Le problème des prises et rejets d'eau en mer des centrales nucléaires de grande puissance

PAR

A. Bellin

Chef de la Division Sites

ET

P. Vannetzel

Ingénieur

à la Direction de l'Équipement d'E.D.F.

Introduction

Tant que la transformation de l'énergie nucléaire en énergie électrique passera par l'énergie mécanique, il sera difficile de se libérer du principe de Carnot : la source froide et les ouvrages d'eau des centrales demeureront donc des éléments importants des centrales auxquels l'ingénieur restera très attentif.

Source froide et ouvrages d'eau sont des termes très généraux, même lorsqu'ils sont restreints au cas des centrales en bord de mer. L'exposé qui suit n'abordera pas ces sujets dans le détail, mais cherchera plutôt à cadrer les données essentielles et dégager une certaine typologie parmi la très grande variété de combinaisons qu'engendrent des terrains et des mers différents.

Il abordera successivement :

- l'avenir des centrales en bord de mer;
- les caractéristiques essentielles des sources froides liées aux types de sites et aux ouvrages de prise et rejet;
- les différents types de sites et ouvrages d'eau associés;
- les différents systèmes prise-rejet.

Le nombre des centrales en bord de mer augmente

UN PREMIER CONSTAT

Les éléments du tableau ci-après traduisent une évolution très nette : E.D.F. s'intéresse de plus en plus au littoral pour implanter ses centrales.

	Sur tout le territoire français	En bord de mer
Centrales en exploitation ou en construction	~ 40	Dunkerque 500 MW 4 Le Havre 1 450 MW Martigues 1 000 MW Cordemais 2 000 MW
Centrales en construction et en projet	11	Gravelines 4 Paluel Blayais Port-la-Nouvelle
Sites envisageables	~ 40	~ 20

POURQUOI ?

Lorsque la première tranche de Dunkerque a été mise en service, en 1962, c'était le palier 125 MW qui constituait la base des équipements E.D.F. Une centrale de 500 MW, équipée de quatre tranches, nécessitait alors un débit de réfrigération inférieur à 20 m³/s, somme toute, un débit pouvant se trouver sur bon nombre de rivières : d'ailleurs, à cette époque, on construisait surtout sur rivière, ceci permettant d'éviter des ouvrages à la mer toujours plus difficiles à concevoir, à construire et à exploiter et ce faisant plus onéreux.

Maintenant, une centrale nucléaire, équipée de 4 tranches de 1 350 MW, telle que E.D.F. en étudie le projet à Paluel, nécessite selon l'échauffement, un débit de 170 à 250 m³/s, soit à peu près le débit moyen de la Seine à Paris : cette simple comparaison montre que les centrales refroidies en circuit ouvert sur rivière appartiennent au

passé et que, pour le présent et le futur, E.D.F. n'a pour l'instant que deux possibilités :

- la réfrigération en circuit ouvert en bord de mer;
- la réfrigération en circuit fermé sur rivière.

Tout cela explique, très schématiquement, pourquoi parmi la quarantaine de sites envisageables, une vingtaine se trouvent sur le littoral.

LE LITTORAL N'EST PAS POUR AUTANT UNE SOLUTION MIRACULEUSE

En effet, si pendant longtemps le littoral a été considéré comme le bout du monde, zone inhospitalière où seuls les marins se risquaient, ce n'est plus le cas maintenant et les centrales disputent leurs terrains au tourisme, à l'industrie, la pêche, l'agriculture et, depuis peu, au tiers sauvage : sur le littoral, les problèmes d'aménagement du territoire sont très complexes et ceci d'autant plus que le littoral a pris une valeur psychologique que nous ne pouvons ni devons négliger.

Les sources froides

Le littoral présente tout de même des avantages considérables qui seront simplement rappelés car ils ont déjà été traités au cours des sessions précédentes.

D'une manière générale et schématique,

- la présence de masses d'eau importantes, en général en mouvement;
- l'existence de surfaces d'échanges immenses,

autorisent le rejet de quantités de chaleur très importantes, sans provoquer des échauffements inadmissibles pour le milieu.

Les calories rejetées dans le milieu marin ne font qu'y transiter entre la source de chaleur, que représente le rejet du condenseur, et le puits de chaleur, que constituent les échanges atmosphériques. Entre ces deux pôles, le mécanisme de transfert se fait par convection et dispersion dans les courants. On peut distinguer deux zones dans les taches thermiques :

- un champ proche qui est directement sous l'influence des dispositions respectives de la prise et du rejet;
- un champ lointain qui ne dépend pas de cette disposition mais uniquement de la puissance installée et des caractéristiques du site.

La capacité de dispersion d'un site et les mécanismes qui la composent varient considérablement suivant le littoral où se trouve le site (fig. 1).

EN MÉDITERRANÉE

Les courants de marée sont faibles devant les courants locaux d'origines multiples (vents, houle, courants généraux...). Les phénomènes de dispersion sont imposés par la météorologie de la basse atmosphère et présentent de ce fait un caractère très irrégulier. La faiblesse des courants entraîne un mélange peu énergétique des eaux rejetées et ces dernières vont rester en surface. La flottabilité des eaux

est confirmée par l'existence, en été, d'une thermocline à — 30 m avec un $\Delta t = 10^\circ\text{C}$.

Pour étudier le champ proche du rejet, le Laboratoire National d'Hydraulique utilise un modèle mathématique de jet flottant soumis à l'action du vent et des courants locaux. Dans cette zone, où l'on constate que les échanges atmosphériques sont négligeables, le facteur essentiel est la dilution, le jet entraînant par sa vitesse les masses d'eau voisines : il y a donc une décroissance rapide de la température et de la vitesse du jet.

Dans le champ lointain, indépendant des conditions de rejet, on utilise un modèle bidimensionnel résolvant les équations des écoulements (comprenant les termes de convection, de dispersion et d'échanges atmosphériques) et l'équation de la chaleur, les conditions aux limites étant données par des mesures *in situ*.

EN MANCHE

Il existe une certaine régularité dans la capacité de dispersion due aux marées; les marées importantes qui balayent la Manche et sa faible profondeur assurent un brassage énergétique des eaux et une homogénéisation de la température sur toute verticale. Cette homogénéité permet de ne considérer que la température moyenne sur une verticale : dans ce cas, on utilise un modèle de jet homogène pour le champ proche.

Outre l'importance des courants de marée, un facteur influent de la dispersion des calories est constitué par la dérive, différence de parcours des particules liquides entre le flot et le jusant; c'est le principal facteur de renouvellement des eaux, elle limite la recirculation différée des eaux échauffées. La figure 2 donne une idée, dans le cas de Paluel, de l'importance des surfaces échauffées et de l'influence de la dérive.

EN ATLANTIQUE

En général, ce seront des situations intermédiaires entre la Manche, avec courants importants liés aux marées, et la Méditerranée, mer sans marée où l'influence des vents est prépondérante.

L'étude de la courantologie atlantique ne fait que débiter et nous avons sans doute bon nombre de découvertes hydrodynamiques et thermiques à y faire.

LE POSITIONNEMENT DU SYSTÈME PRISE-REJET

Il se déduira de l'étude de la tache thermique de façon à éviter, autant que faire se peut, la recirculation directe des calories. Ainsi, en Méditerranée, la position de la prise par rapport au rejet doit être opposée à la direction que prend le panache sous l'effet des vents ou des courants les plus fréquents.

Jusqu'à présent, les projets de centrale prévoyaient un rejet à la côte et une prise au large; cette disposition permet de puiser une eau plus froide et d'avoir un amortissement de la houle par la longueur des conduites ou canaux d'amenée : il faut alors éviter que la prise ne soit dans la zone de déferlement de la houle; de plus, sa position par rapport au fond est déterminée, dans le cas d'une tour de prise, par le fait que l'aspiration ne doit pas créer de vortex entraînant de l'air dans la prise ni se trouver dans la couche de forte teneur en sable (fig. 3).

1 / Panaches thermiques comparés d'une centrale en Manche et d'une centrale en Méditerranée pour des conditions météorologiques « moyennes »
Puissance installée : 5000 MW

2 / Surfaces échauffées

3 / Position d'une prise dans une mer sans marée

4 / Modification rapide de la ligne de rivage due aux ouvrages

Des études récentes ont été engagées pour comparer les avantages et les inconvénients d'une prise à la côte. Dans ce cas, l'accès à la prise est aisé et permanent avec tous les avantages qui en découlent; par contre, il faut prévoir un dispositif d'amortissement de la houle et l'aspiration se fait dans une zone où les eaux peuvent être chargées.

LA CONSTRUCTION D'OUVRAGES SUR LE LITTORAL

La construction d'ouvrages tels qu'un canal de prise risque de produire deux effets sur la sédimentation. Le premier est une interruption du transport littoral, que ce soit du sable sur une côte sableuse ou des galets comme sur le littoral du pays de Caux, qui provoquerait une accumulation des sédiments d'un côté de l'ouvrage et une érosion de l'autre côté. Si le débit de transport est faible, on peut assurer sa continuité par dragage et dépôt d'une façon discontinue. Le deuxième effet est une modification des conditions d'approche de la houle près du rivage. Même en l'absence de tout transport littoral résultant, de nouvelles conditions d'approche de la houle peuvent modifier la ligne du rivage. Prenons, par exemple, une ligne de rivage nord-sud en équilibre sous l'action de houles portant alternativement au nord et au sud (fig. 4). Un ouvrage incliné vers le nord crée une zone d'abri pour la houle portant au nord, il en résulte que le sable accumulé au nord de l'ouvrage, par la houle portant au sud, ne peut plus être repris et forme un dépôt. En dehors de la zone d'abri, le transport vers le nord se nourrit par emprunt de sable au rivage au nord de la zone d'abri et une érosion de volume sensiblement égal au dépôt se produit. Le même phénomène a lieu au sud de l'ouvrage. Cette modification de rivage est difficilement combattue par des dragages car les débits en

jeu peuvent être nettement plus importants que ceux correspondant au transport littoral résultant.

Typologie des sites

En laissant de côté les implantations de centrales le long des estuaires, qui constituent des équilibres délicats sur les plans hydraulique, sédimentologique et écologique et qui, de ce fait, nécessiteraient une étude particulière, les sites peuvent être classés en trois groupes : centrale en zone portuaire, centrale en plage sableuse et centrale en falaise.

LES PORTS

Ceux-ci développent de vastes zones industrielles et sont des sites privilégiés pour installer les grands aménagements nucléaires. Le prototype des implantations de ce genre sera la centrale nucléaire de Gravelines. Pour des raisons de sécurité, la centrale se trouvera en général à la périphérie du port, soit sur des fondations naturelles en bordure de plage comme à Gravelines, soit sur un terrain remblayé sur la mer comme il avait été proposé pour le futur port de Sète. Les ports étant par nature des zones abritées, l'avantage consiste à placer la prise d'eau dans l'un des bassins et à effectuer le rejet directement en mer; la liaison bassin de prise-pompe de circulation se fait par canal à ciel ouvert ou par conduites enterrées. L'obstruction de la prise d'eau par une embarcation ou un plaquage de celle-ci doivent être évités de même que la prise ne doit pas être une gêne pour les navires à quai. Dans le port, la prise ne constitue

5 / Centrale sur plateforme avancée

pas une gêne pour la navigation; en effet, la prise se comportant comme un puits de potentiel, les vitesses induites par l'aspiration varient en $1/r$ et deviennent rapidement négligeables; seul le voisinage immédiat, bateau à quai par exemple, peut être soumis à des courants. Si le fait de placer la prise dans le port évite la recirculation directe, par contre, la tache thermique est augmentée de la surface du port par rapport à un site en côte nue, car les eaux du port sont échauffées à une température constante du fait du faible renouvellement de ses eaux.

LES PLAGES SABLEUSES

Elles ont en commun une pente assez faible, de l'ordre de 1 %, ce qui implique des ouvrages d'amenée d'eau de grande longueur si la prise est située à des cotes marines de -15 m. Un des principaux éléments à prendre en compte est l'amplitude du marnage. Sur une mer à marée, par exemple pour les sites proposés en Manche Orientale ou sur la façade Atlantique, la prise ne doit pas être mise hors d'eau à marée basse; d'où des longueurs d'ouvrage beaucoup plus importantes, à pente égale, que pour des sites en mer Méditerranée comme Port-la-Nouvelle. Un autre problème important est la présence de sable, ce qui est gênant, non seulement pour le circuit de refroidissement, mais aussi pour les fondations de la centrale et particulièrement du bâtiment réacteur. Les tassements différentiels sont toujours à craindre; la centrale de Gravelines, qui est en construction sur un terrain sableux, a nécessité un décapage du sol sur trois à quatre mètres et la confection, sur cette même hauteur, d'une dalle plastique composée de trois matériaux et destinée à répartir les efforts sur le sable.

LES FALAISES

La marée a le même effet que précédemment mais, d'une manière générale, la pente du fond est plus accentuée et les longueurs de prise moins grandes. Le paramètre important est la nature du rocher. Du fait que la centrale est implantée sensiblement au niveau de la mer pour ne pas avoir de grandes hauteurs de pompage, les terrassements sont toujours très importants. Le volume atteint plusieurs millions de mètres cubes et les difficultés soulevées croissent avec la qualité du terrain. Deux exemples suffiront : Paluel, dans le pays de Caux, présente une falaise de craie de 70 m de haut, et Flamanville, dans le Cotentin, une falaise de granit de 90 m. Il se pose alors le problème de l'emploi de tels volumes de roches. Comme, dans la plupart des cas, il ne sera pas possible de jeter ces matériaux à la mer, on peut les utiliser à faire des ouvrages à la mer, corps de digue pour le système prise-rejet par exemple, ou les céder à des industries diverses. Mais là encore la qualité de la roche intervient : une craie, comme celle de Paluel, est impropre pour une cimenterie à cause des bancs de silex, et impropre à la construction de digue car elle est de mauvaise qualité. Si le rocher convient pour former une digue en enrochements, encore faut-il pouvoir le découper en blocs d'environ dix tonnes, masse nécessaire pour assurer la stabilité de l'ouvrage. Une solution, qui permet de limiter le volume des déblais et de leur trouver un emploi sur place, est actuellement à l'étude : elle consiste à n'entailler la falaise que sur une surface correspondant à l'îlot nucléaire et non pas à toute la centrale (fig. 5). Les déblais produits par cette excavation sont utilisés pour créer une plateforme en avancée sur la mer : sur cette avancée on implante alors les salles des machines et les stations de pompage. On envisage même de prolonger les digues de protection de façon à créer un bassin de

6 / Canal de prise d'eau

7 / Prise d'eau et galerie

8 / Prise d'eau
et conduites sous-marines

prise; la prise d'eau ne se ferait plus loin en mer mais proche de la plateforme.

Systèmes prise-rejet

Face à la diversité des sites, le projeteur dispose de quatre conceptions de base pour les ouvrages d'eau. Dans la suite, nous ne nous occuperons que des ouvrages de prise mais les solutions sont aisément transposables aux ouvrages de rejet.

LES CANAUX À CIEL OUVERT (fig. 6)

L'ouvrage se compose de trois parties : un chenal de prise, un ensemble de grilles et un chenal d'amenée. Le plafond du chenal de prise a une largeur et une cote constante, ses berges sont draguées à une pente qui est stable pour le site; cette pente peut être augmentée sensiblement par l'emploi de tapis de protection poreux et résistant à la traction. Le chenal est limité par deux digues dont un exemple est celui de l'avant-port de Dunkerque. L'ensemble de grilles, qui se situe à l'enracinement des digues, forme une barrière contre la houle et empêche les entrées de matériaux. Il se présente comme une succession de radiers et de piles, entre lesquels sont implantées les grilles; de chaque côté de cet ouvrage, un mur en aile massif et un rideau de palplanches s'appuient sur les berges du chenal jusqu'à la digue. Les piles supportent un pont permettant la circulation des engins de dégrillage. Le canal d'amenée est creusé à la même cote que le chenal de prise et conduit l'eau jusqu'aux stations de pompage qui sont implantées le long d'un quai vertical.

Dans cette solution, il faudra prévoir des dispositifs pour atténuer la houle devant la station de pompage, jusqu'à des amplitudes très faibles.

La solution canal à ciel ouvert sera traitée plus en détail dans un autre exposé de cette même séance.

LES GALERIES SOUTERRAINES (fig. 7)

Elles constituent une excellente solution lorsque le sol est une roche tendre, de la craie par exemple, comme à Paluel. L'eau est aspirée par des tours de prise dont la forme peut être cylindrique ou tronconique. Les galeries

ont un diamètre assez grand de façon que l'eau ait une vitesse inférieure à 3 ou 4 m/s, vitesses qui requièrent un excellent état de surface. Les galeries débouchent, par des puits verticaux, dans un bassin de répartition qui joue le même rôle que le chenal d'amenée dans la solution « canal ». Cette solution sera traitée en détail dans un autre exposé du point de vue technique d'exécution.

L'AMENÉE D'EAU PAR CONDUITES IMMERGÉES (fig. 8)

L'amenée d'eau par conduites immergées comporte une prise d'eau en mer, des conduites immergées et un bassin d'alimentation des pompes. La prise d'eau se fait au moyen de tours de prise comme dans le cas des galeries souterraines. Les conduites, dans leur partie proche de la tour, sont simplement posées sur le fond dans une souille. Pour franchir le cordon littoral, on peut les enterrer et elles débouchent alors dans le bassin de répartition sans qu'il y ait de coude; on peut aussi les laisser simplement posées sur le sol et le déversement dans le bassin nécessitera un coude, ce qui posera des problèmes de siphonage, le coude étant naturellement plus élevé que le niveau de la mer. A l'entrée du bassin, les conduites sont ancrées par un ouvrage de tête qui, tout en isolant le bassin de la mer, doit permettre de fermer une conduite pour révision et d'introduire un engin de nettoyage. Le bassin a le même rôle de répartition que dans les solutions précédentes et il fournit un volant d'eau nécessaire entre les conduites et la station de pompage pour absorber des variations rapides de débit. Cette solution des conduites immergées a déjà été adoptée à l'étranger pour l'alimentation des centrales thermiques : les conduites étaient soit en acier soit en béton.

LE PONT-CANAL (fig. 9)

Une dernière solution est le pont-canal qui n'est réalisable qu'avec station de pompage en mer, car tout siphonage par conduites aériennes, du fait de l'importance de leurs dimensions, aboutit à des dépressions incompatibles avec leur fonctionnement. La station est faite de caissons préfabriqués et comporte filtres et pompes. Les conduites aériennes sont constituées par les évidements internes de section trapézoïdale d'un pont caisson, dont les tronçons préfabriqués sont de deux sortes : les éléments d'appui, en T renversé, disposés symétriquement sur les piles et les éléments de travée, en T, posés entre deux éléments d'appui.

9 / Tour de prise d'eau et aqueduc

pui. Côté mer, des conduites circulaires font la jonction avec le refoulement des pompes et, côté terre, une culée reçoit les conduites. Entre la culée et la centrale, le schéma comporte des conduites car leur remplacement par un bassin nécessiterait un refiltrage des eaux. Cette solution présente un inconvénient majeur : en cas de rupture du pont aqueduc, par un navire par exemple, l'alimentation en eau de la centrale est brusquement interrompue, ce qui ne saurait être admis.

Conclusion

Il convient de souligner :

- que l'implantation des centrales modernes fera de plus en plus appel au littoral; dans cette voie, la France a la

chance de disposer de plusieurs milliers de kilomètres de côtes avec des mers bien ventilées et bien brassées : ce qui n'est pas le cas pour bon nombre de pays fortement industrialisés;

- que, chaque site ayant ses caractéristiques propres, il n'est pas question de prévoir des solutions de prise et rejet normalisées.

C'est pourquoi nous avons présenté plusieurs conceptions possibles d'ouvrage et soulevé les problèmes inhérents à la structure du site ou à la nature de l'ouvrage. Il faut préciser que les études de principe sur la définition des ouvrages d'eau (disposition prise-rejet, taches thermiques...), bien que n'étant qu'à leur début, héritent des connaissances déjà acquises en hydraulique et, en particulier, font largement appel aux modèles réduits. L'étude des techniques d'exécution ne fait que débiter et les prochaines réalisations verront probablement naître des procédés originaux.

*Cette communication a été discutée en même temps que celle de M. P. DUFFAUT.
On trouvera le texte de cette discussion à la page 513.*