs à eau légère conduit à rejeter à la source froide 60 à 70 % de l'énergie thermique consommée par la centrale (50 % dans le cas des centrales au fuel). On comprendra alors aisément que les débits de réfrigération en circuit ouvert se chiffrent par centaines de mètres cubes par seconde, et que le choix et l'optimisation d'un circuit de réfrigération soient des problèmes économiques importants.

Si la capacité de refroidissement de nos fleuves a pu être évaluée pour montrer que la saturation thermique sera rapidement atteinte^(*), il n'en est pas de même des estuaires et du littoral. On peut donc, pour ces deux derniers cas, imaginer les sites les plus importants et se poser la question des limites d'ordre hydraulique ou thermique qui pourraient apparaître.

^(*) Simulation du comportement d'un réseau hydrographique équipé d'un ensemble de centrales thermiques. Application au bassin de la Seine, par J. JACQUET et R. GRAS, XI^e Journées de l'Hydraulique 22-24/9/1970.

Nous allons essayer de faire le point des idées actuelles sur la conception des prises et rejets de gros débits afin de mettre en relief les précautions à prendre dans les divers cas.

Les problèmes ne sont pas les mêmes suivant que les aménagements sont en bordure d'un estuaire, le long d'un rivage ou à proximité d'un port. Nous distinguerons donc ces trois grands types.

1. — Aménagement le long d'un estuaire

Les estuaires, en tant qu'axe de pénétration des grands navires, sont des sites privilégiés pour installer de grands aménagements thermiques.

L'aménagement d'un ou de plusieurs sites le long d'un estuaire mérite un examen particulier, du fait que le milieu « estuaire » constitue un équilibre délicat sur les plans hydraulique, sédimentologique et écologique. C'est donc à une échelle globale qu'il convient d'aborder la question de l'effet des aménagements sur l'équilibre apparent de l'estuaire; et pour se convaincre de ce fait il suffit d'imaginer que cinq aménagements de 5 000 MW électriques soient réalisés tous les 20 km le long d'un estuaire de 100 km. C'est environ 50 000 MW thermiques qui seront apportés à l'estuaire, puissance qu'il convient de comparer à celle des plus fortes marées dans nos grands estuaires : 500 MW.

Quel peut être l'effet sur le milieu d'une telle énergie avant qu'elle ne passe dans l'atmosphère ?

Examinons plus en détail les phénomènes en cause. Nous nous limiterons aux phénomènes thermiques, hydrauliques, sédimentologiques, et nous dirons quelques mots des effets produits sur l'écologie de l'estuaire.

Sur le plan thermique une première question, qui n'a pas de réponse satisfaisante, concerne la capacité de refroidissement d'un estuaire. Notre connaissance des « fuites » à la surface libre, et surtout à l'embouchure, est encore insuffisante pour « intégrer » sur une marée les phénomènes et faire un bilan significatif. Les modèles mathématiques de diffusion actuellement utilisés pour la diffusion du sel devraient cependant permettre de répondre rapidement à cette question.

A l'échelle fine, le bon fonctionnement d'un site suppose l'absence ou la limitation du recyclage, ce qui ne pose pas de problème pour de faibles débits même en présence du courant alternatif dû à la marée. Ainsi pour des débits de réfrigération de 50 m³/s, prise et rejet peuvent être assez près l'un de l'autre (distance inférieure à la centaine de mètres) sans qu'il y ait de grands risques, à condition de rejeter l'eau en surface et de favoriser son étalement. Pour des débits plus importants (100 m³/s) l'expérience actuelle révèle de légers recyclages avec une élévation de 1 ou 2 degrés à la prise.

Pour des débits encore plus gros, le problème n'est plus le même; la nappe d'eau chaude d'épaisseur à peu près constante risque de venir élever la température à la prise, puis de diffuser au sein de la source froide jusqu'à ce que du fait des échanges atmosphériques s'établisse un nouvel équilibre thermique réduisant le rendement de l'installation et pouvant dépasser les limites réglementaires imposées à la qualité de l'eau. On ne connaît pas de moyens simples pour définir une distance économique prise-rejet dans ce cas. Il est probable d'ailleurs que les ouvrages d'adduction seraient alors très coûteux puisqu'à chaque marée l'excursion des particules d'eau atteint des dizaines de kilomètres. On cherchera plutôt à profiter au maximum des dispositions susceptibles d'allonger le trajet de l'eau entre prise et rejet. Ainsi installe-t-on de préférence la centrale dans une île ou près d'un confluent. On peut également chercher à placer la prise près de la rive opposée à la centrale, mais en songeant à l'approfondissement futur toujours possible du chenal de navigation (fig. 1). Ces problèmes de génie civil ont des conséquences sur le coût de l'aménagement et ceci d'autant plus que les ouvrages sont plus importants... Il faut, en effet, se rendre compte que les dimensions des ouvrages sont de l'ordre de grandeur ou parfois supérieures à celles de la centrale. Supposons par exemple qu'il convienne d'aspirer un débit de 500 m³/s dans un estuaire; il paraît sage de ne pas dépasser une vitesse d'aspiration de 20 cm/s, soit un front de prise de 1 000 m sur 2 m de profondeur (à basse-mer). Il est en effet nécessaire de réduire les vitesses de prise et corrélativement de rejet pour ne pas perturber la navigation : risque d'attraction des petites embarcations, dérive des bateaux plus importants et surtout des convois remorqués. Il convient donc, avant de choisir les sites, de s'intéresser à la navigation locale ou éventuellement de prévoir son indemnisation.

Un autre problème, plus subtil, se pose à propos des estuaires à fond de vase. Les mouvements des fonds de vase et plus spécialement la tenue des chenaux de navigation sont sous la dépendance de l'hydraulique fine de l'écoulement, à savoir les courants secondaires, les répartitions verticales de vitesse et de différence de densité dues au mélange des eaux de mer et fluviales. Or, prélever ou introduire un débit de quelques centaines de m³/s dans un écoulement alternatif dont le maximum ne dépasse

guère quelques milliers de m³/s, n'est pas une opération négligeable. Les conditions hydrauliques seront évidemment modifiées (fig. 2); cela ne veut pas dire cependant que les modifications du second ordre qui gouvernent la sédimentation seront suffisamment perturbées pour que l'état sédimentaire de l'écoulement soit changé, mais il faudrait s'en assurer. Les moyens d'études, que ce soient des modèles physiques ou mathématiques, sont à mettre au point. Des méthodes d'études nouvelles sont à découvrir pour saisir ce qui est essentiel dans ces phénomènes, par exemple quels sont les paramètres à surveiller tout particulièrement; dans quelle voie faut-il développer les techniques de mesure? Une seule chose est certaine : les mesures de l'état initial s'étendant sur une longue période (2 à 3 ans) sont nécessaires; elles permettent d'abord de définir, tout au moins juridiquement, l'état initial, ensuite de comprendre ce qui se passe afin d'essayer d'en prévoir les modifications.

En définitive, lorsque est envisagée l'installation d'un grand aménagement thermique le long d'un estuaire, il faut songer aux préjudices causés à la navigation, soit par création de courants traversiers, soit par modifications des conditions de dépôt et érosion actuelle et donc à leur influence sur le maintien du chenal de navigation.

A ces problèmes, il convient d'ajouter ceux de nature écologique; la faune marine aspirée peut périr, soit par décompression dans les siphons, soit par destruction mécanique ou chimique, celle-ci volontairement pour se débarrasser d'une espèce particulièrement envahissante, comme les moules. Dans le cas de zone à vocation piscicole ou ostréicole, le problème est à considérer avec attention. Que se passera-t-il après réchauffement de l'ordre de quelques degrés centigrade d'une zone marine importante? Une règle de conduite pourrait être la suivante : les estuaires sont des domaines écologiquement plus riches que la mer; il vaut donc mieux prendre l'eau en estuaire, à faible vitesse s'entend, et la rejeter dans la mer où les dilutions sont plus rapides et la faune plus robuste, donc profiter des promontoires à l'entrée des estuaires (fig. 3); mais dans ce cas les canaux de rejet (ou d'amenée) risquent de devenir très longs et donc d'être d'un coût prohibitif.

Il est aussi nécessaire de s'assurer que les ouvrages de prise ne se trouvent pas dans une zone portuaire future. En effet, au moment des dragages des bassins ou des nouveaux chenaux de navigation, l'eau aspirée contiendra de fortes quantités de matières en suspension préjudiciables aux installations de refroidissement, et dont il est vain de vouloir se débarrasser par un désableur de dimensions non prohibitives. Ce problème est d'ailleurs celui de l'interaction entre deux grands aménagements thermique et portuaire, qu'il est bon de concevoir ensemble.

2. — Aménagement le long d'un littoral

Dans ce cas les facteurs techniques et humains sont les plus importants. En supposant en effet que le site ne soit jamais un site portuaire, les problèmes techniques sont de trois ordres :

Le site est certainement très exposé à la houle, sinon il serait un site portuaire. Il sera donc nécessaire de construire des ouvrages en mer capables de résister aux tempêtes, donc de les concevoir en utilisant la technique des travaux maritimes et, au préalable, de les étudier sérieusement sur modèle réduit après une série de campagnes

de mesures de houle suffisamment longues (5 ans au moins, au minimum 18 mois).

Pour éviter le recyclage de l'eau chaude, prise et rejet seront éloignés au minimum « économique ». Dans le cas des mers sans marée, la solution classique est la prise au large reliée à terre par une conduite dans un épi immergé ou émergent, et un rejet à la côte sans précautions spéciales. Dans le cas des mers à marée il est de plus envisageable de disposer prise et rejet à la côte, sans qu'il soit nécessaire de trop les éloigner (de toute façon il paraît difficile de sortir des limites du terrain de la centrale); il suffirait de les utiliser alternativement comme prise ou rejet au rythme des courants de marée (fig. 4). Ce système présenterait en outre l'avantage d'empêcher la formation et la prolifération des coquillages.

Les sites lagunaires méritent une attention particulière. Excluant le cas où la lagune est suffisamment étendue pour servir naturellement d'échangeur de chaleur avec l'atmosphère, le problème est de savoir s'il vaut mieux disposer la prise en mer ou dans la lagune. La prise en mer pose le problème de la lutte contre son ensablement et de son influence sur le rivage, car la présence d'un cordon littoral

suppose l'existence d'un transport littoral. Dans ce cas il convient de profiter des promontoires rocheux ou des zones en érosion pour disposer la prise. L'inconvénient est que les ouvrages d'amenée risquent d'être coûteux; en revanche la lagune joue le rôle de long canal de rejet, réduisant les risques de recyclage de l'eau chaude. Il n'y aura pas de problème de maintien du « grau » de sortie de la lagune, mais il faudra veiller à la pérennité du cordon littoral, donc en définitive aménager une défense du littoral en cas de transport littoral prédominant (fig. 5).

Il ne semble pas prudent de disposer la prise dans la lagune, car il faudrait des ouvrages importants pour assurer en toutes circonstances l'accès de l'eau à la lagune. Dans le cas des mers à marée, ce dernier point est à reconsidérer, car la lagune peut être alors utilisée comme réservoir à haut niveau rempli à chaque pleine mer. Le gain sur l'énergie de pompage et sur des déblais de fondation de l'usine ne sont pas négligeables; il n'y a plus de problème de rejet, ni de recyclage si le rejet est à l'aval de la prise à pleine mer. En revanche la prise d'eau devient un ouvrage important, muni de vannes, et justiciable d'un avant-port de protection (fig. 6).

1/ Schéma de prise et rejet éloignés en estuaire.

4/ Exemple de prise et rejet le long d'une côte.

2/ Dynamique des sédiments en estuaire.

5/ Exemple d'aménagement d'une lagune le long d'une mer sans marée.

3/ Zone privilégiée d'implantation des aménagements thermiques.

6/ Exemple d'aménagement d'une lagune le long d'une mer à marée.

7/Exemple de position de la prise dans une mer sans marée.

8/Exemple d'aménagement thermique au large.

La perturbation sédimentologique due aux ouvrages nous ramène aux problèmes humains. Si le site n'est pas portuaire, il est balnéaire, généralement pour des raisons climatiques, ou il est touristique, pour des raisons de beauté naturelle. Il est pratiquement impossible d'installer un rejet de quelques centaines de m^3/s en côte sableuse sans en détruire l'équilibre, sans l'amputer d'une zone balnéaire et sans nécessiter un aménagement de défense du littoral.

Notons, à titre d'exemple, que l'installation d'une centrale sur une côte sableuse avec plage en pente douce conduit à des ouvrages de prise en « épis » de plusieurs kilomètres donc d'un prix très important, la prise devant être assez profonde pour éviter d'aspirer de l'air par forte houle et assez « haute » pour ne pas aspirer le sable mis en mouvement par la houle.

Les études de mise en suspension du sable par la houle montrent que la couche de forte teneur en sable a une épaisseur de l'ordre de 20 % de la profondeur; la concentration de la suspension de sable est sensiblement constante au-dessus de 40 % de la profondeur. Il est donc conseillé de disposer les orifices de la prise à une profondeur comprise entre 0,6 et 0,7 fois la profondeur totale. Il faut évidemment que la prise ne soit pas dans la zone de déferlement, c'est-à-dire soit plus au large que la zone de profondeur égale à 1,7 fois les creux des plus grandes houles locales. En résumé, dans les mers sans marée, il semble prudent de disposer la prise par une profondeur de l'ordre de grandeur du double des plus grands creux, les orifices étant entre 0,6 et 0,7 fois la profondeur, ce qui laisse une garde presque égale au creux (fig. 7) de la houle entre le sommet de la prise et le fond du creux des

vagues. Dans le cas des mers à marée, si le marnage est inférieur aux plus grands creux, il est sage d'adopter la même règle par rapport au niveau des plus basses mers. Si le marnage est important, compte tenu de l'occurrence faibles des tempêtes à très basse mer, il est possible de disposer la prise dans une zone de profondeur égale à 1,5 fois le marnage de vive eau exceptionnelle.

Lorsque l'occupation du littoral est problématique, il est une solution dont on parle déjà Outre-Atlantique : elle consiste à déplacer la prise et le rejet assez loin en mer et à installer la centrale au large, sur une île artificielle ou sur pilotis, ce qui serait très intéressant en cas d'aménagement utilisant un combustible liquide ou gazeux. Le problème est alors la « sortie » de l'énergie, à moins de la consommer sur place en insularisant l'industrie, voire la ville. La même solution est applicable aux centrales des usines de dessalement de l'eau de mer alimentant le continent en eau « propre » (fig. 8).

3. — Les aménagements en site portuaire

Ce cas est le plus intéressant; la pollution esthétique n'est plus en cause : une centrale a sa place dans un complexe industriel et portuaire. La tâche des projecteurs des sorties de lignes ou d'implantation des unités sera peut-être plus ardue parce qu'ils devront tenir compte des voisins tout aussi puissants qu'eux. En revanche, les problèmes de prise et rejet sont beaucoup plus faciles à résoudre; les prises et rejets peuvent être disposés dans des bassins très éloignés, par exemple la prise dans le port, le rejet à l'extérieur du port dans une zone qui n'est pas balnéaire et sans contribuer au déséquilibre du littoral plus que le port lui-même.

Le seul point important est la gêne que peuvent apporter les courants à la navigation dans les bassins. De ce point de vue, la solution prise dans les bassins est la meilleure, car une prise est moins perturbatrice qu'un rejet. En revanche, les travaux de dragage dans le port risquent d'être préjudiciables, généralement par les dragages d'entretien, mais les dragages d'extension, effectués avec de gros moyens. Il est donc absolument nécessaire qu'un grand aménagement thermique soit considéré comme partie intégrante du complexe industriel d'un port. Il convient de le concevoir en même temps que le port, au même titre qu'une darse, qu'une usine de traitement ou qu'un réseau ferroviaire de desserte. C'est donc finalement un problème de coordination entre différentes administrations qu'il faut résoudre, surtout au niveau prévisionnel, les problèmes techniques étant secondaires dans ce cas.

*
**

En conclusion, nous avons soulevé surtout des questions et présenté quelques possibilités qu'il convient de vérifier dans chaque cas, puisqu'il n'y a pas de solution générale, mais plusieurs conceptions possibles selon le site choisi. On peut retenir cependant que cette vérification rend de plus en plus indispensable l'examen du bilan thermique à côté du bilan hydraulique, ces deux problèmes étant d'ailleurs liés puisque l'échauffement de l'eau induit des effets dynamiques sur les écoulements à la source froide.

Discussion

Président : M. J. DE CHESSE

Je vous remercie M. BONNEFILLE, dit M. le Président, de nous avoir clairement présenté une synthèse des solutions possibles d'installations d'usines fortes consommatrices d'eau. Nous avons senti que vous aviez une préférence pour les estuaires et les ports, préférence justifiée notamment par l'espoir que la pollution que peuvent produire de telles usines, lorsqu'elles sont dans un milieu déjà polluant, peut passer un peu plus inaperçue. Je pense que les Autorités qui s'occupent de ces questions ne sont pas du même avis, mais il est bien évident qu'*a priori* la tâche est plus facile dans les ports.

Des questions sont-elles posées ?

M. GUITON a écouté avec beaucoup d'intérêt l'exposé de M. BONNEFILLE, qui, comme prévu, est venu compléter sur certains points la communication qu'il a présentée lui-même ce matin; en particulier, il partage le point de vue des auteurs sur le risque de rupture de l'équilibre physique et écologique du fait de la création ou de l'extension de prises d'eau à fort débit.

M. POUSSE intervient dans les termes suivants :

M. BONNEFILLE a parlé d'emplacements de centrales thermiques en bord de mer et en sites sauvages comme d'une éventualité à écarter. Je pense que l'on peut trouver des sites rocheux et des eaux profondes qui se prêteraient très bien sur le plan technique à l'implantation de centrales thermiques; certains d'entre eux ne sont pas très éloignés de la région parisienne, grosse consommatrice d'énergie; moyennant quelques précautions sur le plan de l'esthétique industrielle et sous la condition que la centrale ne soit pas située trop loin d'un port ad hoc, de tels emplacements peuvent présenter *a priori* un intérêt pouvant justifier une étude technico-économique au stade de la prospection; au surplus, tous les sites dits sauvages ne sont pas exempts d'installations (militaires en particulier).

M. le Président pose à M. BONNEFILLE la question suivante :

Peut-on envisager, pour l'avenir, la possibilité de remplacer en partie les essais sur maquettes ou modèles réduits, parfois longs de construction d'abord, d'exploitation ensuite, par des modèles mathématiques, en particulier pour l'étude de la houle.

S'il s'agit d'hydraulique pure, sans relation avec des phénomènes sédimentologiques (sables, vases, etc.), répond M. BONNEFILLE, on peut prévoir que, dans un avenir relativement proche, on utilisera surtout des modèles mathématiques et on réservera les modèles physiques pour résoudre des problèmes locaux (problèmes de stabilité par exemple). Dans le cas des modèles à caractère sédimentologique, on n'en est pas encore là, car on ne peut traiter dans un modèle mathématique que des phénomènes dont on connaît les lois physiques.

M. REMENIERAS attire l'attention sur l'importance — par rapport aux calories apportées par les rejets des centrales thermiques — des flux d'énergie dus au rayonnement solaire sur les grands plans d'eau. Il reprend l'exemple d'un estuaire de 100 km de longueur et 10 km de largeur maximum, soit une surface du plan d'eau de 500 km² ou 500×10^6 m². A midi, au solstice d'été, par ciel clair, le flux solaire tombant sur un tel estuaire totalise (à raison de 1 kW/m²) 500 millions de kW; si, 1/10 seulement du flux incident est transformé en chaleur, cela représente 50 millions de kW thermiques, répartis dans l'ensemble de l'estuaire; même si l'on admet que le flux solaire moyen journalier est de l'ordre du dixième du maximum admis ci-dessus, il demeure important par rapport à celui apporté par une grande centrale thermique. Mais quelle est la répartition de ce dernier entre les diverses zones de l'estuaire ?

Abstract

**Study of various possible designs
for water intake and outlet systems of large power stations,
considering hydraulic plant operating problems
and site suitability**

With the speed-up in Electricité de France's large nuclear power plant programme, total megawatt capacity on a single site may now be in the order of 10 times what it was ten years ago. Cooling water requirements for such capacities amount to several hundred cubic metres per second.

When studying the various hydraulic, sediment-transport, heat-dissipation and ecological problems associated with cooling circuits, one should distinguish between power plants sited in estuaries, on the sea coast and in ports.

(i) For plants on an estuary site, one of the first problems is to decide on the cooling capacity which the estuary can provide. This requires knowledge of the disturbances to estuarine equilibrium liable to be caused by heated effluents. This problem should be studied both locally at the site and from the standpoint of the estuary as a whole. Mixing characteristics between different-density fluids in the estuary must be known.

Another problem is to design the intake and outlet system in such a way that no inconvenience is caused to shipping (e.g. by creating cross-currents in the estuary) and that hydraulic or thermal pollution effects do not disturb estuarine fauna or flora.

A further problem relates to sediment behaviour, which depends

on detailed flow features and may therefore be decisively altered by cooling water draw-off. In many estuaries, fine sand and silt brought down from upstream form sandbanks which are very sensitive to small variations in river flow.

(ii) For coastal plants, as for plants in estuaries, the recycle problem arises. Various solutions are studied for tidal sites (alternating intake and output) and for sites on lagoons.

Water intake operation is linked with the silting problem which cannot be separated from the problem of structure stability under breaking waves.

A design method is proposed for determining correct intake submergence when waves cause sand particles to become suspended. These difficulties may be avoided by putting the power plant "in the sea" i.e. on an artificial island.

(iii) For port-sited plant, intake and outlet problems are considerably simpler because intake and outlet may be placed in separate pools or docks which are not connected with each other. Care should be taken to ensure that there are no cross-currents liable to endanger shipping and also that dredging operations do not prohibit use of the cooling circuit.