Problèmes posés par la réfrigération des centrales de grande puissance situées sur le littoral

par J.-C. Lebreton

Chef du Département Etudes Générales, Programmes, Sites, Environnement
Direction de l'Équipement d'Électricité de France

Introduction et définitions

Quoique constituant des généralités de mieux en mieux connues, nous rappellerons un certain nombre de faits prospectifs caractérisant le développement de l'énergie électrique au cours des trente prochaines années.

En fin de siècle, la consommation annuelle devrait être proche de 1 000 TWh, correspondant à une *puissance appelée* à la pointe de 175 GW. Il faudra disposer alors d'une *puissance installée* de 200 GW, dont 35 seraient des moyens de production de pointe et 165 GW des moyens de base.

La production de base sera assurée en totalité ou presque par des centrales nucléaires nouvelles et, si l'on estime à 4 % la progression de la consommation en l'an 2000, ce qui implique la mise en construction de 35 GW à cette date, on constate qu'il faut mettre en chantier entre 1974 et 2000 : $165 + 35$, soit 200 GW, moins les 15 GW actuellement en construction, soit au minimum 185 GW. Ceci est bien un minimum puisqu'il n'a pas été tenu compte des arrêts progressifs des centrales thermiques ou nucléaires ayant plus de vingt ou trente années de service.

En prenant une valeur moyenne pour la puissance implantable pour chaque site, on trouverait le nombre minimum de sites à ouvrir. Le choix d'une telle valeur peut résulter de considérations diverses :

- modulation des puissances installées en fonction de la répartition des centres de consommation;
- limitation ou renforcement du réseau de grand transport;
- limitation des modifications apportées à l'environnement.

Ce choix s'avère extrêmement complexe, et aucun élément décisif ne permet d'avancer aujourd'hui des chiffres certains et valables en toute circonstance. Il est raisonnable cependant de considérer 5 GW comme une puissance implantable dans la majorité des sites qui sont à l'étude.

Aller plus loin résultera en partie d'études comme celles qui seront exposées aujourd'hui.

C'est, en effet, la capacité de réfrigération de la source froide qui constitue le paramètre essentiel pour le dimensionnement des centrales électriques nucléaires, une fois le site d'implantation choisi.

Sur les fleuves et rivières, la réfrigération en circuit ouvert, dans laquelle l'eau qui prélève les calories ne passe qu'une fois dans le condenseur, se trouve limitée par les débits d'étiage; compte tenu de la normalisation des réacteurs et des centrales, il est difficile d'envisager plus de 25 GW au total sans faire appel à la réfrigération en circuit fermé, dans laquelle l'eau qui prélève les calories au condenseur les transfère à l'atmosphère par un échangeur, le réfrigérant atmosphérique, avant de retourner au condenseur.

Le problème est tout autre sur le littoral ou en estuaire, par suite du haut pouvoir de dilution des courants marins. Le circuit ouvert s'impose alors mais son fonctionnement s'avère plus complexe, du fait de l'inversion fréquente des courants dans les mers à marée, ou du caractère très variable des courants de vent sur le littoral méditerranéen.

Très schématiquement, la première question qui se pose revient alors à connaître pendant une période de référence — marée, cycle des courants, ou du vent — l'évolution et la forme des isothermes ou, plus exactement, des courbes d'égal échauffement. En mer peu profonde et bien brassée, ces courbes seront peu différentes sur toute la profondeur, et l'échauffement aura une structure quasi bi-dimensionnelle dès qu'on s'éloignera du point de rejet, comme l'indiquent les modèles qui seront décrits dans la communication du professeur Curtet.

Vue l'étendue de la zone influencée par le rejet, il serait prohibitif d'implanter la prise d'eau totalement en dehors de cette zone et un recyclage partiel paraît inévitable pour certaines configurations des courants.

Notons au passage l'importance de cette notion de recyclage ou, ce qui revient au même, de renouvellement des masses liquides.

Lorsqu'une masse liquide sort du rejet, elle a, selon le moment choisi, une certaine probabilité d'être réaspirée à la prise après une excursion dans le milieu récepteur plus ou moins longue.

Si l'excursion la plus courte correspond au trajet direct du rejet à la prise d'eau, c'est le recyclage « direct » qui ne se produit que si le courant porteur de la masse d'eau est orienté vers la prise.

L'excursion peut également correspondre à une marée ou plus. Au bout d'un certain temps, d'ailleurs, que l'on peut appeler la « période » des échanges atmosphériques, l'échauffement de la masse d'eau aura baissé de moitié. Le recyclage aura alors moins d'importance.

Dans une mer à marée, le recyclage périodique des masses d'eau est inévitable du fait du va-et-vient des courants de marée. Si ces courants étaient tels que les trajectoires des particules soient fermées, le recyclage des eaux serait permanent et aucun renouvellement des masses liquides pompées ne se produirait. L'échauffement limite résulterait de l'équilibre entre les échanges atmosphériques et l'apport continu de calories.

En fait, les trajectoires ne se rebouclent jamais exactement et les masses d'eau dérivent lentement.

Il en résulte un renouvellement plus ou moins rapide du volume d'eau, influencé par le rejet et, du même coup, une réduction plus ou moins grande de l'échauffement de ce volume.

Si la dérive était telle que les masses d'eau ne passent qu'une seule fois devant le rejet, il suffirait de connaître la période des échanges atmosphériques, la trajectoire des particules et le coefficient de dilution ou de mélange le long de cette trajectoire, pour avoir l'échauffement en tout point. En général, cependant, le phénomène est plus complexe, car une partie des masses d'eau repasse plusieurs fois devant le rejet et l'échauffement en tout point résultera d'une combinaison des trois processus de convection, de diffusion et d'échange atmosphérique.

Echelles des rejets thermiques

L'importance des rejets thermiques dépend du rendement du cycle thermodynamique, rendement qui varie légèrement selon la filière des réacteurs nucléaires et selon la température de la source froide : à titre d'exemple, on considérera les deux filières les plus probables actuellement, ce sont :

- les réacteurs à eau légère dont le rendement est voisin de 33 % ;
- les réacteurs à neutrons rapides dont le rendement est voisin de 40 %.

Nous donnerons, pour ces deux filières, des estimations des rejets lorsque la température de la source froide est à 15 °C.

Pour les premiers, une énergie électrique produite de 1 kWh entraîne le rejet à la source froide de 1 650 kcal.

Pour les seconds, le même kWh entraîne un rejet d'environ 1 250 kcal à la source froide.

L'importance des rejets thermiques, pour un site donné, dépendra finalement de trois éléments :

- le type de réacteur ;
- la puissance de chaque réacteur ;
- le nombre de réacteurs équipant le site.

Ainsi, le flux thermique correspondant à quatre réacteurs de 1 200 MW, du type PWR, sera, selon les estimations précédentes, de :

$$4 \times (1\,200\,000 / 3\,600) \times 1\,650 = 2\,200 \text{ thermies/s}$$

Le débit d'eau nécessaire pour évacuer ce flux thermique, avec une élévation au condenseur $\Delta\theta$, sera donc :

$$2\,200 / \Delta\theta$$

soit 146 m³/s pour 15 °C au condenseur, et 50 % en plus si $\Delta\theta = 10$ °C soit 220 m³/s.

Le flux thermique de quatre réacteurs rapides de 1 200 MW serait de l'ordre de 1 667 thermies/s, ce qui représente un gain de 25 % par rapport aux réacteurs à eau légère.

On peut, à titre d'ordre de grandeur, essayer de comparer ces flux thermiques aux flux naturels des courants marins.

Pour un débit de 10⁶ m³/s, l'une des veines du Gulf Stream, ayant un échauffement de 1 °C, transporte un flux de 10⁶ thermies/s.

On peut également comparer l'énergie thermique, rejetée pendant 24 heures par une centrale de quatre réacteurs de 1,2 GW, à l'énergie solaire reçue en moyenne par une surface de 100 km² :

la première est à peu près égale à 30 % de la seconde.

Ces ordres de grandeurs ne doivent être retenus que pour préciser la notion d'échelle des rejets thermiques de centrales de grande puissance. Ils mettent en valeur l'unique problème que posent de tels rejets : leur *dilution* dans des volumes de dimension suffisante pour ramener les densités de flux thermiques à l'échelle des valeurs naturelles. Sans aucune action mécanique, cette dilution, résultant du seul processus de *diffusion*, entraînera des gradients thermiques importants et, par suite, des pics de température aigus. En pratique, heureusement, l'action mécanique des marées ou des vents vient ajouter la contribution essentielle, la *convection*, et réduit les gradients thermiques dès qu'on s'éloigne de la source.

1/ Circuit d'eau d'une centrale implantée sur le littoral de la Manche.

2/ Surfaces échauffées par une centrale thermique sur le site de Paluel.

Différents problèmes résultant de l'échauffement

On peut se placer en variable de Lagrange ou en variable d'Euler.

En variable de Lagrange, on suit les particules. Certaines traverseront le circuit d'eau une ou plusieurs fois.

Sur le plan écologique, un certain nombre d'organismes participeront à ce parcours et pourront être affectés par le cycle thermique qu'ils subiront.

Il importe de préciser, non seulement les élévations de température, mais aussi le temps de séjour dans le circuit interne. Pour une centrale actuellement projetée sur le littoral du pays de Caux, le circuit d'eau comporte les éléments successifs suivants (fig. 1) :

- galerie d'amenée;
- bassin d'aspiration;
- circuit de pompage;
- condenseur;
- circuit de rejet en conduite;
- parcours dans le canal de rejet.

Les chiffres indiquent le temps de parcours en seconde, compté à partir du passage à travers la prise (instant $t = 0$).

Il faut donc environ 450 s à marée haute et 600 s à marée basse pour parcourir tout le circuit et revenir au milieu marin. Notons cependant que l'élévation de température du condenseur est supportée par la biomasse entraînée pendant une durée n'excédant pas 40 à 90 s, soit 3 mn au maximum à la marée basse.

La plupart des organismes ne suit pas le mouvement des masses d'eau, ce sont les algues, les crustacés et les poissons. L'échauffement « externe » existant dans la zone d'influence de la centrale pourra atteindre ces organismes en permanence. On notera cependant, sur la figure 2 ^(a), que ces échauffements ne dépassent 2 °C que dans une zone rarement supérieure à 500 hectares pour une centrale de 10 GW installée.

Les modifications écologiques qui en résulteront devraient être très limitées dans la plupart des cas.

Conclusion

Ces quelques réflexions n'ont pour but que de situer les flux thermiques des rejets des centrales nucléaires par rapport à des phénomènes naturels, et surtout de délimiter les principaux problèmes que pose l'installation des centrales de grande puissance sur le littoral.

Si les calculs les plus simples sont rassurants, par suite du très grand pouvoir de dilution des courants marins et, en particulier, des courants de marée dans les zones littorales bien « ventilées » (zones ouvertes), il semble indispensable de disposer de modèles assez sûrs pour simuler les situations moyennes et les situations exceptionnelles pouvant survenir dans les états de la mer et à l'atmosphère. Ceci suppose une connaissance statistique solide de l'hydrologie et de la météorologie du littoral à un pas de temps qui peut, sans doute, être pris égal à la période des échanges atmosphériques.

(a) Cette figure est tirée du rapport C40/74-5, mars 1974, de MM. A. DAUBERT, J.-F. MALHERBE et M. CAZENAVE.

Discussion

Président : M. le Professeur A. FORTIER

M. le Président remercie M. J.-C. LEBRETON pour son exposé qui fixe clairement les ordres de grandeur ; il ouvre ensuite la discussion en suggérant de la limiter à des questions se rattachant directement à la communication de M. LEBRETON ; les problèmes strictement techniques seront débattus après les exposés de M. CURTET et de M. GAUTHIER.

Personne ne demandant la parole, M. le Président présente ensuite les travaux du Comité « Diffusion thermique » de la S.H.F.