

Modèle thermo-halin de la retenue de Mirgenbach à Cattenom

Alain Gilbert

EDF, Département EAA, 6 quai Watier 78401 Chatou Cédex

Résumé. – Le refroidissement du Centre de Production Nucléaire de Cattenom s'effectue par prélèvement d'eau de Moselle. Cette eau échauffée, dont une partie est évaporée dans les aéroréfrigérants, est restituée à la Moselle.

L'eau rejetée transite par la retenue de Mirgenbach qui sert de source froide pour la centrale. En cas de difficulté d'alimentation en eau de Moselle, elle peut alors fonctionner en circuit fermé sur la retenue.

Toutefois certaines contraintes (débit, niveau, températures, salinité) doivent être respectées, sinon la puissance de la centrale doit être diminuée, voire annulée.

Afin de déceler les périodes et les cas de figure difficiles, un modèle mathématique unidimensionnel sur la verticale, basé sur le bilan d'énergie, a été utilisé pour simuler le comportement thermique et la salinité de la retenue.

Appliqué à des données passées (1961-1986) il a permis de montrer par exemple que la période la plus critique (été 1976) ne provoquait pas d'indisponibilité lorsque 2 tranches fonctionnent, mais pouvait conduire à 40 jours d'arrêt pour 4 tranches.

Il a été adapté pour un usage en temps réel, en utilisant des prévisions hydrométéorologiques, de façon à adapter au mieux la gestion de la centrale en fonction des conditions du moment.

Il pourra être perfectionné pour tenir compte de l'effet du traitement antitartre à l'acide chlorhydrique, voire pour simuler l'évolution d'autres paramètres de qualité d'eau : oxygène dissous, DBO, biomasse du phytoplancton.

Summary. – The cooling water used by the Cattenom Nuclear Power Generation Centres comes from the Moselle river.

The heated water, part of which is evaporated in cooling towers, is returned to the Moselle.

The discharged water flows through the Mirgenbach reservoir, used as cold source for the power station. In the event of problems in supply of Moselle water, the power station can then operate in closed circuit on the reservoir.

However, certain constraints (rate of flow, temperature, salinity) need be respected, otherwise, the plant must operate at reduced capacity or be shutdown.

To detect the difficult periods and scenarios, a one-dimensional vertical mathematical models based on the energy balance has been used to simulated the thermal behaviour and the salinity of the reservoir.

Applied to older data (1961-1986), it was shown that the most critical period (summer 1976) did not cause any outage when two units were in service, but could lead to 40 days of shutdown for four units.

It has been made suitable for real time application, using hydro-meteorological forecasts so as to adapt plant management at best to the conditions prevailing at the time.

It can be perfected to take account of the hydrochloric acid antiscalant treatment, or even to simulate the change in other parameters relating to water quality : dissolved oxygen, BOD, phytoplanktonic biomass.

I. – INTRODUCTION

La retenue de Mirgenbach, est utilisée par la centrale de CATTENOM comme source froide intermédiaire ou de secours, en cas d'indisponibilité de la Moselle (débits trop faibles), ou de défaillances techniques (panne des pompes de prélèvement en Moselle).

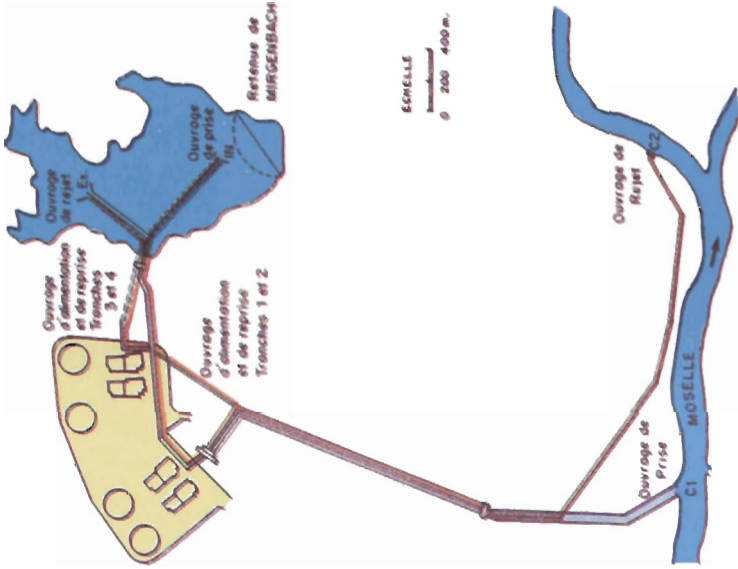
Toutefois diverses contraintes de débit, de température ou de salinité doivent être respectées, ce qui peut, dans certains cas, amener à réduire ou même à annuler la production d'électricité.

Un modèle thermo-halin de la retenue, utilisable en temps réel, a été créé afin de simuler à tout moment



La retenue de Mirgenbach.

Plan de situation des prises et rejets d'eau en Moselle et en retenue



Situation de la centrale de CATTENOM sur la Moselle

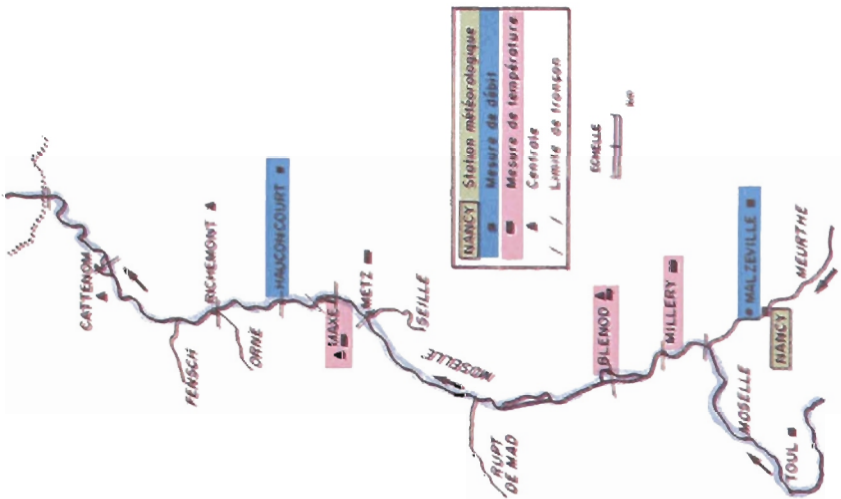


Fig. 1

l'état de la retenue pour différents scénarios de production. Il permet de définir la meilleure gestion possible de la centrale et de la retenue, tout en conciliant production électrique et contraintes d'environnement.

II. - PRESENTATION DU SITE

1) La centrale de CATTENOM, située sur la Moselle à environ 10 kilomètres de la frontière Franco-Luxembourgeoise, est équipée de 4 tranches de 1300 Mw réfrigérées par des réfrigérants atmosphériques. Elle présente une originalité par rapport aux autres centrales nucléaires françaises construites sur un cours d'eau : les rejets des purges des réfrigérants transitent, en fonctionnement normal, par la retenue de

Mirgenbach avant de retourner en Moselle (figure 1). La retenue de Mirgenbach peut être également utilisée pour le prélèvement d'eau en cas d'indisponibilité de l'eau de Moselle : on fonctionne en circuit fermé sur la retenue.

2) Le volume total de cette retenue est de 7,3 millions de m³, sa surface de 95 hectares à la côte 179,5 NGF et sa profondeur maximale de 19,5 m. Sa courbe de capacité est donnée en figure 2.

3) Le débit de la Moselle à CATTENOM est faible durant les mois d'août et septembre : sur la période 1961-1986, le débit est inférieur à 20 m³/s pendant 5 % du temps. Ceci peut entraîner une modification des conditions de fonctionnement de la centrale, voire son arrêt éventuel.

La température de l'eau de Moselle varie de 0 à 28 °C et pour cette

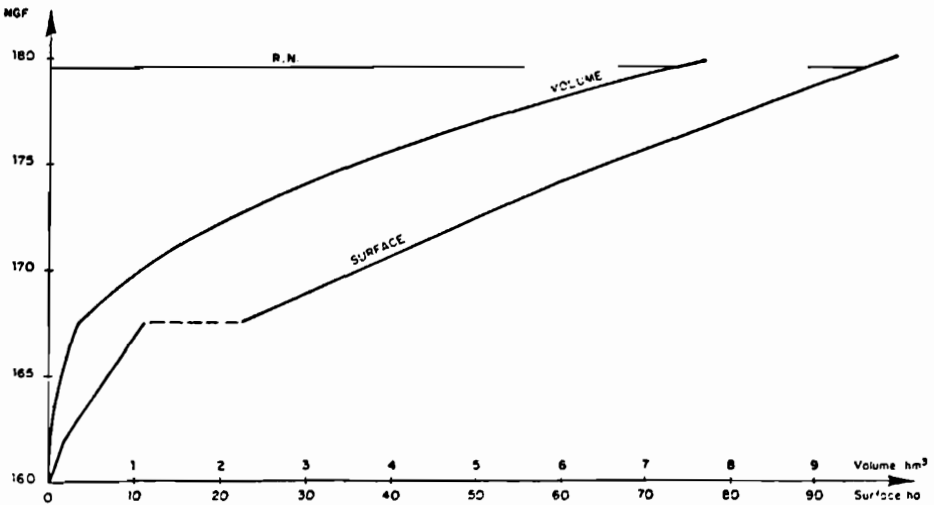


Fig. 2. - Retenue de Mirgenbach. Courbe de capacité.

même période 1961-1986, elle est inférieure à 26 °C pendant 98 % du temps.

C'est une rivière à forte concentration en ions chlorures provenant des rejets des industries situées en amont. Depuis 1985 cette concentration tend à diminuer du fait d'une réglementation sévère, et pour l'année 1986, elle a été de 0,4 g/l en moyenne.

III. — DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DE LA CENTRALE

1) Diverses contraintes règlent le fonctionnement normal de la centrale :

- la température en Moselle à l'aval de la centrale doit être inférieure à 28 °C

- l'échauffement amont-aval doit être inférieur à 1,5 °C

- le débit en Moselle à l'amont de la centrale doit être supérieur à 18,5 m³/s pour 4 tranches, et 13,75 m³/s pour 2 tranches,

- le remplissage de la retenue est limité à 4,75 m³/s pour un débit Moselle inférieur à 40 m³/s

- la cote minimum de la retenue est 177,3 NGF

- la concentration en ions chlorures pour les rejets en Moselle doit être inférieure à 1 g/l, (0,8 g/l si le débit Moselle est inférieur à 20 m³/s).

La réfrigération des auxiliaires a pour effet d'augmenter la température, et la salinité d'un facteur 1,6 environ (par évaporation).

2) Ces diverses contraintes imposent différents modes de fonctionnement de la centrale :

- Lorsque toutes les contraintes sont respectées, la centrale est dite "en fonctionnement normal". L'eau nécessaire au refroidissement des condenseurs est pompée en Moselle. Après passage dans les réfrigérants atmosphériques elle est rejetée dans la retenue de Mirgenbach. Ces rejets transitent dans la retenue avant d'être restitués à la Moselle. Dans ce cas le débit sortant est égal au débit entrant (figure 3).

Dans le cas où des contraintes d'environnement interdiraient de prélever et de rejeter l'eau de réfrigération en Moselle, on peut utiliser la retenue de Mirgenbach et fonctionner à pleine puissance, ou à puissance réduite, tant que les contraintes liées à la retenue sont respectées (température, salinité, niveau).

A défaut la centrale doit être mise en configuration d'arrêt à froid, ce qui entraîne un arrêt de la production d'électricité.

IV. — UN OUTIL PRECIEUX : LA SIMULATION PREVISIONNELLE

En fonction des conditions hydrométéorologiques du moment, de l'état de la retenue (température, salinité, niveau), et de la production de la centrale, il est possible de continuer l'exploitation plus ou moins longtemps, avant d'être obligé d'arrêter la centrale à cause du franchissement d'une des contraintes précédentes.

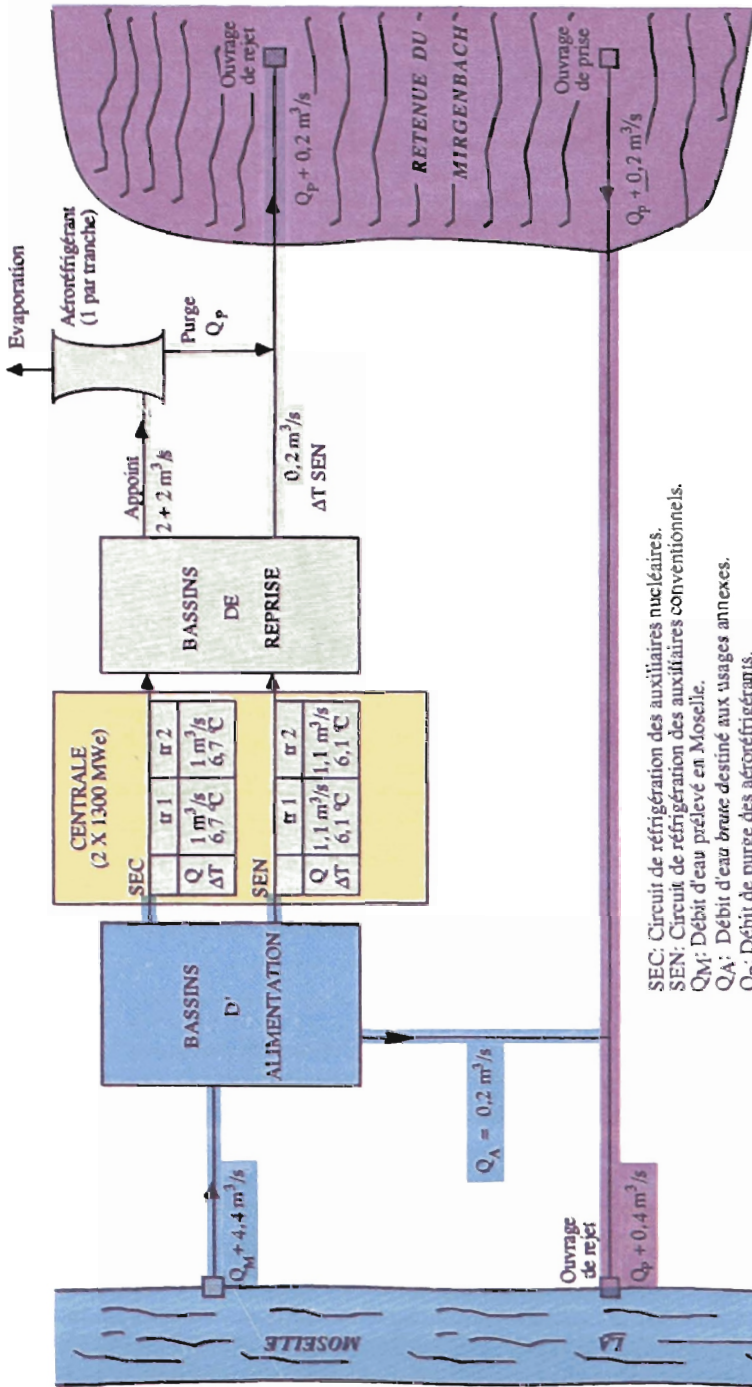


Fig. 3. - Schéma du circuit d'appoint et rejet d'eau brute de deux tranches en fonctionnement normal. Le circuit principal de réfrigération n'a pas été représenté.

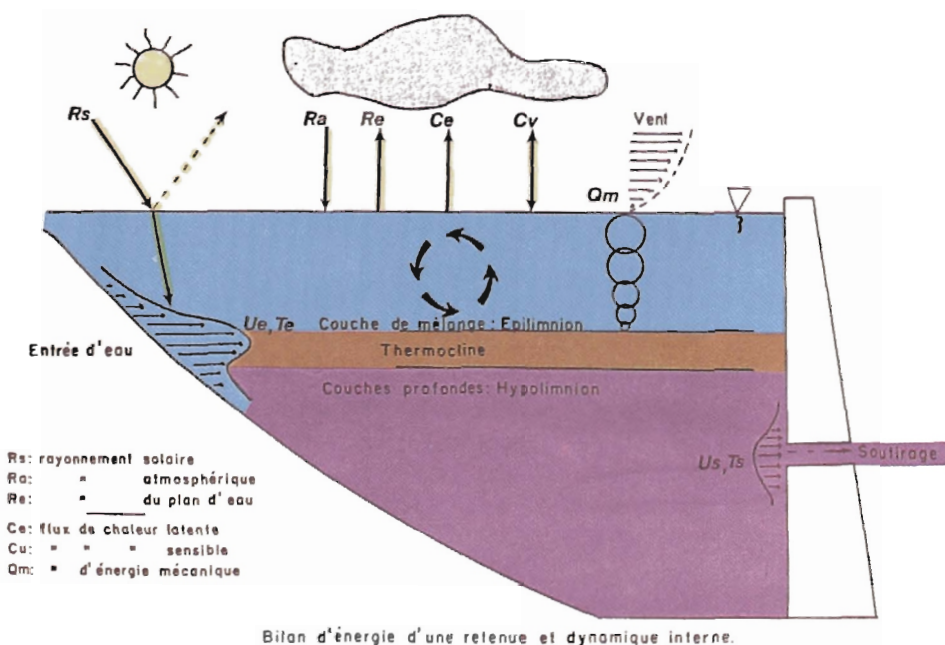


Fig. 3 (bis). -

Il est très important pour l'exploitant de pouvoir prévoir cette disponibilité, voire de l'optimiser en adaptant la production. C'est pourquoi un modèle de simulation (modèle thermo-halin) de la retenue a été conçu pour répondre à cette préoccupation :

— en temps réel, il suffit d'entrer des prévisions hydrométéorologiques pour les 30 jours à venir, l'état de la retenue et le programme de production prévu, pour simuler l'état de la retenue et connaître quand l'arrêt de la centrale sera nécessaire;

— hors temps réel, on peut utiliser des chroniques réelles passées pour tester telle ou telle politique de fonctionnement. Ceci permet pour l'avenir, en fonction de la sévérité des condi-

tions du moment, d'orienter le choix du programme de production le plus adapté.

V. - PRESENTATION DU MODELE THERMO-HALIN

La modélisation thermique réalisée en collaboration avec M.J. SALENCON [5] et [7] est effectuée à partir d'un modèle mathématique intégral, basé sur un bilan d'énergie. Ce modèle thermique prend en compte les échanges de chaleur à l'interface air-eau (y compris la formation et l'évolution d'une couche de glace) et les échanges d'énergie turbulente. Les mouvements des masses d'eau dus aux entrées et sorties d'eau sont re-

présentés par un modèle simple de transport couplé au précédent.

a) Mécanismes induits par les échanges atmosphériques.

L'approche de ce modèle est celle de Stefan et Ford [2]. Le modèle est unidimensionnel sur la verticale et instationnaire [3].

L'hypothèse de base consiste à supposer que la température est homogène sur une couche de mélange dont la hauteur est déterminée en permanence par le bilan entre l'énergie cinétique turbulente apportée en surface par le vent et la variation d'énergie potentielle de cette couche. Les équations considérées sont :

- l'équation de conservation de l'énergie interne,
- l'équation de l'énergie cinétique verticale.

L'originalité de la résolution consiste à découpler les 3 actions principales.

1 – pénétration du rayonnement solaire en profondeur et bilan de chaleur à l'interface air-eau.

2 – mouvements convectifs gravitationnels dus à un profil de densité instable à la suite d'un refroidissement en surface.

3 – mélange dû au vent : l'énergie cinétique turbulente créée par frottement du vent à la surface de l'eau contribue au mélange vertical des masses d'eau. Le mélange se fait jusqu'à l'équilibre entre cette énergie et la variation d'énergie potentielle.

b) Apports et soutirages d'eau dans la retenue.

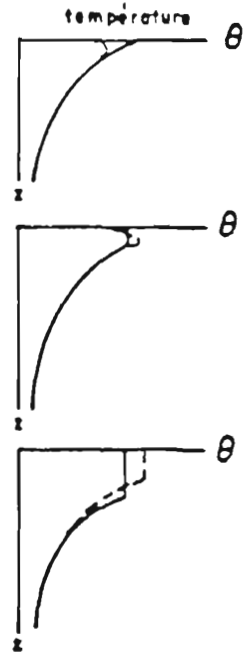
Le modèle de transport est unidimensionnel verticalement. Les équations qui interviennent sont :

- l'équation de continuité,
- l'équation de conservation de la chaleur.

Ces équations sont intégrées sur un volume élémentaire et discrétisées dans l'espace et le temps [5].

Les principales hypothèses sont :

- les entrées d'eau dans le réservoir se font à leur niveau de densité,
- les sorties d'eau sont centrées autour du niveau de soutirage,
- les débits d'entrée et de sortie d'eau sont distribués autour de la couche centrale selon un profil gaussien de vitesse [1] qui représente



l'entraînement des masses d'eau avoisinantes sous l'effet de jet.

c) Introduction de la salinité – Modèle thermo-halin de la retenue.

Ce modèle de base a été modifié pour représenter non seulement la variable température mais aussi la variable «concentration en ions chlorure». La densité de l'eau est déterminée en fonction de la température et de la concentration en sels. La formule approchée utilisée est celle retenue par Martin Knudsen pour l'eau de mer :

$$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = 1000 - \frac{(T - 3,98)^2 (T + 283)}{503,57 (T + 67,26)} + 0,815 (1 - A) (S + c)$$

avec

$$A = \frac{T}{1000} (4,787 - 0,0982 T + 0,001084 T^2)$$

où :

T : température de l'eau en °C

S : salinité en kg/m³

c : concentration en autres ions que le chlorure de sodium.

d) Résolution numérique.

Le schéma de résolution numérique est un schéma explicite. Le système est résolu avec un pas de temps de 3 heures qui correspond à la saisie des données météorologiques, et un pas d'espace vertical de 0,25 m.

Le découplage des phénomènes permet de résoudre successivement les équations suivantes à chaque pas de temps :

1) Transferts de chaleur à l'interface air-eau et pénétration du rayonnement solaire dans les couches profondes.

2) Mélange convectif.

3) Mélange dû à l'action du vent.

4) Processus d'advection.

Les étapes 1 à 3 concernent uniquement la stratification verticale.

L'étape 4, basée sur le transport par advection, consiste en un échange de masse entre les couches, lequel modifie la distribution de la température.

La résolution de ce modèle de transport (phénomènes advectifs) par un schéma explicite demande un critère de stabilité [5].

Ce modèle, mis au point avec les données de la retenue de Grangent sur la Loire, a donné des résultats très satisfaisants dans la comparaison des profils de température calculés et mesurés [5].

Ce modèle représente bien l'évolution annuelle du profil de température sur une période pouvant s'étendre à plusieurs années.

VI. – APPLICATION DU MODÈLE THERMO-HALIN À LA RETENUE DE MIRGENBACH

1) Données utilisées :

L'application a pu être menée sur 26 ans de 1961 à 1986, pour lesquels on disposait des données suivantes :

- Données météorologiques relevées toutes les 3 heures, à la station

de Nancy, par la Météorologie Nationale à savoir : pression atmosphérique, vitesse du vent, température d'air, nébulosité, humidité spécifique, tension de vapeur, thermomètre mouillé. Seul le rayonnement solaire a été calculé en fonction de la nébulosité [4].

- Débits de la Moselle mesurés à Hauconcourt et corrigés par la formule :

débit (Hauconcourt)
 $= 1,1 \cdot \text{Débit (Hauconcourt)} + 1,5.$

Si ce débit est inférieur à $26 \text{ m}^3/\text{s}$, on compense l'évaporation des réfrigérants par des lâchures d'eau au barrage de Vieux-Pré.

- Données topographiques de la retenue.

- Par ailleurs les températures de la Moselle à l'amont de CATTENOM ont été reconstituées en considérant que les centrales amont de BLENOD, La MAXE fonctionnaient à 30 % et RICHEMONT à 75 % de leur puissance nominale.

- Pour la salinité de la Moselle, les salinités mesurées en 1986-1987 proches de l'état actuel ont été utilisées pour toute la période.

2) Exemple de simulation hors temps réel :

L'exemple présenté ici correspond à la période de juin à septembre 1976 (période très chaude et de débit Moselle faible) pour 2 tranches et 4 tranches.

a) Cas de 2 tranches en fonctionnement (Figure 4)

On remarque sur les courbes, que pendant la première quinzaine de Juillet, le débit amont en Moselle descend très rarement en dessous du seuil de $13,75 \text{ m}^3/\text{s}$. Ceci se produit durant 1 ou 2 journées consécutives, au cours desquelles le niveau de la retenue baisse et réaugmente ensuite.

Entre le 14 août et le 9 septembre 1976, les périodes consécutives pendant lesquelles le débit est inférieur à $13,75 \text{ m}^3/\text{s}$ sont plus longues. On note sur la courbe de niveau, d'abord une baisse de la retenue, puis le remplissage. Ainsi, après le 9 septembre le débit en Moselle redevient supérieur au seuil.

Lorsque ce débit est inférieur à $26 \text{ m}^3/\text{s}$, il faut y ajouter le soutien effectué depuis le barrage de Vieux-Pré, égal au débit évaporé dans les réfrigérants.

Par contre, si la température à la prise reste inférieure à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et lorsque la retenue est au plus bas, la teneur en chlorures à la prise tangente la limite admissible pour les rejets en Moselle. Cependant, du fait du remplissage, il y a dilution et lors de la reprise du fonctionnement normal, la teneur en chlorure est inférieure à la limite admissible.

Durant cette période avec les données réelles, pour 2 tranches, le fonctionnement de sauvegarde n'a pas été nécessaire, car le niveau critique de la cote de 177,3 NGF n'a pas été atteint. Les deux tranches sont donc

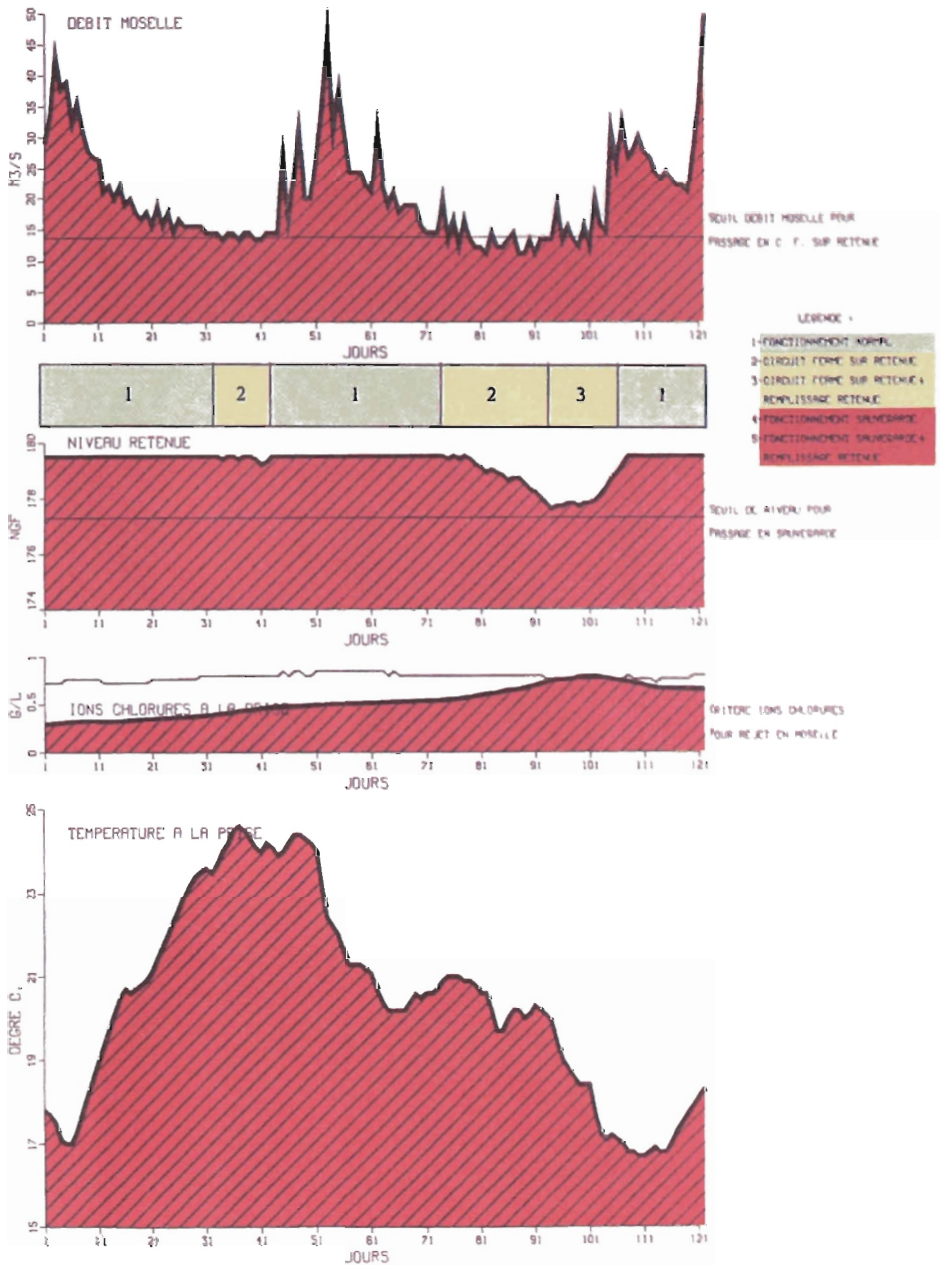


Fig. 4. - Cattenom-Mirgenbach : fonctionnement suivant débit Moselle à l'amont - Salinité 1986 - 1987.

2 tranches - période juin à septembre 1976.

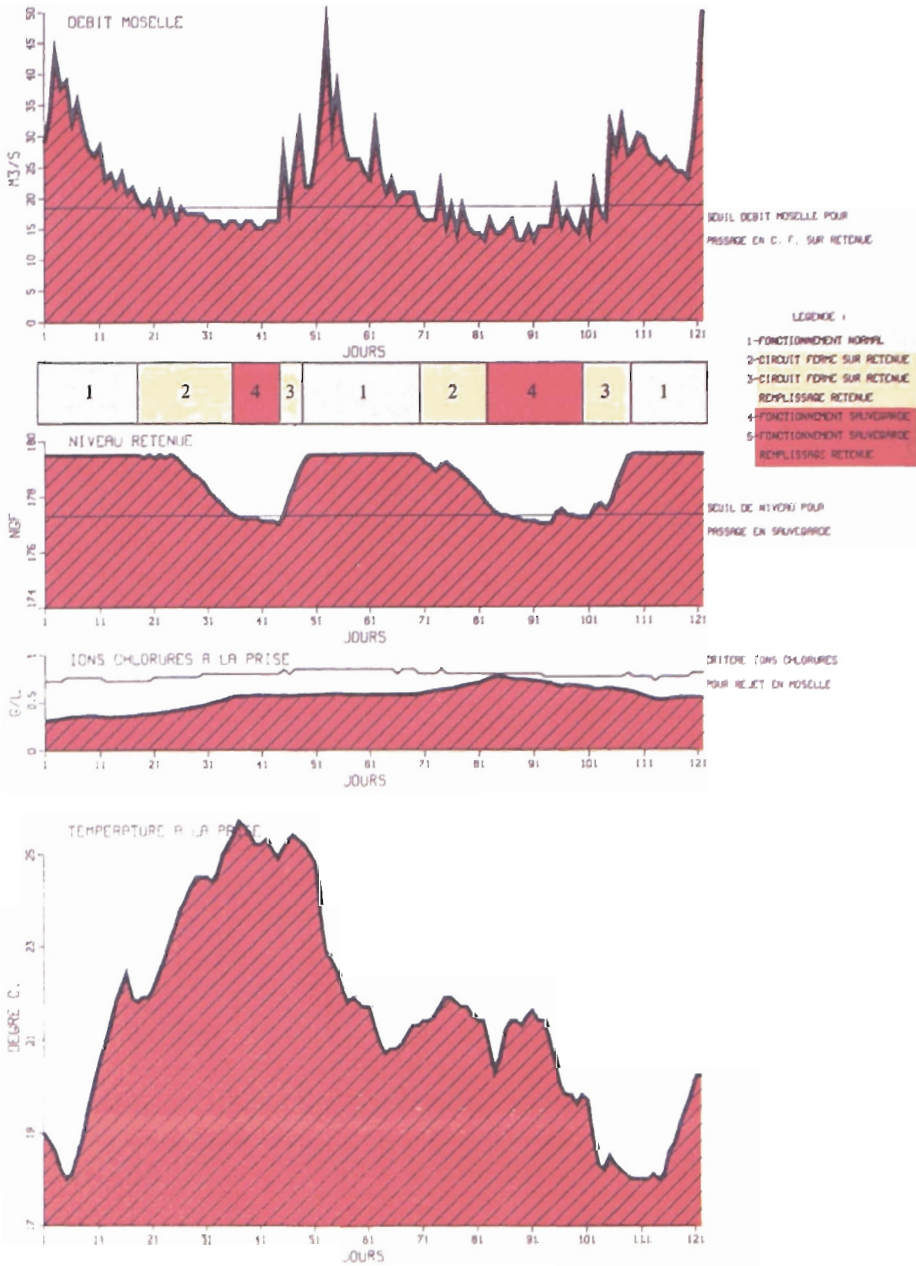


Fig. 5. - Cattenom-Mirgenbach : fonctionnement mixte/débit Moselle à l'amont - années 1986-1987
 4 tranches - période juin à septembre 1976.

en permanence à pleine charge : 2600 MW.

b) Cas de 4 tranches en fonctionnement (Figure 5)

La figure 5 permet de voir les périodes où la centrale fonctionne normalement (couleur verte), celles où 2 tranches au moins sont refroidies par la retenue mais fonctionnent à pleine puissance (couleur jaune), et enfin les périodes où 2, voire 4 tranches, se trouvent en fonctionnement de sauvegarde (couleur rouge).

On note que en retenue, la température à la prise reste inférieure à 26 °C et la teneur en chlorures reste au-dessous de la limite admissible pour les rejets en Moselle. Par contre c'est le niveau de la retenue qui oblige à passer en fonctionnement de sauvegarde.

3) Synthèse des résultats obtenus pour les conditions rencontrées entre 1961 et 1986.

Les calculs ont été effectués pour la période 1961-1986, avec les données chronologiques réelles pour l'hydrologie et la météorologie, et une chronologie type (1986-1987) pour les teneurs en chlorures.

Dans la configuration de **deux tranches en fonctionnement**, seules les contraintes de débit de Moselle ont imposé un passage en circuit fermé sur la retenue en été 1976. Durant la période où le débit est inférieur à 13,75 m³/s, la retenue de Mirgenbach

permet le refroidissement des deux tranches fonctionnant à pleine puissance, sans aucun arrêt : *il n'y a pas de période d'indisponibilité.*

Lorsque la centrale est équipée de **4 tranches** les contraintes imposant un passage en circuit fermé sur la retenue sont d'abord le débit de Moselle, de juin à septembre 1976, mais aussi l'échauffement amont-aval, en novembre et décembre 1962.

Pour la période hivernale, le fonctionnement en circuit fermé sur la retenue a permis d'attendre les conditions favorables de rejet sans mettre la centrale en indisponibilité.

Pour la période juin-septembre 1976, les deux types de fonctionnement envisagés montrent qu'il faut s'arrêter 40 jours si les quatre tranches fonctionnent sur la retenue, et seulement 23 jours si deux tranches fonctionnent sur la Moselle et les deux autres sur la retenue.

VII. UTILISATION DU MODELE THERMO-HALIN EN GESTION TEMPS REEL

Pour l'exploitant de la centrale il est important de prévoir, lors d'une période critique du point de vue des contraintes, la meilleure gestion possible pour éviter le maximum d'indisponibilité. Pour cela, un logiciel interactif utilisable en temps réel à partir de la centrale de CATTENOM a été réalisé.

Ce logiciel exploite les données hydrométéorologiques connues jus-

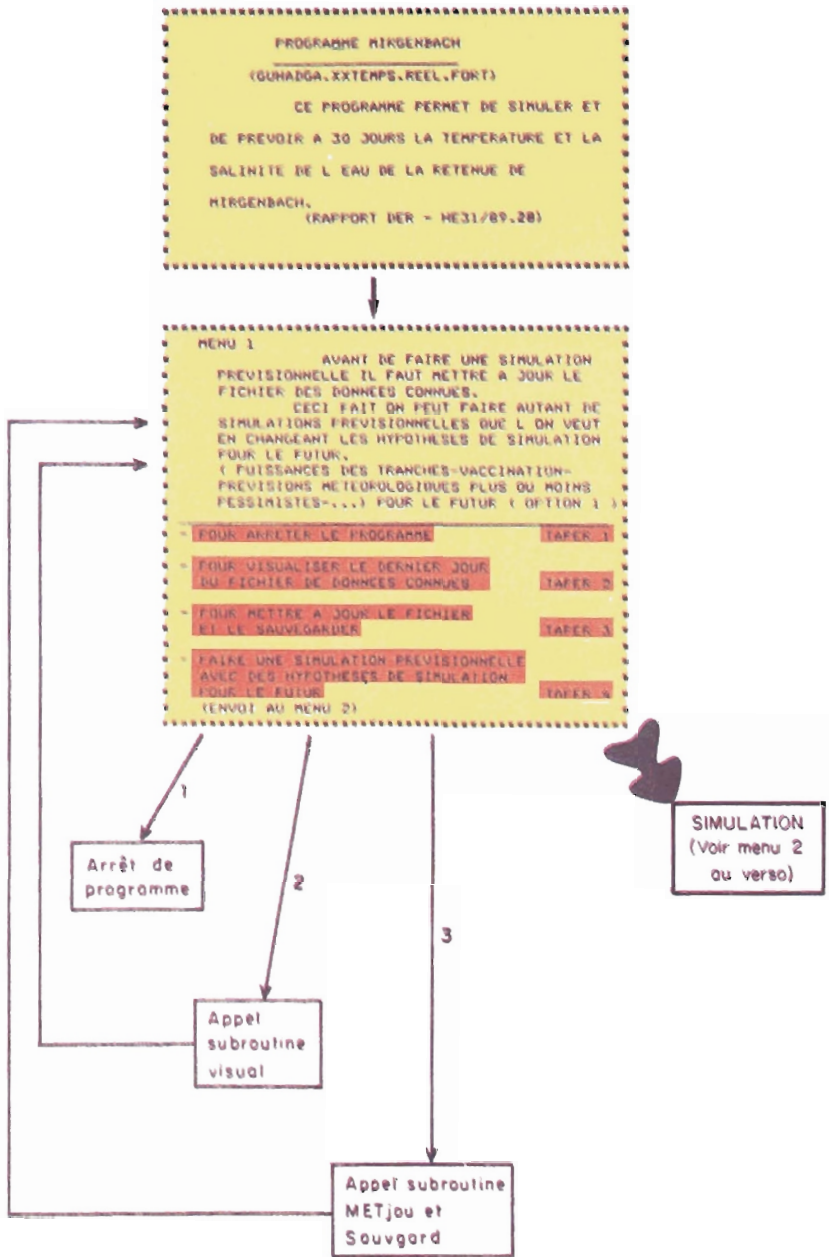


Fig. 6. - Principe de fonctionnement du programme.



MENU 2

SIMULATION PREVISIONNELLE DE LA TEMPERATURE ET DE LA SALINITE DE L'EAU DE LA LA RETENUE DE MIRGENBACH

LE PROGRAMME "SALTEMP" A ETE MODIFIE NOTAMMENT POUR TENIR COMPTE DU FICHIER D'ENTREE DES DONNEES NECESSAIRES AU CALCUL. NEANMOINS LE PRINCIPE DU PROGRAMME "SALTEMP" RESTE INCHANGE. IL EST DECRIT EN DETAIL DANS LE RAPPORT DER NUMERO HE31/88-32. LES RESULTATS (TABLEAUX ET COURBES) POUR LES 30 DERNIERS JOURS DES VALEURS CONNUES DES PARAMETRES ET LES 30 JOURS SUIVANTS AVEC LES PARAMETRES PREVISIONNELS SORTIRONT SUR LA CONSOLE.

UNE OPTION PERMET DE LES OBTENIR SUR LISTING

- SIMULATION SANS IMPRESSION DES RESULTATS TAPER 1

- SIMULATION AVEC IMPRESSION DES RESULTATS TAPER 2



MENU 3

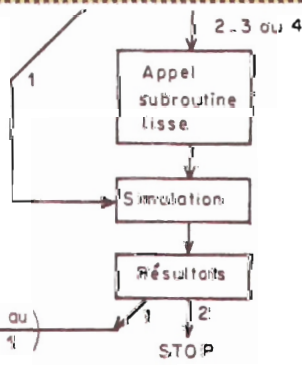
LE FICHIER ZZDONNEE.ACTUAL.DATA DES DONNEES DE LA PERIODE CONNUE DOIT ETRE COMPLETE PAR LES DONNEES DU SCENARIO TYPE CHOISI

LES DONNEES DU SCENARIO TYPE COMMENCERONT AU JOUR J+1 (J ETANT LE JOUR DE FIN DU FICHIER DES DONNEES CONNUES) ET COMPLETERONT CE FICHIER JUSQU'AU JOUR J + 41

LE FICHIER A DEJA ETE CREE ON VEUT SEULEMENT REFAIRE UNE SIMULATION TAPER 1

ON VEUT CREER LE FICHIER ET FAIRE UNE SIMULATION :

- AVEC LE SCENARIO PESSIMISTE TAPER 2
- AVEC LE SCENARIO MOYEN TAPER 3
- AVEC LE SCENARIO OPTIMISTE TAPER 4



On refait une simulation avec d'autres hypothèses (Retour au Menu 1)

Fig. 6(bis). -

qu'au jour de son utilisation, puis effectuée une simulation de la retenue pendant 30 jours, à partir d'un scénario de données hydrométéorologiques et de puissances prévues ou fixées par l'utilisateur.

L'utilisation de ce logiciel, en conversationnel sur console, permet de mettre à jour le fichier de données connues et de faire une simulation avec 3 scénarios types (pessimiste – moyen – optimiste). Son caractère interactif le rend facile à utiliser par des personnes ne connaissant pas le programme. Le principe de fonctionnement est donné en Figure 6.

VIII. CONCLUSION

Lorsque le débit de la Moselle est trop faible, ou bien qu'une défaillance des pompes de prélèvement en rivière se produit, il est possible de refroidir provisoirement la centrale de CATTENOM, fonctionnant à pleine charge, à condition d'utiliser la retenue de Mirgenbach.

Cependant des contraintes en température, niveau et salinité en retenue peuvent en interdire l'usage.

Il était donc impératif pour l'exploitant de disposer d'un outil de simulation qui permette de reproduire l'état de la retenue (température, niveau, salinité) en fonction des conditions de fonctionnement de la centrale, et ainsi d'en optimiser la gestion.

Un modèle thermo-halin de retenue a d'abord été élaboré à partir d'un

modèle thermique à bilan d'énergie. Complété par l'introduction du mode de fonctionnement de la centrale de CATTENOM, et des diverses contraintes afférentes, un modèle de simulation de la retenue a déjà servi à tester, hors temps réel, le fonctionnement des installations, pour des scénarios, sévères ou non, de la période 1961-1986. Ainsi, dans les conditions difficiles de l'été 1976, deux tranches auraient pu fonctionner à pleine charge, tandis que quatre tranches auraient subi 40 jours d'arrêt.

Ce modèle, adapté pour une utilisation prévisionnelle en temps réel, a été implanté sur le site. Il constitue un outil d'aide à la décision, et à la conduite de la centrale en cas de difficulté de prélèvement en eau dans la Moselle.

Cette étude est une illustration de l'aide que peuvent apporter éventuellement en temps réel les modèles de simulation de la qualité de l'eau dans la gestion des ressources en eau vis à vis des usages industriels.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Markofsky M., Harleman DRF. A predictive model for thermal stratification and water quality in reservoirs. MIT Hydrodynamics Laboratory Technical Report n 134, January 1971.
- [2] Stefan H., Ford D.C. Temperature dynamics in dimictic lakes. Journal of the Hydraulics Division ASCE. vol. 101, n HY1, PROC. paper 11858, p. 97-114, January 1975.

- [3] Klein P., Bonnaud E. Détermination du profil vertical de température d'une masse d'eau à partir des données météorologiques. Rapport EDF HE-31/77.19.
- [4] Klein P., Momal D. Présentation et mise en oeuvre numérique d'une méthode d'estimation du rayonnement solaire. Rapport HE31/79.15.
- [5] Enderle M.J. Détermination du profil vertical de température d'une retenue de barrage : application à la retenue de Grangent sur la Loire. Rapport HE31/80.33.
- [6] Roult D., Gilbert A. Impact de l'équipement nucléaire du site de CATTENOM sur le régime thermique de la Moselle. Rapport HE31/85.43.
- [7] Salençon M.J., Gilbert A. Comportement thermique de la retenue de Mirgenbach utilisé pour le fonctionnement de sauvegarde en "ULTIME SECOURS". Rapport HE31/86.14.