

TRUC-CONF-150
FR7602617

C.E.A. - E.D.F.
CYCLES DE CONFERENCES SUR
SOURCES FROIDES DES CENTRALES ELECTRIQUES
ROYAUMONT : 6 - 10 OCTOBRE 1975

- ECONOMIE DES SOURCES FROIDES
- FUSTER Serge
- E.D.F. - S.E.P.T.E.N.

- RESUME -

La croissance continue de la consommation d'électricité, l'adoption de centrales nucléaires de rendements inférieurs à ceux du thermique à flamme, conduisent à un accroissement considérable des rejets de chaleur liés à la production d'électricité. Une attention de plus en plus soutenue doit donc être apportée au choix des matériels constituant la source froide et à leur optimisation. L'acquisition d'un outil de calcul permettant de traiter systématiquement ces problèmes est devenue rapidement indispensable ; son écriture et sa mise au point ont été entreprises il y a plusieurs années. Il a fait depuis l'objet d'une utilisation intensive. Sa structure et l'essentiel des résultats obtenus seront présentés ici.

L'objet principal de ce code de calcul est l'établissement du bilan économique général résultant de l'emploi d'une source froide donnée. Ce bilan comprend d'une part les investissements nécessaires à la construction des divers matériels et, d'autre part, les bilans de la production résultant de leur utilisation. L'emploi d'un condenseur en circuit ouvert sur mer ou sur rivière ou l'utilisation de réfrigérants atmosphériques de divers types en circuit fermé ou en appoint, peuvent être traités.

Ce programme permet d'optimiser les caractéristiques des divers constituants de la source froide. La connaissance de bilans économiques complets et précis a permis également d'apprécier dans une situation donnée les mérites des divers matériels et de classer leur possibilité d'emploi, compte tenu des contraintes extérieures (limites diverses des rejets thermiques dans un fleuve, ou dans la mer, températures de l'eau, température de l'air). Il a ainsi permis d'éclairer des choix techniques dont les conséquences économiques étaient importantes.

1) Position du problème

Les investissements liés à la source froide deviennent de plus en plus importants. Les raisons en sont multiples.

Les puissances unitaires des centrales s'accroissent. L'utilisation des filières nucléaires à eau légère entraîne une majoration des rejets thermiques de 60 % environ par rapport aux centrales à combustible fossile. La capacité de refroidissement des fleuves français n'est pas toujours suffisante pour permettre l'emploi de circuits ouverts et il devient nécessaire de recourir à la mer ou d'utiliser directement l'atmosphère (réfrigérants secs ou humides) pour assurer la dissipation des calories dégradées. Enfin la prise de conscience collective des problèmes liés à la dégradation de notre environnement conduit à accorder de plus en plus d'attention à ces questions.

Pour éclairer les décisions il est donc rapidement apparu indispensable de classer les diverses solutions techniquement utilisables suivant des critères économiques ; d'où la nécessité d'établir des bilans comprenant les investissements à réaliser et le bilan d'exploitation de chacune d'entre elles. Pour que la comparaison ait un sens il est en outre nécessaire de comparer des solutions mettant en oeuvre des matériels dont les caractéristiques sont optimisées.

Dans l'établissement d'un bilan ou en matière d'optimisation un problème constant est de définir le domaine qui doit être pris en compte. Assez rapidement il est apparu que les avantages résultant de l'emploi de turbines normalisées pour la construction des centrales d'un palier technique l'emportait beaucoup sur les inconvénients. Au chapitre des avantages on peut citer les facilités industrielles résultant de la duplication, la possibilité de normaliser les salles des machines, l'interchangeabilité. A celui, des inconvénients on trouve essentiellement l'impossibilité d'adapter la section d'échappement de la turbine à la source froide à construire (circuit fermé, circuit ouvert) ce dont on peut s'accommoder tant que l'on envisage pas l'utilisation de réfrigérants secs. La turbine peut donc être le plus souvent exclue du bilan. Un autre domaine également exclu est

constitué par l'ensemble des conséquences résultant des rejets thermiques dans le milieu ambiant. Il est difficile d'en établir une liste et pratiquement impossible de leur attribuer une valeur. La seule chose que l'on puisse dire est que leurs effets ne sont pas tous négatifs. Les bilans et les optimisations ne couvrent donc que le circuit principal de refroidissement à savoir : le condenseur, les circuits d'eau et les réfrigérants éventuels.

Compte tenu de la diversité des solutions possibles, le volume des calculs est vite devenu très important. L'utilisation d'un code de calcul approprié s'avérait donc indispensable.

2) Le code SOUFROI

Un organigramme général de principe du code est donné ci-dessous figure 1. Les calculs faits peuvent se grouper en deux chapitres :

- définition physique des matériels constituant la source froide et calcul des investissements. Les paramètres permettant cette définition sont arbitrairement fixés lors d'un premier passage,
- simulation du fonctionnement de ces matériels dans les conditions climatologiques propres au site, calcul du bilan d'exploitation et du bilan général.

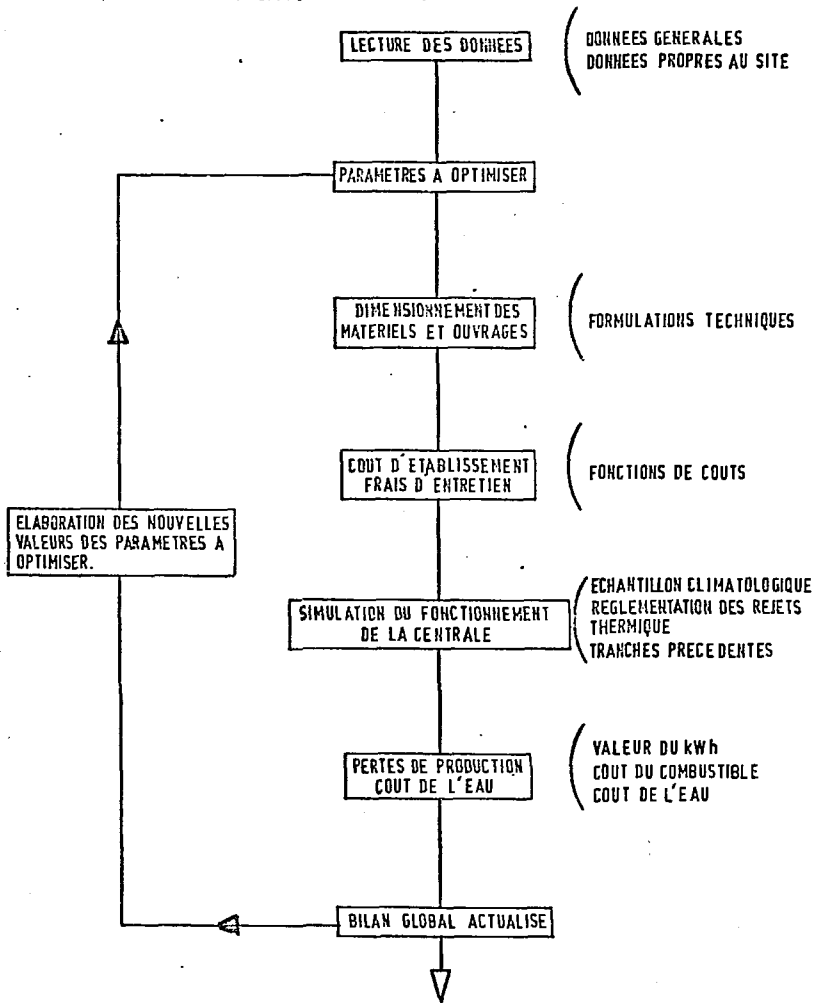
Cette procédure peut être reprise après ajustement des paramètres suivant un processus logique pour permettre leur optimisation.

2.1) Les données

Nombreuses, elles sont parfois difficiles à rassembler. Elles concernent :

- le schéma hydraulique utilisé. A côté des classiques circuits ouverts et fermés, il était intéressant d'étudier des schémas mettant en oeuvre un réfrigérant d'appoint fonctionnant une partie du temps. Le schéma hydraulique général est représenté figure 2. Suivant les situations rencontrées (débit et température du fleuve), divers modes de fonctionnement peuvent être considérés, chacun d'eux est caractérisé par les paramètres α , β , γ , δ qui déterminent les débits dans les diverses branches. Ces paramètres sont optimisables. Le code permet le choix des modes de fonctionnement les plus adaptés à la situation.

ORGANIGRAMME DU CODE SOUFROI



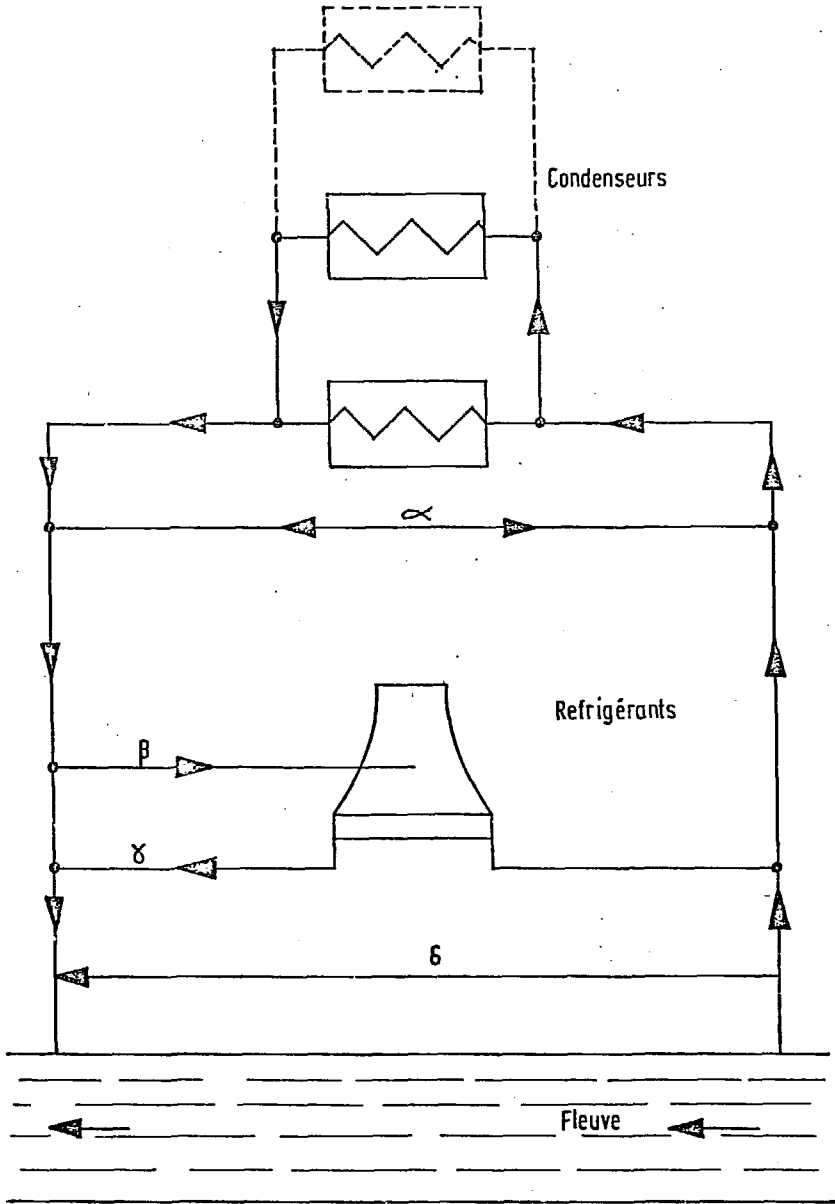
CARACTERISTIQUES OPTIMALES DU CIRCUIT DE REFROIDISSEMENT
INVESTISSEMENT, FRAIS D'EXPLOITATION, BILAN GLOBAL ACTUALISE

STATISTIQUES DIVERSES :

PRODUCTION D'ENERGIE, PRESSION DE CONDENSATION,
FREQUENCE DE MARCHE DES REFRIGERANTS D'APPOINT

CONSUMMATION D'EAU, TEMPERATURE ET ECHAUFFEMENT
DU FLEUVE.

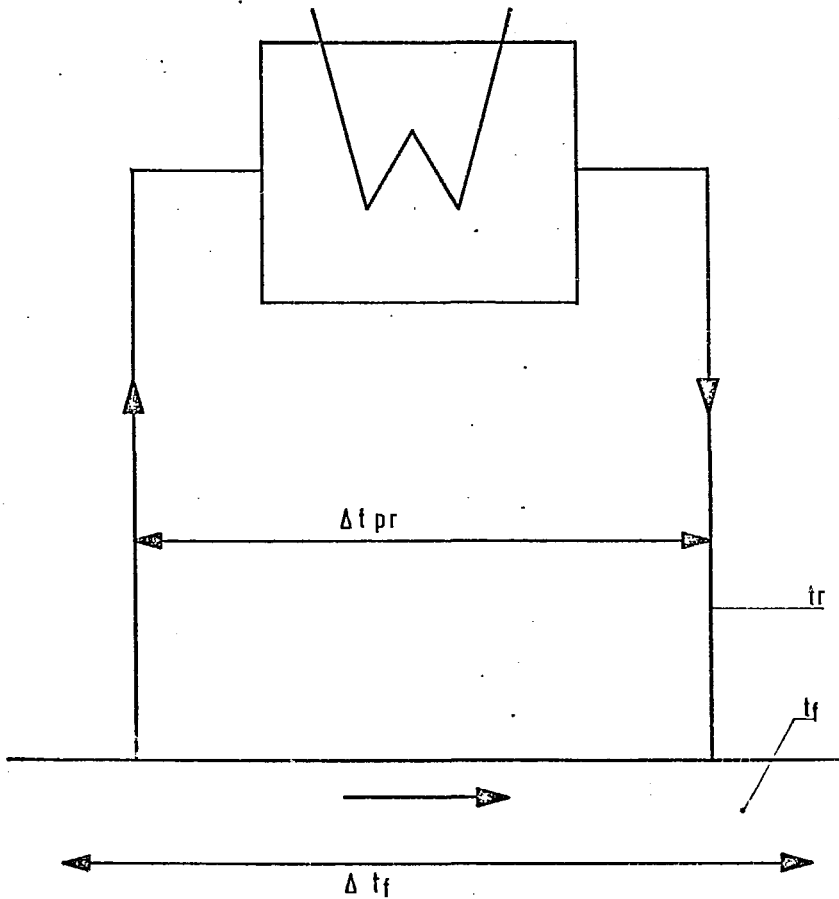
SCHEMA HYDRAULIQUE GENERAL



- les variations de la consommation spécifique de la turbine avec la pression de condensation et la charge.
- les limites réglementaires. Elles peuvent s'appliquer à la température au rejet, à l'échauffement de l'eau du circuit de circulation entre la prise et le rejet, à l'échauffement du fleuve ou à sa température en aval du site (fig. 3). Elles interviennent différemment dans le choix des caractéristiques des matériels. Elles sont en général mal connues. Il est, en effet, difficile d'estimer les modifications du milieu naturel résultant du choix d'une réglementation donnée.
- les données concernant l'exploitation de la centrale considérée. Elles comprennent, mois par mois, en heures pleines et en heures creuses, les fréquences d'appel, les valorisations correspondant à l'énergie produite, la durée des entretiens programmés. On doit connaître également les probabilités de panne et le coût du combustible.
- les indications économiques relatives aux coûts des divers matériels.
- les données hydrométéorologiques. Dans le cas d'un circuit ouvert, elles concernent les températures de la mer ou du fleuve étudié, son débit. Lorsque l'on emploie un réfrigérant, on doit en outre connaître la température de l'air et son humidité. Ces données ne sont pas toujours disponibles, c'est le cas en particulier des températures de la mer et des fleuves dont on ne possède des relevés systématiques que de façon exceptionnelle. Dans le cas des fleuves, il est possible d'en faire une estimation en utilisant une méthode de calcul fondée sur le bilan des échanges de chaleur entre l'atmosphère et le cours d'eau (1). Les données météorologiques utiles doivent, bien entendu, être disponibles. C'est le plus souvent le cas. Des mesures physiques sont nécessaires pour la détermination de coefficients numériques intervenant dans les calculs.

En ce qui concerne les températures de la mer, la même méthode ne peut pas être employée. Le milieu est beaucoup plus complexe et perturbé par les courants marins. Les mesures disponibles sont très rares et fragmentaires. Elles sont généralement effectuées en surface. Pour certains sites, les températures varient rapidement avec la profondeur. Une grande incertitude règne donc à leur égard.

LIMITATION DES REJETS THERMIQUES



1. Limitation de la température de rejet t_r
2. Limitation de l'échauffement entre prise et rejet Δt_{pr}
3. Limitation de la température du fleuve t_f
4. Limitation de l'échauffement du fleuve Δt_{fr}

En général, une chronique de 20 à 30 ans des relevés météorologiques trihoraires relative à un site voisin de la centrale projetée est disponible. Pour les rivières importantes, les débits sont également connus. La simulation du fonctionnement d'une centrale en circuit fermé ou en circuit ouvert sur rivière peut donc être faite sans grande incertitude puisque l'on dispose de renseignements sur une durée qui est de l'ordre de grandeur de la vie utile de la centrale.

En présence de limitations réglementaires contraignantes ou lorsque les débits du fleuve peuvent se trouver temporairement insuffisants, cette durée est indispensable pour tenir un compte exact des baisses de charge ou des arrêts. Le bilan d'exploitation est alors lourdement dégradé.

Sur mer une telle précision n'est heureusement pas nécessaire, aucune limitation de puissance n'étant en général à prévoir. Il serait toutefois très délicat, faute d'informations, d'établir le coût d'une réglementation contraignante (limitation de la température au rejet par ex).

L'utilisation d'une chronique comportant 20 à 30 années de relevés effectués 8 fois par jour conduit à des temps de calcul qui peuvent se trouver excessifs dans certaines applications. Un échantillon plus réduit, obtenu par un processus stochastique, est souvent utilisé.

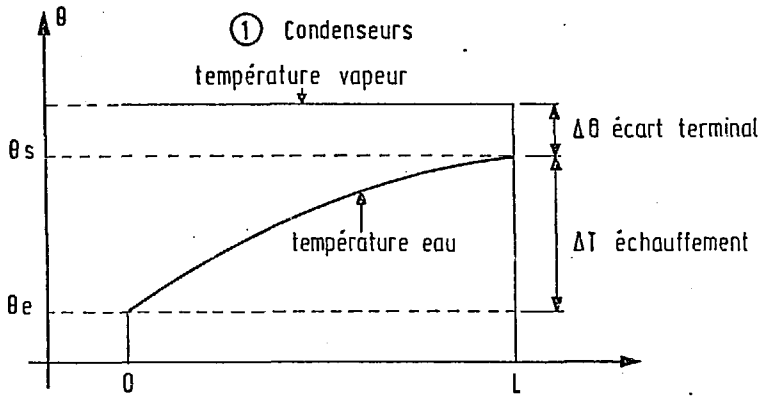
2.2) Les paramètres libres

La structure du code de calcul permet en principe l'optimisation de n'importe quel paramètre technique intervenant dans le calcul. Il en existe un grand nombre. Parmi les plus importants, on peut citer :

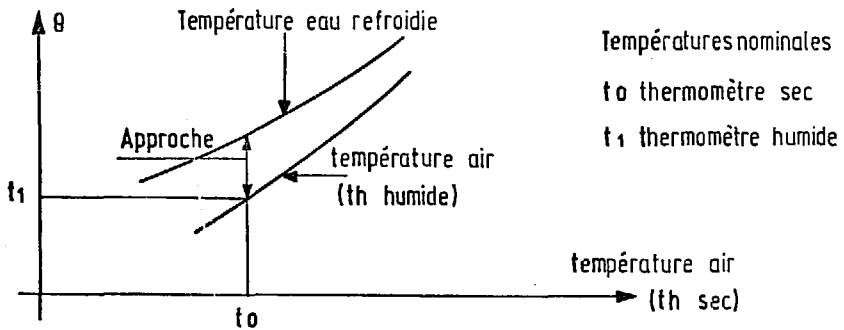
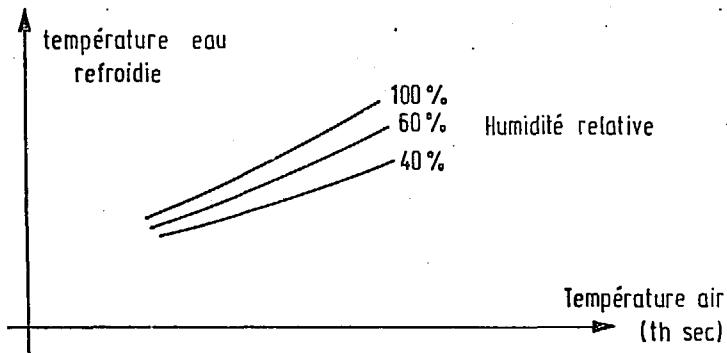
- l'écart terminal au condenseur (différence entre la température de condensation et la température de l'eau en sortie du condenseur),
- l'échauffement de l'eau dans le condenseur,
- éventuellement, l'approche du réfrigérant (fig. 4).

Ces trois paramètres permettent de définir les variations des températures moyennes dans toutes les parties du circuit hydraulique utilisé. Ils présentent toutefois l'inconvénient d'être variables avec les conditions climatiques rencontrées. Ils doivent donc être accompagnés, pour présenter un sens, des conditions nominales pour lesquelles

PARAMETRES OPTIMISABLES DES CONDENSEURS ET REFRIGERANTS



② Réfrigérants



ils ont été définis (température du fleuve et ou éventuellement température de l'air).

On peut encore citer :

- la vitesse de l'eau dans les tubes des condenseurs. Elle se trouve le plus souvent fixée pour des raisons technologiques (1,8 m/s pour les alliages cuivreux). Elle peut être optimisée pour le Titane et l'acier inoxydable,
- la vitesse de l'eau dans les tuyauteries.

2.3) Dimensionnement des matériels et des ouvrages

Le dimensionnement des matériels, à partir de paramètres définissant les performances, fait appel à une formulation technique. Il n'est pas nécessaire, pour des études économiques, que celle-ci soit très sophistiquée. Elle doit cependant être suffisamment précise pour permettre un dialogue avec les constructeurs.

Le condenseur est calculé en utilisant la formulation du Heat Exchange Institut (2) qui permet le calcul des coefficients d'échange. La méthode employée est critiquable à plus d'un titre. En particulier la température de l'eau à l'entrée du condenseur est le seul paramètre utilisé pour expliciter les variations du coefficient d'échange avec la température. Cette pratique présente évidemment l'avantage de simplifier les calculs. Il est toutefois évident que l'emploi de l'ordinateur permettrait de tenir compte ponctuellement de ces variations sans introduire de complications prohibitives. Telle que, cette formulation présente le mérite de permettre des recoupements suffisants avec les calculs faits par les constructeurs.

En ce qui concerne les réfrigérants atmosphériques à tirage naturel, à contre-courant et à courants croisés, une formulation simple à caractère très général voisine de celle de Chilton peut être utilisée (3)(4). Il en existe une autre pour le tirage forcé.

Les constructeurs nous communiquent, en outre, au niveau des avant-projets le réseau des courbes contractuelles qui, utilisées directement, montrent que la précision obtenue est satisfaisante.

Les calculs des pompes, des pertes de charge dans les tuyauteries sont classiques et ne présentent pas de difficultés particulières.

2.4) Coût d'établissement

Les fonctions de coûts utilisées dans le calcul des investissements sont établies soit par le constructeur, soit par EDF. Dans les deux cas, elles sont recoupées avec les résultats d'appels d'offre et de marchés. Elles présentent inévitablement une certaine imprécision :

- les coûts des matières premières varient parfois très sensiblement et de façon erratique (cuivre par exemple). Il est alors difficile, au moment où sont exécutés les calculs d'optimisation, de prévoir leurs variations dans les années qui vont s'écouler avant la réalisation. Il est même parfois hasardeux de tenter d'estimer leurs sens.
- il n'est pas toujours aisé également de définir des fonctions de coûts simples à partir des caractéristiques générales des matériels. Dans l'établissement de ses prix, le constructeur descend généralement à un niveau de détail qui nécessite au moins un avant-projet. Il est bien entendu hors de question d'adopter cette procédure trop complexe, aussi doit-on se contenter de formules approchées.
- inversement, dans les offres présentées par les constructeurs interviennent certains éléments conjoncturels : charge des ateliers ou des chantiers, état de la concurrence.
- certaines réalisations sont des extrapolations de réalisations existantes.

On ne peut donc pas s'attendre à une très grande précision dans la connaissance des coûts et cet état ne paraît guère perfectible. Il faut donc s'en accommoder. Dans la comparaison de projets différents, il faut en particulier veiller à l'homogénéité des données utilisées. Il est bon, d'autre part, d'estimer le domaine de variation de l'optimum correspondant à des variations plausibles de coûts. Les investissements ainsi calculés doivent être majorés des frais indirects (intérêts intercalaires, aléas...).

2.5) Simulation du fonctionnement

Les matériels constituant la source froide étant définis, l'étape suivante consiste à calculer la puissance qui peut être fournie à chaque

instant par la tranche étudiée. Celle-ci dépend :

- des conditions climatiques propres au site,
- de la réglementation concernant la prise et le rejet de l'eau,
- éventuellement de la puissance déjà rejetée par les tranches antérieurement construites sur le site. Il est alors utile de tenir compte de leur programme de marche.

Compte tenu de la complexité des interactions, la méthode la plus commode consiste à faire une simulation chronologique. On en déduit une chronique du fonctionnement de la tranche étudiée dans les diverses circonstances où elle peut se trouver sur une durée de 20 à 30 ans. Comme il a été indiqué ci-dessus, la procédure peut être abrégée par un processus stochastique. A chaque pas, on calcule l'ensemble des températures du circuit de circulation et du fleuve ainsi que la puissance délivrée par la tranche au réseau.

2.6) Bilan d'exploitation

Il comprend trois volets :

- a/ les pertes résultant des variations journalières de puissance calculées ci-dessus. Elles sont chiffrées par rapport à la puissance nominale. Le calcul fait intervenir :
 - la fréquence d'appel de la centrale, ses probabilités de panne et d'entretien,
 - la valorisation de l'énergie, fonction du mois, du jour et de l'heure. Le bilan étant fait pour la durée de vie de la tranche, il est nécessaire d'utiliser des données prévisionnelles, relatives grossièrement à une situation que l'on trouvera dans une décennie. Il est inutile de dire que ces données ne sont pas aisées à élaborer en période d'instabilité des coûts de l'énergie primaire,
 - le mécanisme de l'actualisation. Il est évident que l'on ne peut accorder, au moment du projet, la même importance à la production de la centrale la première année de sa mise en service et la dernière année de son utilisation. Les coefficients à faire intervenir sont calculés à partir du taux d'actualisation (10 %). Cette méthode de calcul est générale à EDF. La procédure à appliquer est ici assez

simple par suite du caractère parfaitement aléatoire des conditions climatologiques futures.

- b/ l'entretien des matériels constituant la source froide. On admet généralement qu'une partie des frais d'entretien est proportionnelle aux investissements. Ils varient également avec le matériel considéré.
- c/ le coût de l'eau. Les dépenses à faire peuvent résulter du versement de redevances aux agences de bassin. Il existe un tarif pour l'eau transitant dans la centrale et pour l'eau évaporée. On doit aussi tenir compte, dans le cas d'un circuit fermé, du coût du traitement de l'eau d'appoint des réfrigérants. Ce coût est spécifique de la méthode employée (vaccination à l'acide sulfurique, décarbonatation...).

2.7) Bilan global - Optimisation

Le bilan global est la somme des coûts d'établissement et du bilan d'exploitation. Il permet :

- de faire évoluer les paramètres que l'on cherche à optimiser suivant une procédure logique permettant de rechercher son minimum. Cette procédure nécessite de reprendre le calcul, qui vient d'être décrit, un assez grand nombre de fois (20 à 50 fois par exemple lorsque l'on recherche à optimiser 3 ou 4 paramètres).
- l'optimisation étant faite de comparer le cas échéant les diverses solutions qui peuvent être employées sur un même site (circuit ouvert, circuit mixte, circuit fermé par exemple).

2.8) Impression - Statistiques

Pour la solution optimale des impressions détaillées fournissent :

- les caractéristiques techniques des divers matériels ainsi que leurs dimensions générales. Ces données intéressent le projeteur,
- les caractéristiques de fonctionnement de la turbine et du condenseur : évolution des pressions de condensation, de la puissance en fonction de la température d'eau à l'entrée du condenseur,
- les éléments décomposés du bilan général,
- les moyennes mensuelles des puissances électriques nettes, des tempé-

ratures au rejet , du débit éventuel d'eau évaporée,
- des éléments statistiques sur les répartitions en exploitation des températures naturelles du fleuve, des températures au rejet (fig. 5), des puissances rejetées, des échauffements du fleuve, des pressions de condensation (fig. 6). Ces éléments permettent de bien définir les conditions de fonctionnement des matériels et de cerner les problèmes qui peuvent apparaître dans l'environnement de la centrale du fait de son exploitation.

3) Résultats généraux

3.1) Zone optimale - Variation de l'optimum avec les coûts

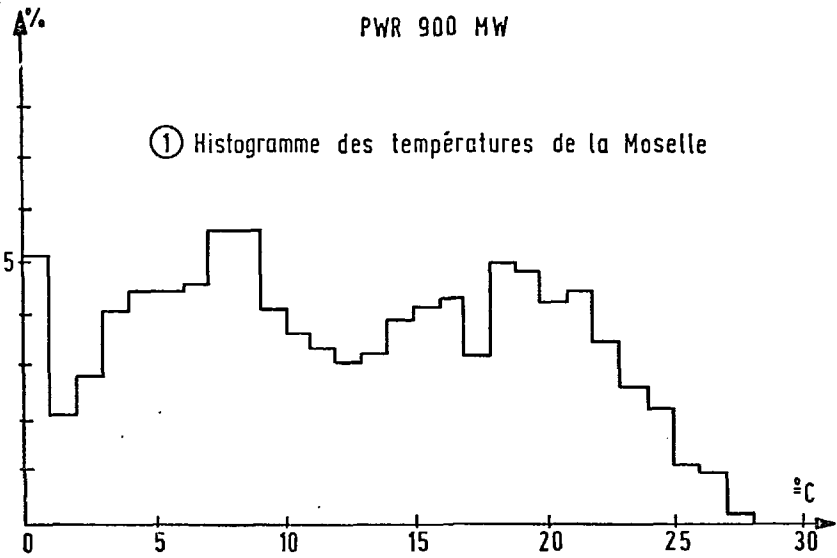
Les résultats de l'optimisation ne sont pas toujours adoptés tels quels. Ils peuvent en effet conduire à des matériels difficilement constructibles (tube de condenseur trop longs par exemple) ou extrapolant trop audacieusement les réalisations connues (réfrigérants de trop grand diamètre). Il est donc souvent intéressant d'explorer une zone voisine de l'optimum mathématique de façon à évaluer les pertes qui résulteraient de l'adoption de solutions différentes.

Dans le cas où l'optimisation porte sur deux paramètres, les variations du bilan peuvent faire l'objet d'une représentation graphique. La figure 7 en offre un exemple relatif à l'optimisation d'un circuit fermé. Les deux paramètres optimisés sont l'échauffement au condenseur et l'approche du réfrigérant. La surface représentative des bilans est représentée par des courbes isobilans de forme ellipsoïdale centrées sur l'optimum. On voit qu'en acceptant une perte de 1 % du bilan général (de l'ordre de 2 MF) il est possible de se déplacer dans toute la zone définie par la première courbe. Il est en général peu souhaitable d'adopter des solutions nécessitant des investissements supérieurs à ceux de la solution optimale, le choix est alors limité à la zone ombrée. Une perte relativement faible permet donc une latitude de choix considérable.

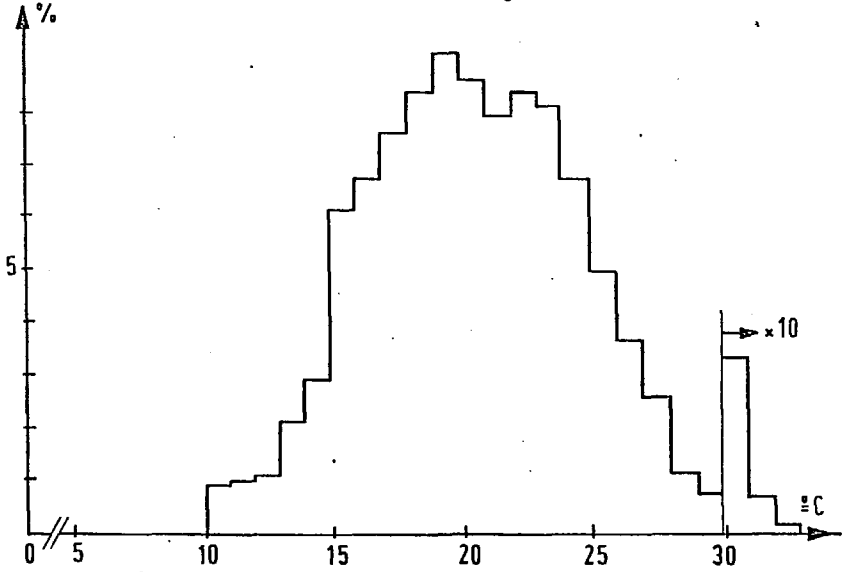
Les fonctions de coût sont en général mal connues. Il est donc souhaitable d'évaluer les déplacements de l'optimum résultant de la variation des coûts des principaux matériels. La figure 7 en offre deux exemples relatifs au circuit d'eau et au réfrigérant. Même en présence de variations importantes, on ne sort pas de la zone optimale définie ci-dessus, surtout en ce qui concerne le coût du circuit d'eau. Les erreurs

SITE DE SENTZICH_Histogrammes des températures d'eau

PWR 900 MW

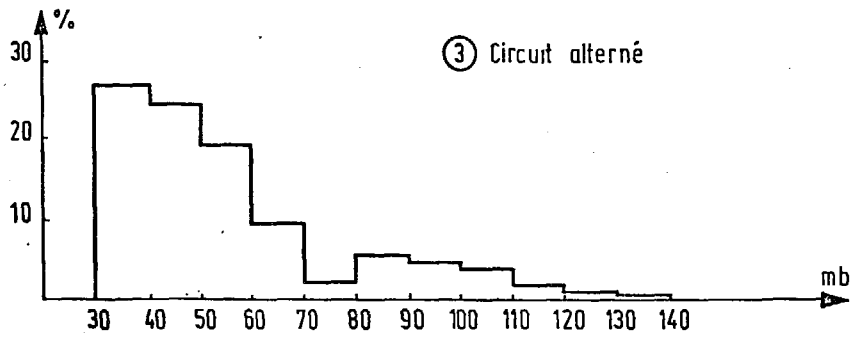
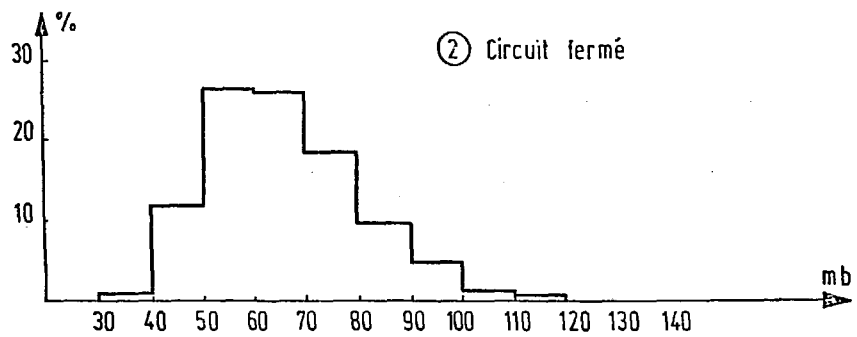
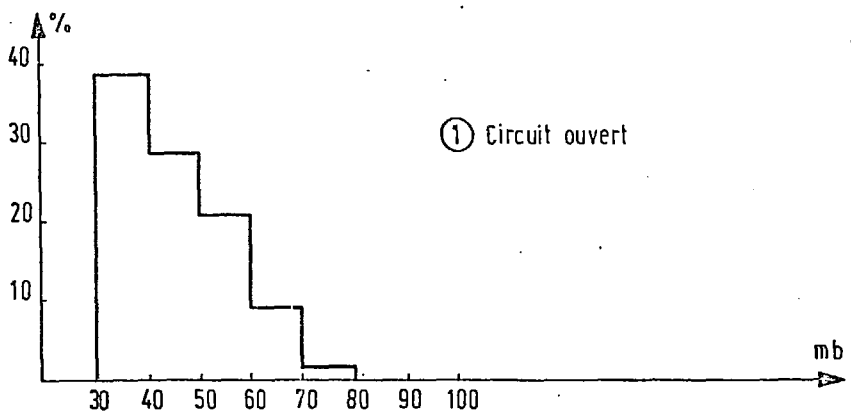


② Histogramme des températures d'eau en sortie du réfrigérant

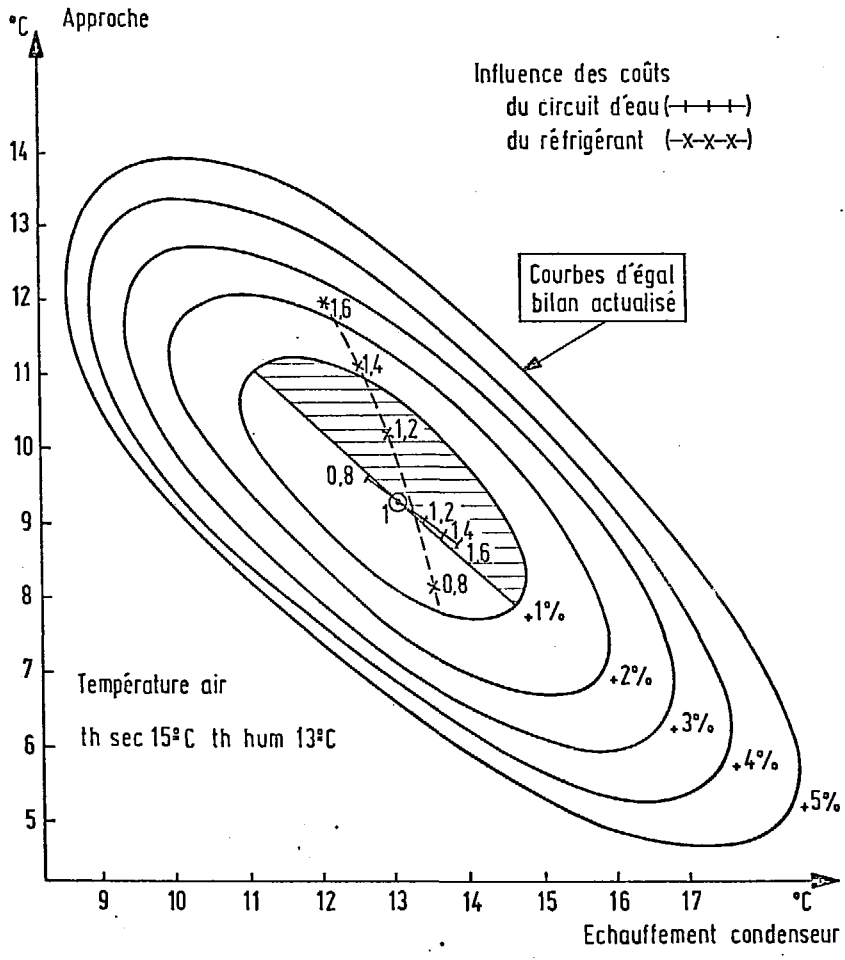


HISTOGRAMMES DES PRESSIONS DE CONDENSATION

PWR 900 MW



REFROIDISSEMENT EN CIRCUIT FERME COURBES ISOBILANS INFLUENCE DE LA VARIATION DU COUT DES MATERIELS



que l'on peut faire sur les coûts n'entraînent par conséquent pas de pertes sensibles par défaut d'optimisation.

3.2) Circuits ouverts

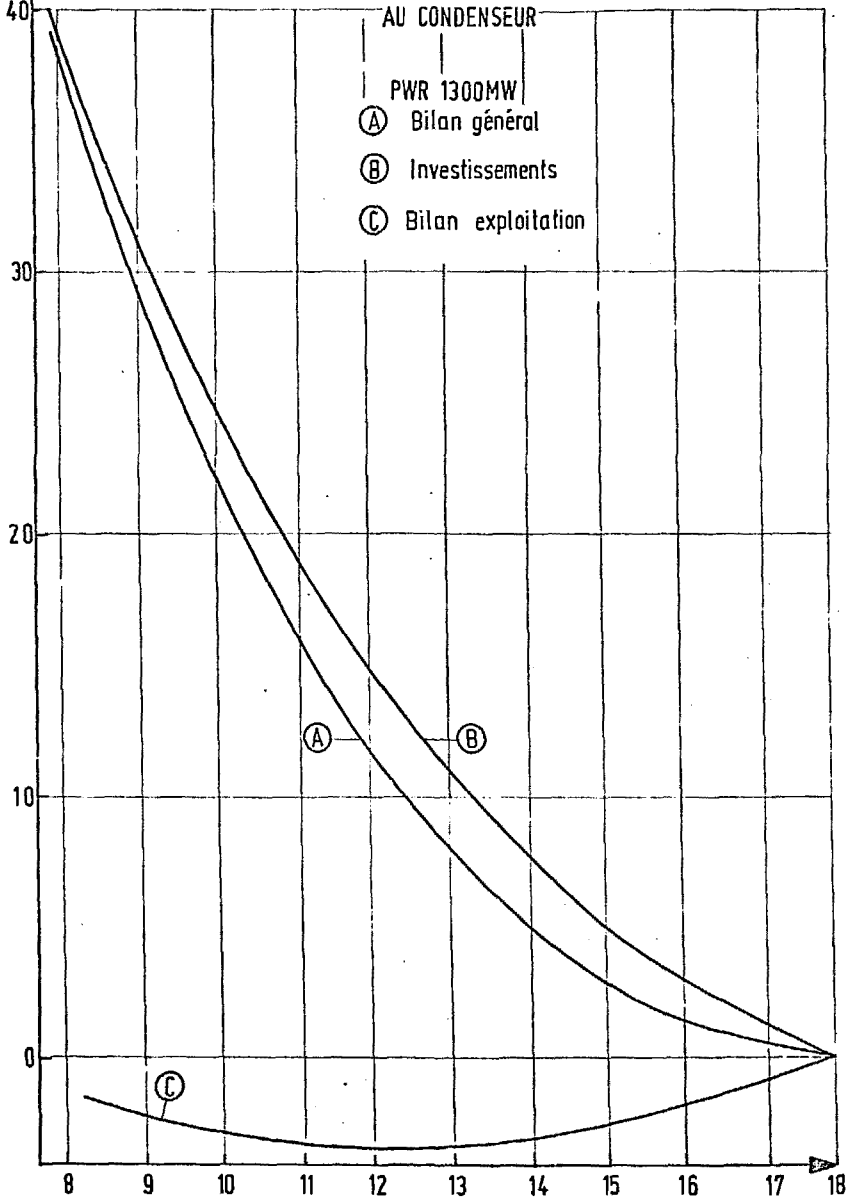
Dans le cas de centrales nucléaires, les échauffements optimaux dépassent 15 °C, ils peuvent atteindre 18 °C si le coût des circuits d'eau est élevé. Les écarts terminaux sont faibles, 4 à 6 °C. Il est difficile de se placer à l'optimum. Les échauffements ne peuvent guère, en effet, dépasser 15 °C en mer et doivent être bien inférieurs en rivière pour des raisons de sauvegarde de l'environnement. Les valeurs retenues résultent de discussions avec les autorités locales ou nationales. Il est souhaitable d'adopter un seul échauffement pour un palier technique donné, ce qui permet de normaliser les condenseurs. Les calculs ont en effet montré que les écarts terminaux ne variaient pas suffisamment d'un site à l'autre pour que cette pratique entraîne des pertes sensibles. L'adoption de condenseurs normalisés présente des avantages de fabrication. Les dispositions des salles des machines peuvent, d'autre part, être identiques d'une tranche à l'autre.

Les débits d'eau de circulation sont considérables : 42 m³/s échauffés de 11 °C pour un 900 MW PWR, 53 m³/s échauffés de 12 °C pour un 1300 MW. Ces valeurs sont à rapprocher du débit de la Seine à Paris : 170 m³/s en moyenne, 45 m³/s en étiage (débit dépassé 355 jours par an). Une grande attention doit donc être accordée aux circuits d'eau. L'optimisation de la vitesse de l'eau dans les tuyauteries de circulation est un des paramètres importants. Les vitesses optimales se situent entre 2.4 m/s et 3.2 m/s, les résultats dépendent du coût des tuyauteries et de la fréquence des singularités dans le circuit.

3.2.2) Circuits ouverts sur rivière

La figure 8 montre les conséquences économiques de la limitation de l'échauffement pour un PWR 1300 MW. On voit que la détérioration du bilan se chiffre en dizaine de millions de francs. Les investissements croissent de manière encore plus lourde. Les gains de puissance qui résultent de l'abaissement de la pression de condensation finissent, pour des débits élevés, par se trouver compensés par la puissance de pompage supplémentaire à mettre en place. Ce bilan a été établi pour des tubes en laiton dans lesquels on ne peut guère dépasser une vitesse de 1,8 m/s. Pour des échauffements de 10 °C, les faisceaux des condenseurs atteindraient une hauteur voi-

CIRCUIT OUVERT EN RIVIERE VARIATIONS
DES ELEMENTS DU BILAN AVEC L'ECHAUFFEMENT
AU CONDENSEUR



sine de 5 m. Cette valeur paraît actuellement difficile à dépasser. L'emploi de tubes en acier inoxydable autorise des vitesses plus élevées (optimum économiques 2,1 m/s) et permet de résoudre ce problème. Le coût du faisceau est un peu plus élevé. La comparaison est rendue difficile par les fluctuations importantes du cours du cuivre. Les échauffements actuellement pratiqués, 11 à 12 °C, n'imposent pas son emploi qui n'a pas reçu en France la sanction de la pratique.

3.2.2) Circuits ouverts sur mer

Les problèmes de corrosion sont importants pour la tenue des matériels. Toute fuite d'eau de circulation dans le condenseur s'accompagne d'un passage de chlorures dans le circuit principal. Les générateurs de vapeur des centrales nucléaires à eau légère pressurisée y sont particulièrement sensibles. C'est la raison pour laquelle le Titane a été choisi pour constituer le faisceau malgré un coût très nettement plus élevé.

La figure 9 rassemble les éléments qui permettent le choix de la vitesse. Elle est relative à un PWR 1300 MW.

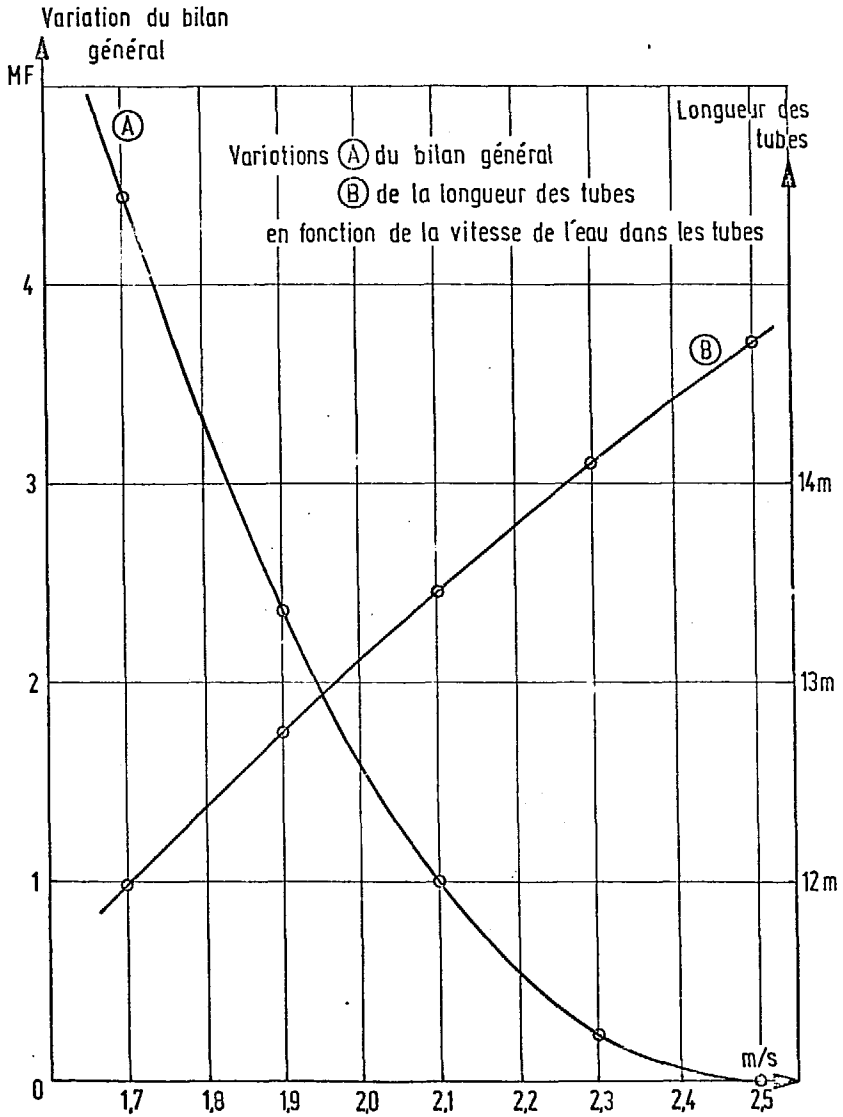
L'échauffement de l'eau de circulation est de 15 °C. Les tubes ont un diamètre de 16 x 17 mm. La vitesse optimale est de 2,5 m/s. Elle ne varie que faiblement avec le diamètre des tubes. Par mesure de prudence, pour minimiser les risques d'érosion, la vitesse adoptée est de 2,3 m/s.

D'une façon générale, les circuits ouverts sont plus coûteux en mer que sur rivière par suite de précaution à prendre et parce que les circuits sont souvent plus longs. Sur les rivages où les marées sont importantes, on doit d'autre part souvent construire un déversoir qui augmente la puissance de pompage.

3.3) Circuits fermés

Les paramètres principaux à optimiser sont l'approche du réfrigérant, l'écart terminal et l'échauffement du condenseur. En fait, l'écart terminal optimal est de l'ordre de 2,5 à 3 °C, valeur très faible qui conduit à une longueur des tubes du condenseur exagérée. Les constructeurs estiment qu'elle entraîne des réalisations difficiles qui présentent des risques techniques. La valeur optimale n'est donc pas adoptée et l'on se limite à 4 °C. Les échauffements se situent aux alentours de 13 °C. Les approches entre 11 et 13 °C pour des températures d'air de 11 °C au thermomètre sec et

Tubes titane



9 °C au thermomètre humide.

Le choix du réfrigérant est l'élément le plus important et le plus difficile. En l'absence de contraintes dues à l'environnement, pour des tranches nucléaires de 900 MW et plus encore pour les 1300 MW, la solution la plus sûre et la plus économique est d'adopter le tirage naturel et de construire deux tours par tranche. Celles-ci ont alors des dimensions qui se situent dans le domaine des réalisations courantes ($\phi = 100$ m, H = 125 m pour 900 MW ; $\phi = 110$ m, H = 140 m pour 1300 MW). Sur un site comportant 4 tranches, cette solution entraîne la construction de 8 tours. Il est difficile de leur donner un aspect satisfaisant du point de vue esthétique. Les solutions mettant en œuvre une tour par tranche sont généralement jugées plus heureuses à ce point de vue. Elle présentent l'inconvénient de conduire à des réalisations de très grande hauteur (165 m pour 900 MW, 180 m pour 1300 MW) qui sont à la limite ou au-delà de ce que l'on sait construire. Il n'est d'autre part pas absolument sûr que ces énormes constructions ne suscitent pas, elles aussi, de protestations des populations locales.

En acceptant de s'écarter de l'optimum, il est possible de limiter la hauteur des tours et d'augmenter leur diamètre sans modifier leurs performances. Cette disposition rend le réfrigérant moins visible à grande distance. L'aspect esthétique dans l'environnement immédiat n'est pas pour autant amélioré.

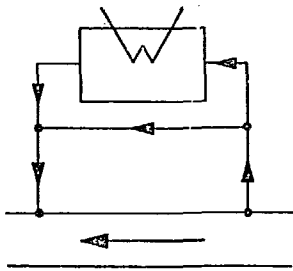
Le recours à des réfrigérants à tirage forcé ou à tirage assisté améliore nettement les choses de ce point de vue puisque les réfrigérants peuvent avoir une hauteur voisine de celle des autres bâtiments de la centrale. Les difficultés proviennent du bruit des ventilateurs qui ont des composantes à basse fréquence qui se propagent assez loin. Les problèmes d'insonorisation sont difficiles à résoudre compte tenu de la taille des matériels. Leurs coûts, pour des réalisations soignées, peut atteindre la moitié du coût du réfrigérant nu.

3.4) Circuits mixtes et alternés

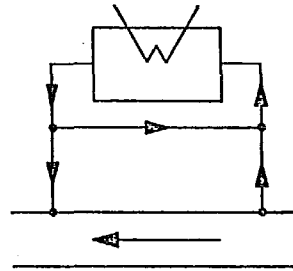
Les dispositions réglementaires détaillées figure 3 peuvent, sur certains sites, ne se trouver contraignants que durant une période limitée de l'année. Il semble alors intéressant d'éviter le fonctionnement continu en circuit fermé en compliquant le circuit hydraulique. La figure 10 donne quelques exemples simples de solutions qui peuvent être envisagées. Un schéma beaucoup plus général (figure 2) est utilisé dans le code. Il regroupe l'en-

SCHEMAS HYDRAULIQUES COURANTS

① Circuits ouverts

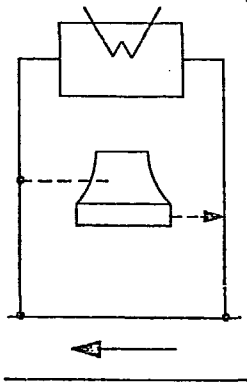


a) Dilution

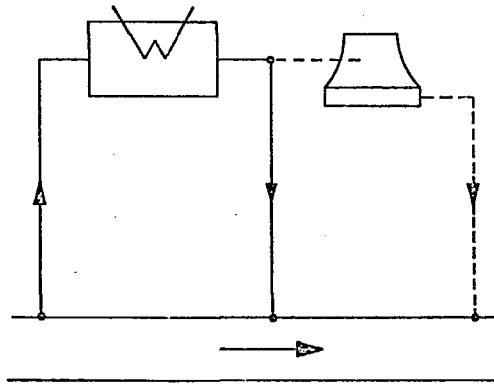


b) Recirculation

② Circuits mixtes



a) Parallèle



b) Série

semble des solutions simples dont il est question et permet leur étude :

- le circuit de dilution permet de limiter l'échauffement entre la prise et le rejet ou la température au rejet. Son intérêt économique est limité aux sites où la prise et le rejet sont voisins. Lorsque des tuyauteries longues doivent être établies, il est plus intéressant de diminuer l'échauffement au condenseur,
- le circuit de recirculation est cité pour mémoire. Il est utilisable lorsque le débit du fleuve devient insuffisant. L'échauffement du fleuve est alors supérieur à celui du condenseur. Il y a donc peu d'espoir de trouver un site où il soit applicable. Dans les deux cas mentionnés ci-dessus, la totalité de la puissance condenseur est en permanence rejetée à la rivière. Il n'en est plus de même dans le cas de l'emploi d'un réfrigérant. Les deux dispositions indiquées figure 10 (il en existe d'autres) permettent :
 - . dans le cas où le réfrigérant est disposé en parallèle de marcher soit en circuit ouvert soit en circuit fermé (circuit alterné) soit en utilisant simultanément les deux sources froides,
 - . dans la disposition en série, l'eau est rejetée à la rivière après refroidissement si nécessaire. Cette solution est a priori séduisante. Il est cependant difficile de dissiper une partie notable de la puissance à l'atmosphère. L'eau, en sortie du condenseur, n'est en effet pas suffisamment chaude pour permettre un fonctionnement efficace du réfrigérant.

Ces dispositions et d'autres ont été étudiées en détail. Elles conduisent à des investissements assez importants ; l'exploitation des diverses variantes est complexe. Les pressions de condensation sont dispersées (figure 6) et atteignent des valeurs élevées génératrices de fatigue des aubages d'échappement de la turbine. Enfin, le nombre de sites où les dispositions sont applicables est faible.

3.5) Réfrigérants secs

Ils permettent de supprimer le débit d'évaporation des réfrigérants humides (0,6 m³/s pour 900 MW). Les problèmes de panache sont également résolus.

Une étude technico-économique menée en collaboration avec les constructeurs a cependant montré que pour une tranche de 1300 MW :

- la pression optimale d'échappement se situait aux alentours de 150 mb. La turbine et une partie de la salle des machines devraient donc être modifiées,
- par rapport au réfrigérant humide, la perte de puissance est de 70 MW,
- dans les mêmes conditions, le bilan général est augmenté de 300 MF. Le coût de l'énergie produite se trouve augmenté de 9 %,
- la solution étudiée en tirage naturel nécessiterait 3 tours de 150 m de hauteur par tranche.

On voit donc que l'on paye cher les avantages propres à cette solution tant sur le plan économique que du point de vue esthétique. Il faut donc se trouver dans une situation exceptionnelle du point de vue de l'approvisionnement en eau pour que cette solution puisse être envisagée.

4) Conclusion

Deux questions peuvent être examinées pour conclure.

La première serait : parmi les sources froides possibles, quelles sont les plus économiques ?

Elle est difficile. Les différences entre sites ne permettent guère qu'un classement par ordre de coût croissant : circuits ouverts rivière, circuits ouverts mer, circuits fermés.

Les circuits ouverts sur rivière verront, à l'avenir, leur importance limitée par la saturation thermique des principaux fleuves français. C'est une question d'années et de réglementation.

Seuls les circuits ouverts en mer et les circuits fermés sont susceptibles de se développer. L'une et l'autre solution présentent des inconvénients vis-à-vis de l'environnement. Au plan économique, les deux solutions sont assez voisines avec un léger avantage (10 à 50 MF) pour le circuit ouvert. Ce sont des considérations d'un autre ordre (transport d'énergie, sites disponibles) qui fixeront les choix.

La seconde question pourrait être ainsi formulée : existe-t-il une limitation à la croissance de la production d'énergie électrique liée à la source froide ?

Il est bien entendu difficile de répondre affirmativement et de fixer une limite puisqu'il faudrait définir le moment où l'augmentation des

rejets à l'atmosphère deviendrait insupportable. On peut toutefois observer qu'actuellement l'augmentation de la puissance des unités ne conduit pratiquement plus à une diminution du coût spécifique de la source froide. L'effet de taille est devenu nul ou négatif. Cet état de fait est lié en grande partie aux exigences accrues de la population en matière de préservation de l'environnement.

Sans pouvoir répondre affirmativement à la question, on peut donc prévoir que les problèmes de source froide coûteront de plus en plus cher à résoudre.

B I B L I O G R A P H I E

- 1/ Gras - Simulation du comportement thermique d'une rivière à partir des données fournies par un réseau classique d'observations météorologiques
13ème congrès AIRH Tokyo 9/1969

- 2/ Heat Exchange Institute
Standards for steam surface condensers
Sixth Edition 1970

- 3/ Chilton - Performance of Natural Drangh Water-cooling Tower
Proceedings Institution of Electrical Engineers
Vol. 99 - 1952

- 4/ Lefèvre - Réfrigérant à tirage naturel ; calcul approximatif des performances
La Technique Moderne n° 8/9 - 1969