

# Rejet d'eau de refroidissement dans le Rhône à Verbois (GE): principe d'un ouvrage et essais sur modèles

Autor(en): **Bruschin, Jacques / Belkaloul, Ouahid**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **106 (1980)**

Heft 5

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-73934>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Rejet d'eau de refroidissement dans le Rhône à Verbois (GE)

## Principe d'un ouvrage et essais sur modèles

par Jacques Bruschin et Ouahid Belkaloul, Lausanne

Depuis le 7 mai 1974, un projet de centrale nucléaire à Verbois, en aval de Genève, est au bénéfice d'une autorisation de site délivrée par la Confédération. Cette autorisation, qu'il ne faut pas confondre avec l'autorisation nucléaire de construire, ne représente qu'une étape préliminaire de la procédure d'autorisation des installations atomiques et signifie simplement que l'emplacement choisi possède, aux yeux des autorités fédérales de sécurité, les caractéristiques permettant d'y envisager la construction d'une installation nucléaire.

Dans son préavis du 13 février 1974, le Conseil d'Etat genevois, après consultation des services cantonaux concernés, avait assorti sa prise de position favorable d'un certain nombre d'exigences, parmi lesquelles figure l'interdiction des tours de refroidissement et une restitution au Rhône de l'eau de refroidissement de la centrale conforme aux prescriptions fixées par l'Office fédéral de la protection de l'environnement.

Or, une commission d'experts nommée en 1966 par le département fédéral de l'intérieur et présidée par M. F. Baldinger, directeur du Service fédéral de la protection des eaux, dans le but d'étudier les effets biologiques d'un échauffement des eaux des lacs et des rivières, recommandait dans son rapport de mars 1968 la fixation de certaines valeurs limites à ce réchauffement, valeurs qui ont ensuite été reprises dans l'Ordonnance fédérale sur le déversement des eaux usées du 8 décembre 1975. Des valeurs similaires ont d'ailleurs également été adoptées par la plupart des pays qui nous entourent. C'est dans ce contexte qu'il faut placer les essais sur modèles décrits ci-après. A la lecture de cet article on constate que, s'agissant de la réalisation de grandes unités industrielles, la protection de l'environnement ne se cantonne pas au niveau des principes mais fait l'objet d'études d'envergure qui peuvent déboucher sur la réalisation d'ouvrages considérables.

Notons que des essais similaires ont été exécutés, à l'époque, pour les centrales nucléaires de Beznau, Mühleberg, Leibstadt, etc., et devront sans doute également être entrepris pour toute autre centrale thermique à refroidissement direct, qu'elle soit nucléaire, au mazout ou au charbon.

### 1. Introduction

L'objet de l'étude dont nous rendons compte ici, a été de trouver une solution satisfaisante au problème du rejet au Rhône de l'eau de refroidissement d'une unité d'environ 1000 MW, dans les limites des contraintes imposées par la législation suisse et celles résultant des conditions locales. Il s'agit notamment pour le site de Verbois, d'un réchauffement de l'eau du fleuve inférieur à 3°C en mélange homogène (une limite supérieure absolue est de plus fixée à 25°C), d'un réchauffement local inférieur à 10°C correspondant à la chaleur ajoutée à l'eau de refroidissement dont la température ne peut pas dépasser 30°C, et d'un mélange « aussi bon que possible » déjà au droit de la réserve de Cartigny (Moulin-de-Vert) à 500 m du rejet. Le mélange homogène serait à obtenir en amont de l'embouchure de l'Allondon à 2 km. La puissance thermique maximum pouvant être évacuée par la centrale est fixée à

2218 MW<sub>th</sub>, ce qui correspond à un débit de refroidissement de 53 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> réchauffé de 10°C. Compte tenu d'une charge thermique supplémentaire de 315 MW<sub>th</sub> réservée par le canton pour l'industrie, il en résulte un débit limite dans le Rhône, en aval du rejet, de 200 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, pour toutes températures inférieures à 25°C après mélange. Pour ce débit limite, la valeur moyenne du réchauffement de l'eau du Rhône dû au rejet est alors de 2,67°C. La consigne prévoit une réduction obligatoire de la puissance de l'usine et partant de la chaleur à évacuer, si l'une des limites citées risque d'être franchie.

Le cadre quantitatif de l'étude est ainsi défini: il faut pouvoir mélanger 53 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> d'eau réchauffée de 10°C à 147 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> d'eau du Rhône à température naturelle et obtenir un « bon mélange » sur 500 m environ.

Le problème décrit ci-dessus a été abordé dans le cadre des études de faisabilité d'une centrale nucléaire à Verbois, à la demande de l'EOS (Energie de l'Ouest

suisse SA). Toutefois, le rejet de chaleur n'est pas spécifiquement lié à ce mode de production de l'énergie, tout comme la solution proposée n'est pas liée au seul site particulier.

### 2. Solutions envisagées

La conception des ouvrages de rejet thermique exécutés un peu partout dans le monde est issue des conditions spécifiques des sites et des exigences de la législation, qui a passablement évolué d'ailleurs. On va du simple rejet en surface ou par le fond dans un émissaire — solutions à circuit ouvert — aux solutions en circuit fermé: bassins de refroidissement à circulation naturelle ou forcée, tours humides ou sèches à tirage naturel ou forcé, etc., auxquelles s'ajoutent les solutions mixtes, bien entendu. Or, on constate que la complexité des moyens techniques mis en œuvre s'accroît dans le même ordre, lequel est dès lors directement répercuté sur les coûts. Si la complexité comporte, comme l'expérience le prouve, des risques de défaillance accrus, il apparaît que les solutions les plus fiables dans ce cas ne sont pas nécessairement les plus chères. Encore faut-il que la charge thermique soit supportable pour l'émissaire préconisé. Dans l'état actuel des choses (1979), cela est bien le cas du Rhône en aval du barrage de Verbois, compte tenu des limites énoncées précédemment.

Une fois le choix fixé sur une solution à circuit ouvert, il apparaît rapidement que le rejet en surface et le rejet par le fond parallèle à la rive ne permettraient pas d'obtenir un bon mélange sur la distance relativement courte:  $L \simeq 6B$ , soit six largeurs du fleuve, réservée à cette fin. Ne reste alors qu'un ouvrage de fond qui doit entamer sérieusement, sinon traverser entièrement, le lit du Rhône.

A ce point, d'autres contraintes viennent heureusement limiter les possibilités encore trop nombreuses.

- pour des raisons évidentes, l'emprise de l'ouvrage sur la section d'écoulement doit être la plus faible possible. Il fut décidé de l'enfouir entièrement dans le lit et de limiter sa longueur à 40 m en projection normale au sens de l'écoulement. Ceci implique déjà au moins deux phases de batardage;
- par crainte des entraînements d'alluvions vers l'intérieur de l'ouvrage en cas d'arrêts imprévus ou lors des chasses trisannuelles de la retenue de Verbois située en amont, le rejet doit être orienté dans le sens de l'écoulement général;
- pour des raisons de sécurité d'exploitation le débit de rejet est à répartir en parts égales sur au moins deux galeries indépendantes.

La disposition en plan de l'ouvrage (forme, angle à la rive et longueur effective), la répartition du débit le long de

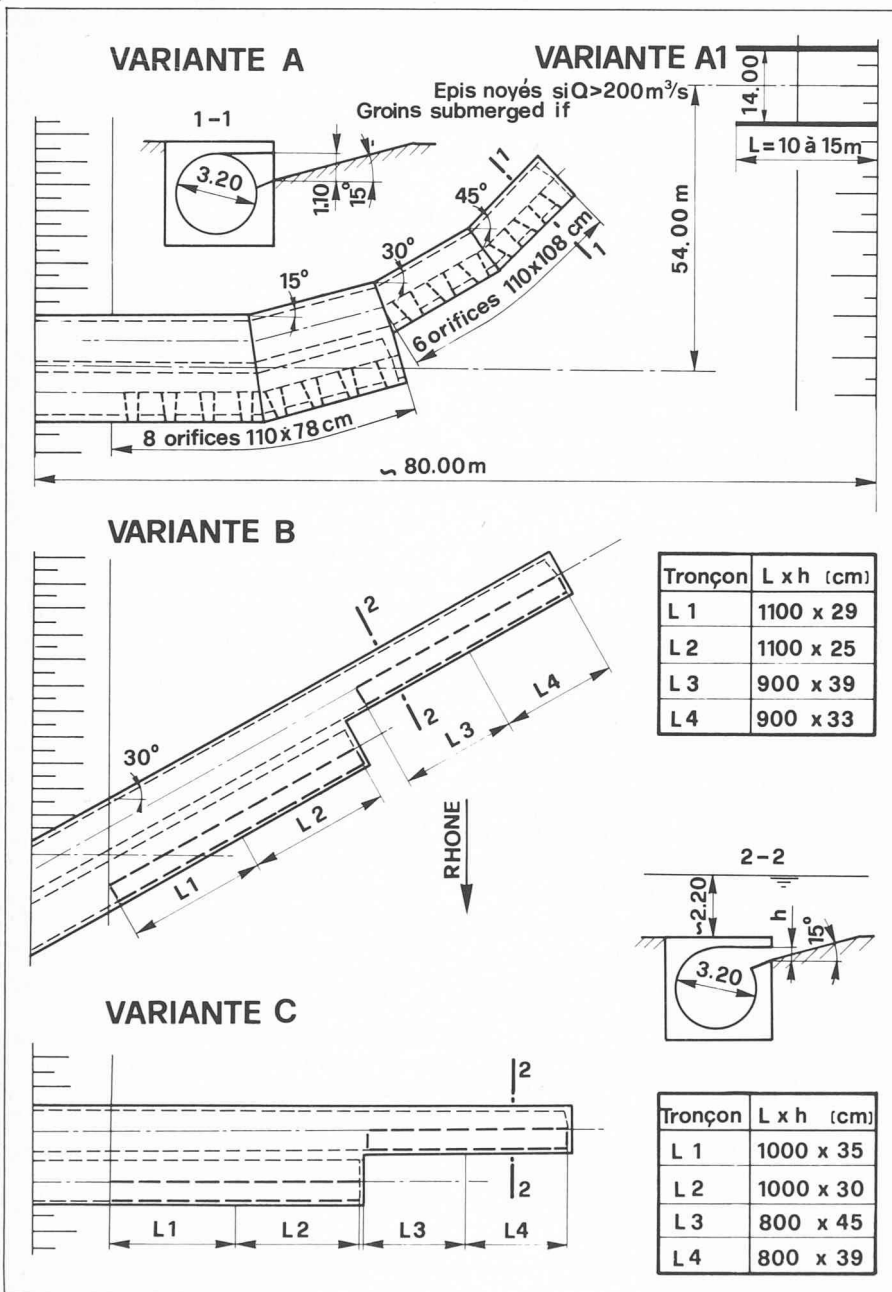


Fig. 1. — Types d'ouvrages essayés. Tested designs.

celui-ci, l'orientation des jets en plan vertical et le type d'orifice à utiliser — individuel (« multi-jet ») ou linéaire (« slot ») — restaient encore à déterminer impérativement ou à étudier plus loin. L'orientation en plan vertical des jets fut fixée à 15° vers le haut sur la base des expériences existantes et pour éviter le percement de la nappe à faibles débits du Rhône. Pour améliorer la diffusion des jets par aspiration d'un maximum du débit circulant à la rive opposée, le débit spécifique de rejet a été augmenté en direction de la partie centrale du profil en travers et les jets orientés de manière à obtenir des composantes transversales à l'écoulement général. C'est ainsi que furent élaborées les variantes A et B de la figure 1. La variante C fut conçue ultérieurement, au vu des résultats des essais.

### 3. Essais sur modèles

Les ouvrages projetés s'accordent mal avec les modèles de calcul disponibles, d'abord parce qu'il s'agit d'écoulements confinés assymétriques, ensuite parce que la disposition en plan pour la variante A — tout comme la forme et l'espacement des orifices ainsi que le rapport  $S_{\text{orifice}}/S_{\text{galerie}}$ , plutôt grand, s'éloignent des cas classiques. Nous avons donc eu recours aux essais sur modèles.

#### 3.1 Installation d'essai

L'élément essentiel de l'installation d'essai est la maquette au 1 : 40 reproduisant en dur 700 m du lit du Rhône. La similitude adoptée est celle de Froude, les traceurs sont la chaleur pour les essais quantitatifs, la phénolphtaléine pour la visualisation des écoulements.

Les caractéristiques du modèle ont été déterminées par les considérations suivantes :

1. La différence de densité entre eau de rejet et eau ambiante n'est pas significative ici car la profondeur d'écoulement se situe autour de 2.20 m en vraie grandeur pour le débit déterminant. S'agissant d'une diffusion de jet classique, les deux traceurs cités ont un comportement équivalent mais la chaleur peut être mesurée de manière beaucoup plus simple et précise. De plus, son effet polluant est non-persistant, ce qui n'est pas le cas pour les colorants.
2. Le compromis nécessaire entre le choix d'une échelle raisonnable, la place disponible pour la construction du modèle et le souci d'être du côté de la sécurité lors des essais, en reproduisant la plus grande partie possible du tronçon entre le point de rejet et l'Allondon, s'est effectué sur une prévision optimiste : un bon mélange devrait être obtenu à 500 m déjà en aval du rejet.

Une particularité du modèle résidait dans la possibilité de chauffer le lit pour compenser les pertes de chaleur éventuelles. Elle n'a pas été utilisée, ces dernières s'avérant négligeables.

Le système de production d'eau chaude comprend un réservoir de 1,5 m<sup>3</sup> d'eau portée à 90°C. Un mélangeur et un système de régulation contrôlant un jeu de vannes automatiques permettent de maintenir un  $\Delta T = (10 \pm 0,2)^\circ\text{C}$  entre l'eau de rejet et l'eau ambiante. La capacité du réservoir limite la durée d'un essai à 25 minutes.

Ces essais sont toutefois onéreux pour des examens préalables (emplacement et caractéristiques des épis par exemple, en variante A.1, fig. 1) et insuffisants pour l'étude des écoulements au voisinage de l'ouvrage. L'utilisation répétitive des colorants classiques risquant de contaminer l'ensemble du circuit hydraulique, nous avons préféré modifier le pH de l'eau et utiliser la phénolphtaléine qui reste incolore pour les  $pH < 8$  et devient pourpre pour un  $pH \geq 10$ .

Le calage du modèle a été fait en amont à partir de profils de vitesses mesurées dans le Rhône pour deux débits proches de  $200 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ , pour les lignes d'eau à partir des observations et calculs au moyen du programme « Water Surface Profiles » du Corps of Engineers de l'US Army.

Pour la comparaison des variantes, les mesures ont été faites dans le seul profil à 500 m en aval du point de rejet, en 40 à 50 points. Ce n'est qu'ensuite que, pour la variante C, les températures et les vitesses ont été relevées dans les sections à 20, 50, 100, 200, 300, 400 et 500 m. La mesure des températures a été effectuée au moyen de sondes en platine d'une précision de 0,1°C. Son exécution

et le traitement des résultats ont été pilotés par ordinateur : échantillonnage à 2 Hz, choix de la série de 300 mesures consécutives à écart type inférieur à  $0,2^{\circ}\text{C}$ , calculs et impression des  $\Delta T$  moyennes par point de mesure. Les mesures de vitesse au micromoulinet, plus classiques pour les manipulations, comportaient aussi une sortie accédant à l'ordinateur pour le traitement du signal en fréquence, correspondant.

De plus, des prises de vues en infrarouge pour la visualisation de la diffusion thermique superficielle et des relevés de lignes d'eau, notamment pour les phases d'exécution, ont aussi été faites.

### 3.2 Comparaison des variantes

Comme nous l'avons déjà dit, seules les variantes A et B de la figure 1 ont été envisagées au départ. Elles sont équivalentes au point de vue de la répartition des débits spécifiques (par  $\text{m}^2$  d'ouvrage) et au point de vue de l'orientation moyenne de l'axe de l'ouvrage. Toutefois, alors que pour la variante A nous pouvions contrôler l'orientation des jets par un guidage suffisant et déterminer jusqu'aux coefficients de débit des orifices individuels [1]<sup>1</sup>, soit contrôler par là la quantité de mouvement transversale à l'écoulement général, ce n'était pas le cas de la variante B. Ici la répartition du débit peut être calculée avec une bonne précision [2, 3] mais les composantes transversales doivent être déterminées expérimentalement — figure 2 — par des procédés fastidieux. Les avantages de simplicité et de possibilités de protection du débouché dans cette variante étant importants, elle ne pouvait pas être rejetée.

Les résultats obtenus pour un débit du Rhône totalisant  $180 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , sont montrés à la figure 3. Ils sont éloquentes. Les deux variantes dispersent bien l'excès de chaleur puisque, après un parcours de 500 m les écarts maxima ne sont que de 6 et  $7/10^{\circ}\text{C}$  respectivement. Notre optimisme initial était donc justifié. Néanmoins :

- le « noyau chaud » de la variante A est mieux centré et moins étendu que son correspondant en B ;
- alors qu'en variante A c'est la rive gauche qui est « froide », en B c'est la rive droite. Les deux zones ne sont pas de même importance mais témoignent par leur présence d'un défaut, respectivement d'un excès de quantité de mouvement transversale au débouché de l'ouvrage.

La mise en place d'épis sur la rive gauche, en amont du rejet — variante A1, figure 1 — n'a pas produit de changement significatif de l'image de la dispersion thermique ( $\Delta T_{\text{max}} = 3,4^{\circ}\text{C}$  toutefois). Il en va de même pour la réduction à  $20^{\circ}$

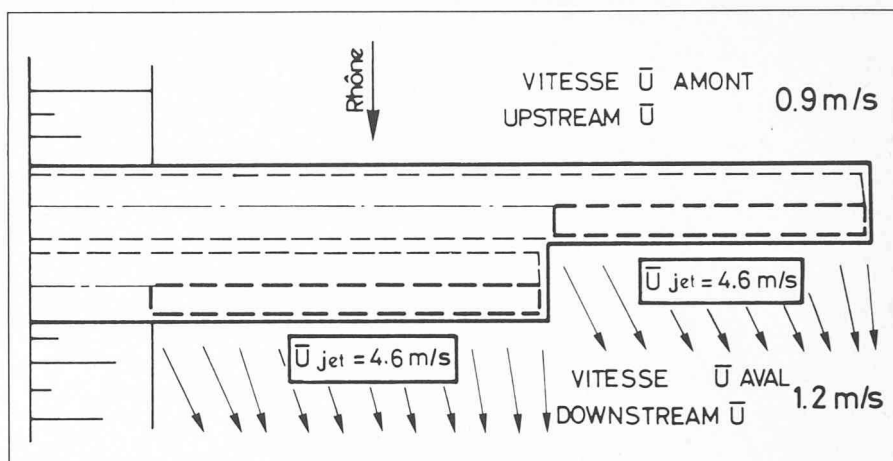


Fig. 2. — Orientations des filets et vitesses moyennes. Jet flow directions and average velocities.

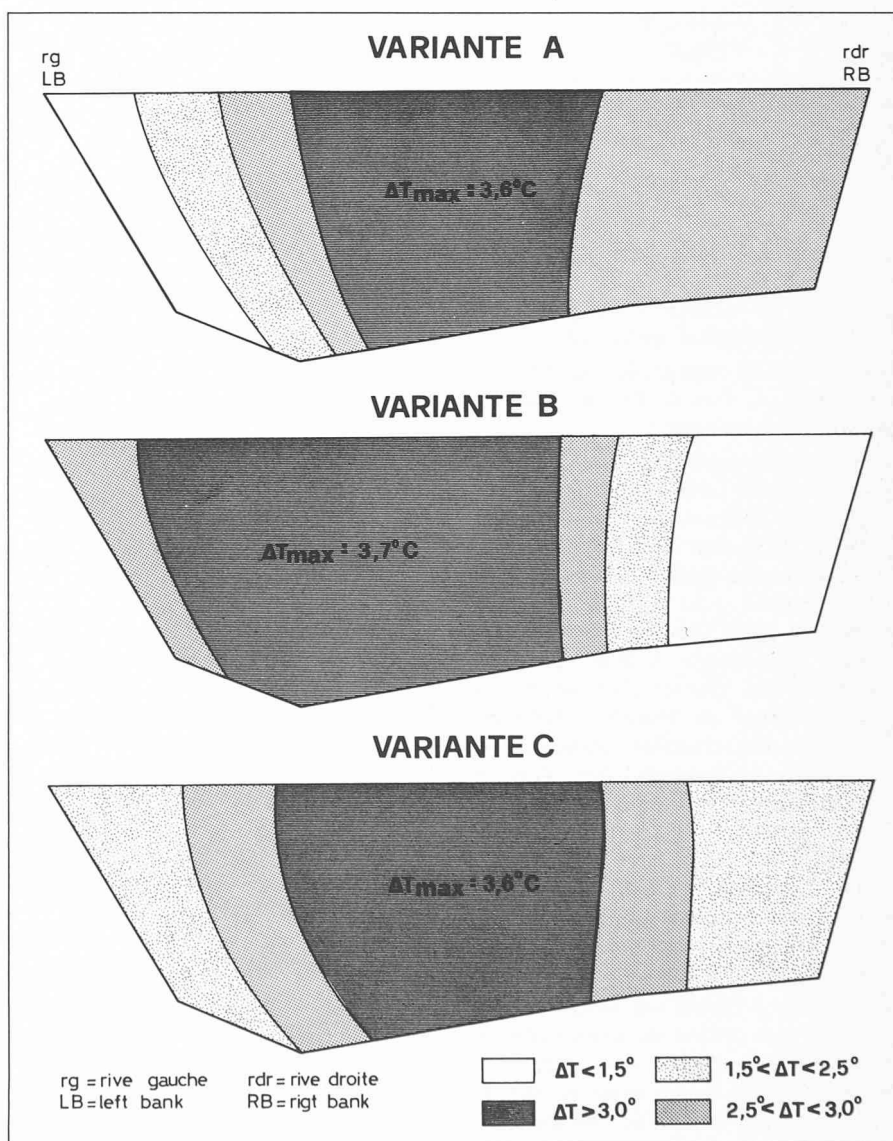


Fig. 3. — Profil thermique à 500 m du rejet. Heat dilution at 500 m downstream of outlet.

de l'angle à la rive des galeries en variante B. D'où l'idée de la variante C — figures 1 et 3.

Le profil thermique en variante C est tout à fait satisfaisant : le « noyau chaud » n'est que légèrement plus grand qu'en variante A,  $\Delta T_{\text{max}} = 3,6^{\circ}\text{C}$ , l'image de dispersion est bien centrée et équilibrée, ce à quoi s'ajoute l'absence de zones « froides ». Dès lors cette variante a été préférée aux deux autres

et ceci d'autant plus qu'elle est manifestement la moins onéreuse à réaliser.

3.3 Ouvrage proposé, études de détail  
Comme nous l'avons déjà dit, une étude de détail a été faite pour la variante C afin de

- vérifier le bilan de chaleur tout le long du tronçon d'essai ;
- se faire une idée aussi nette que possible du déroulement de la dispersion

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

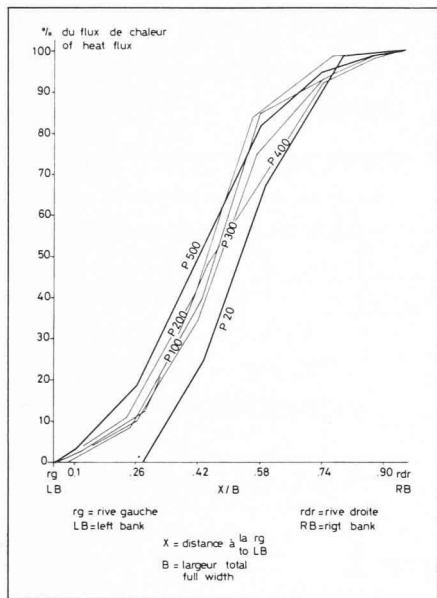


Fig. 4. — Distributions cumulatives du flux de chaleur dans les profils de mesure. Cumulative heat-flux distribution for various cross-sections.

thermique dans le fleuve pour comprendre et prédire raisonnablement ce qui se passera à l'extérieur du tronçon reproduit au modèle.

Les résultats de cette étude sont montrés aux figures 4, 5 et 6. Ils appellent les commentaires suivants :

— le bilan thermique, déjà calculé pour le profil 500 dans la série précédente d'essais, indique clairement que les pertes de chaleur dans le modèle sont effectivement négligeables. Les écarts, inférieurs à  $\pm 10\%$ , sont aléatoires et dus, pour l'essentiel, à la nature des instruments utilisés pour la mesure des vitesses d'écoulement et aux erreurs de mesure inhérentes. Les courbes intégrales compensées de la figure 4 s'inscrivent bien dans un fuseau qui permet déjà une première interprétation du phénomène : l'essentiel du mélange est nettement le fait des cent premiers mètres. De plus, en fin du tronçon, 60 % du flux de chaleur est concentré dans le tiers central de la section du fleuve ;

— la figure 5 donne une image synthétique plus précise du phénomène de diffusion-dispersion ayant lieu dans le modèle. L'allure exponentielle de la courbe écart de température moyen — distance, permet de délimiter à 300 m environ la zone de diffusion de jet (« near field ») après laquelle suit la dispersion, à caractère asymptotique. Bien entendu, ni les pertes de chaleur à l'atmosphère, ni les effets de coude ne sont considérés ici parce que, comme déjà dit, ils sont inexistantes au modèle. Il apparaît toutefois qu'à 500 m en vraie grandeur, l'écart moyen par rapport au mélange homogène ne sera plus que de  $0,577^\circ\text{C}$  au plus dans des conditions analogues à l'essai ;

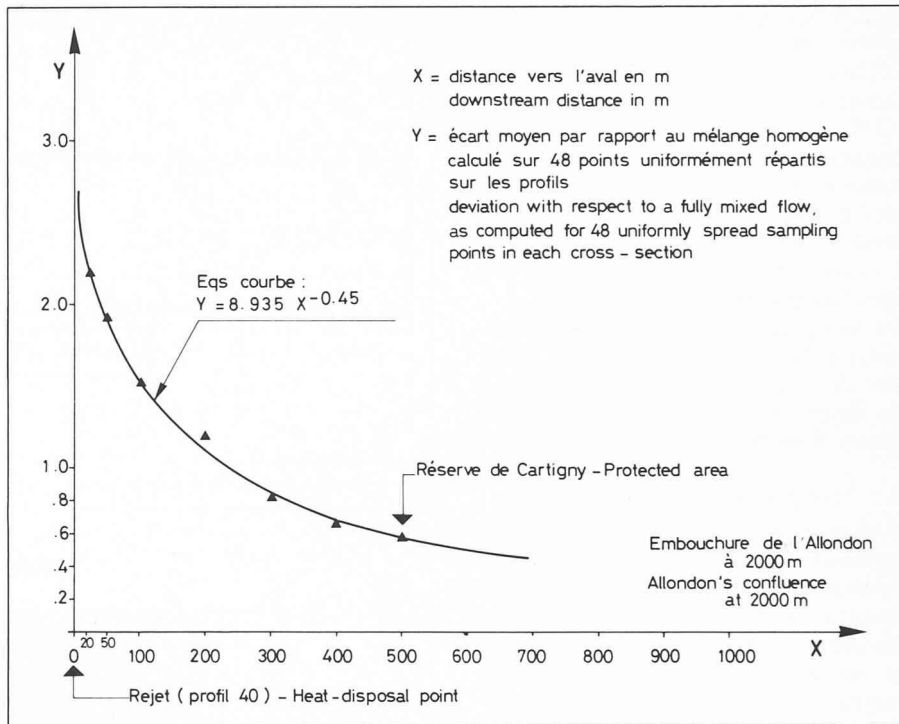


Fig. 5. — Variation le long du fleuve de l'écart moyen entre distribution effective des excès de chaleur et le mélange homogène. Downstream variation in average deviation between effective heat excess and a fully mixed flow.

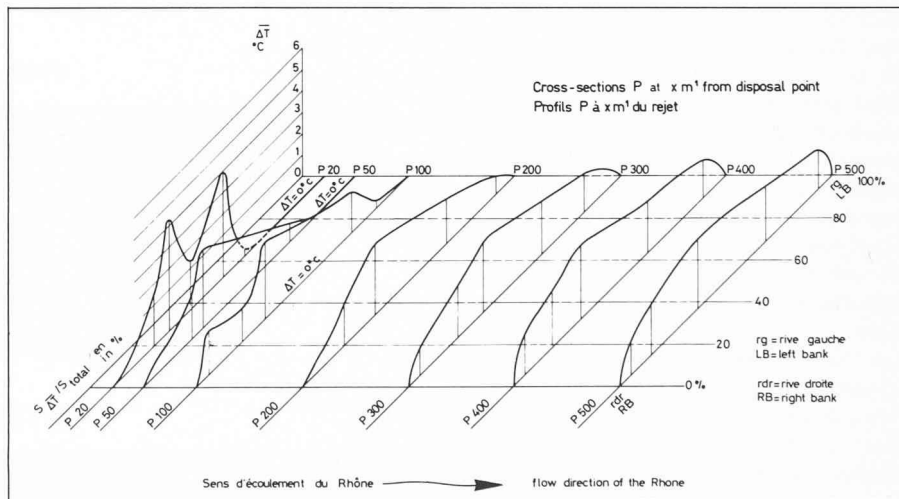


Fig. 6. — Développement spatial du mélange eau de refroidissement — eau ambiante. Spatial pattern of mixing between cooling and ambient water.

— enfin, le diagramme spatial de la figure 6 montre une image détaillée du phénomène : les deux galeries et le « trou » de chaleur entre elles dû à l'orientation des filets — voir figure 2 — sont encore visibles à 20 m en aval du rejet. On peut aussi très bien suivre le « comblement » de la zone « froide » sur la rive gauche et la progression du mélange telle qu'elle apparaît du lissage des profils  $S_{\Delta T}/S_{tot}$  —  $\Delta T$  — distance, en direction de l'aval.

Les résultats détaillés des mesures montrent encore qu'entre 20 et 50 m du rejet la répartition de l'excès de chaleur devient uniforme le long des verticales respectives, ce qui confirme notre jugement initial et le choix du type de similitude. A 50 m,  $\Delta T_{max} < 5^\circ\text{C}$ , à 200 m,

$\Delta T_{max} < 4,0^\circ\text{C}$ , à 500 m enfin il tombe à  $3,5^\circ\text{C}$ .

#### 4. Conclusions

L'étude faite par le Laboratoire d'hydraulique a confirmé la possibilité — hypothèse d'avant-projet au départ — d'obtenir avec un ouvrage relativement simple et peu onéreux, un mélange entre eau de refroidissement et eau ambiante satisfaisant aux conditions locales et à celles du législateur. Ce jugement prend en compte le fait que le modèle est nettement du côté de la sécurité puisque les pertes de chaleur à l'atmosphère n'y sont pas prises en compte et les deux coudes suivant le tronçon d'essai ont, comme on le sait, un effet très marqué et favorable sur le mélange.

## Bibliographie

- [1] BRUSCHIN J. et al. : *Refroidissement d'une usine de 1000 MW. Rejet par le fond dans le Rhône*. Communication au 18<sup>e</sup> Congrès AIRH, Cagliari, 1979.
- [2] KELLER J. D., PITTSBURGH P. A. : *The Manifold Problem*, Journ. Applied Mech., March, 1949.
- [3] VIGANDER S. : *Internal Hydraulics of Thermal Discharge Diffusers*, Journ. Hydr. Div. ASCE, HY2, 1970.

Nous n'avons présenté ici que les résultats obtenus pour le débit déterminant, soit 180 et ensuite 200 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> dans le Rhône en aval du rejet. Les essais faits avec des débits supérieurs ont en effet montré qu'à 300 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> déjà le  $\Delta T_{\max}$  au profil 500 ne dépassait plus 3°C. Notre étude a donc été centrée sur le cas le plus défavorable.

Par ailleurs, les résultats obtenus ont démontré que les essais sur modèles étaient dans notre cas une nécessité : les écarts entre théorie et mesures se sont

avérés trop grands, l'hydraulique du « multi-jet diffuser » et celle du « slot-diffuser », trop différentes, enfin les éléments de détail, incontrôlables par les calculs, trop importants.

## Adresse des auteurs :

Jacques Bruschin et Ouahid Belkaloul  
Laboratoire d'hydraulique  
de l'Ecole polytechnique fédérale  
de Lausanne (LHYDREP)  
EPF-L Ecublens  
CH-1015 Lausanne

## Industrie et technique

## Couplage énergie-chaleur

On entend sous la notion de couplage énergie-chaleur la transformation qui intervient successivement et échelonnée en gradins de qualité de l'énergie fossile en énergie électrique et chaleur utile. La proportion d'énergie de haute qualité qu'il est possible d'obtenir, c'est-à-dire de travail mécanique pour la génération de courant, est, de par sa nature, fonction des températures auxquelles la chaleur peut être amenée et évacuée du processus de transformation. Elle pourrait théoriquement atteindre au maximum

$$\eta_c = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}}$$

avec le processus se déroulant sans pertes imaginé par Carnot. Etant donné que la température doit être mesurée à partir du point 0 absolu, 0 Kelvin = -273°C, il apparaît clairement que sur notre terre la chaleur ne peut jamais être complètement transformée en travail ; un montant résiduel doit toujours être cédé à une température plus basse.

D'autre part, le processus de Carnot ne peut être appliqué qu'approximativement dans les centrales et il apparaît encore d'autres pertes dans les machines, dans le générateur de vapeur et dans les autres parties calorifiques de l'installation.

Par contre, la chaleur de chauffage peut être obtenue à partir des combustibles relativement avec de faibles pertes et ce, avec un quota de conversion d'environ  $u = 0,85$  dans les grandes installations et les chauffages urbains et  $u = 0,65$  ou moins dans les chauffages individuels de moindres dimensions.

La figure 1A représente un bilan énergétique typique de la génération de chaleur dans une grande centrale de chauffage. L'on peut obtenir une puissance calorifique de chauffage d'environ  $Q_H = 85\%$  à partir de  $Q_B = 100\%$  de l'énergie contenue dans le combustible. Environ  $Q_K = 15\%$  sont perdus par les gaz de fumée, etc.

Par contre la figure 1b représente un bilan énergétique typique d'une centrale

à vapeur alimentée à l'huile ou au gaz. Seule une proportion de  $E_0 = 40\%$  de l'énergie calorifique du combustible peut être transformée en électricité pour les raisons mentionnées ci-dessus.  $Q_V = 45\%$  disparaissent sous forme d'eau de refroidissement réchauffée à environ 30°C (par exemple dans la tour de refroidissement par évaporation) et  $Q_K = 15\%$  constitue également ici des pertes résiduelles (cheminée, etc.). Mais si l'on évacue la chaleur perdue  $Q_V$  de la centrale à 130°C à la place de 30°C, celle-ci serait pleinement utilisable comme chaleur de chauffage  $Q_H$ . L'on obtiendrait en conséquence le bilan énergétique du couplage énergie-chaleur figure 1c, comportant une proportion d'électricité de  $E = 32\%$ .

Avec les pertes résiduelles à peu près identiques  $Q_K = 15\%$ , on obtient la chaleur de chauffage acquise à partir du combustible :

$$Q_H = Q_B - E - Q_K = 100 - 32 - 15 = 53\%$$

Grâce à une transformation de l'énergie du combustible échelonnée en fonction du but d'utilisation, le couplage énergie-chaleur permet de produire de l'électricité avec un aussi bon rendement que pour la chaleur de chauffage. Ceci apparaît clairement lorsque la proportion de combustible nécessaire pour la produc-

tion de 53 % de chaleur de chauffage imaginée séparément, est portée au crédit de la production d'électricité

$$\Delta Q_B = \frac{Q_H}{u} = \frac{53}{0,85} = 62,4\%$$

laquelle pour sa part atteint alors justement un rendement de

$$\eta_{\text{Kop}} = \frac{E}{Q_B - \Delta Q_B} = \frac{32}{100 - 62,4} = 0,85$$

Etant donné que le rendement pouvant ainsi être obtenu s'élève à plus du double des 40 % de celui de la production de courant, le couplage énergie-chaleur permet une économie de combustible d'au moins 50 %.

Considérons à présent la situation de la chaleur de chauffage : une énergie électrique égale à

$$\Delta E = E_0 - E = 40 - 32 = 8\%$$

doit être ajoutée pour valoriser les 45 % de la chaleur perdue à 30°C de la production d'énergie électrique pure aux 53 % de chaleur de chauffage à 130°C. Le couplage énergie-chaleur représente donc dans une certaine mesure un processus de pompe à chaleur indirect qui, avec les chiffres réalistes choisis comme exemple, apporte un coefficient de rendement du chauffage de

$$\varepsilon_{\text{Kop}} = \frac{Q_H}{\Delta E} = \frac{53}{8} = 6,6$$

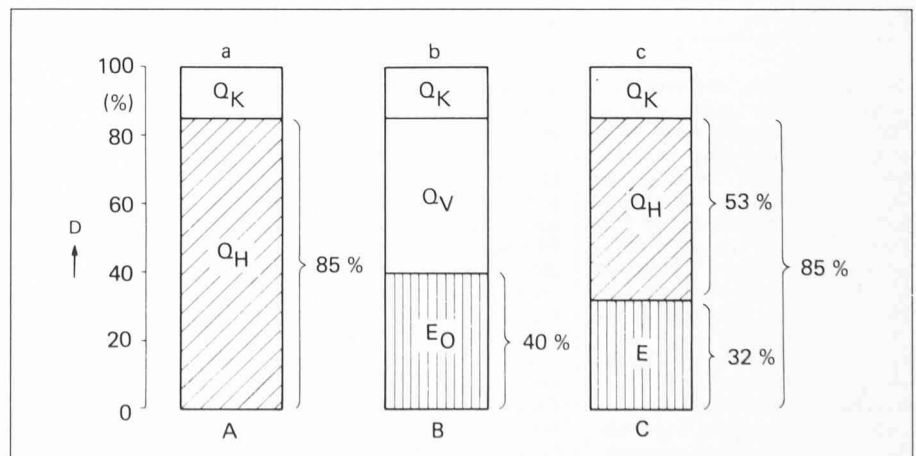


Fig. 1. — Production d'électricité avec de faibles pertes grâce au couplage énergie-chaleur. Légende :  
A Chaaleur  
B Energie électrique  
C Couplage énergie électrique-chaleur  
D Puissance calorifique du combustible