

C.E.A. - E.D.F.

CYCLES DE CONFERENCES SUR
LES SOURCES FROIDES DES CENTRALES ELECTRIQUES
ROYAUMONT : 6 - 10 OCTOBRE 1975

LES REFRIGERANTS HUMIDES A TIRAGE FORCE

A. DAUBERT - L. CAUDRON - P.L. VIOLET

ELECTRICITE DE FRANCE

- RESUME -

INIS input
MF prepared

Pour évacuer les calories rejetées par une tranche de 1000 MW, il faut une tour à tirage naturel de 130 m de diamètre à la base et de 170 m de hauteur environ, ou un réfrigérant à tirage forcé par une quarantaine de ventilateurs, d'une centaine de mètres de diamètre et d'une trentaine de mètres de hauteurs.

Les panaches de réfrigérants atmosphériques forment, du point de vue de la mécanique des fluides des jets chauds dans un courant traversier. Ils sont le siège d'écoulements complexes qui nécessitent des études fines par des moyens expérimentaux et informatiques.

Ces études, actuellement en cours au Laboratoire National d'Hydraulique, permettent de penser que tant sur la longueur que la hauteur des panaches visibles la comparaison est à l'avantage de certains types de réfrigérants à tirage forcé, pour des vitesses de vent faibles et moyennes, inférieures à 5 ou 6 m/s à 10 m d'altitude. Au delà de ces vitesses, le tirage forcé envoie le panache moins haut, mais ce dernier est, en général, plus dilué.

Les besoins en électricité s'accompagnent de besoins en source froide encore plus puissante. Cette source froide représente avant tout une masse importante d'eau ou d'air pour recueillir les calories rejetées par la centrale. Par tranche de 1000 à 1200 MW le circuit ouvert utilise un débit de 40 à 50 m³/s d'eau, les réfrigérants atmosphériques de 20 000 à 25 000 m³/s d'air. Nous avons, en France, un très large accès aux masses d'eau maritime. Par contre, à l'intérieur des terres, l'équipement de nos grands fleuves en circuits ouverts de refroidissement des condenseurs est assez vite limité. Dans ce cas, nous aurons donc recours aux circuits fermés avec des réfrigérants atmosphériques.

S'ils ne nécessitent pas la présence d'une grande quantité d'eau courante, il faut cependant remarquer que les réfrigérants humides consomment de l'eau sur le site même de la centrale par évaporation. La chaleur évacuée des condenseurs est renvoyée dans l'atmosphère pour 70% sous forme de chaleur latente. C'est précisément cette vapeur d'eau qui peut se condenser à la sortie des réfrigérants et créer des panaches qui signalent parfois la présence des centrales. Peut-on éviter ces panaches ? Dans l'état actuel de la technologie des réfrigérants secs, cela risque de coûter très cher et des recherches sont effectuées dans ce sens. Par ailleurs, pour faire circuler les gros débits d'air nécessaires à refroidir l'eau des condenseurs en n'utilisant que le tirage naturel résultant de l'échauffement de l'air, il faut des tours très grosses et très hautes qui peuvent déparer le paysage si elles ne sont pas camouflées par le paysage lui-même.

De toutes ces considérations est née à Electricité de France le désir d'approfondir les connaissances sur un type spécial de réfrigérant humide, celui où l'on n'utiliserait plus la chaleur récupérée sous forme sensible pour assurer la circulation d'air qui serait alors forcée par des ventilateurs. Il n'est plus alors nécessaire de construire des tours aussi hautes, mais le panache rejeté à plus basse altitude monterait-il alors aussi haut que celui lâché par les grandes tours à tirage naturel et ne viendrait-il pas se condenser au sol risquant de créer du verglas en hiver ? Des études ont été entreprises pour répondre à ces questions. Nous verrons que, reposant le problème dans son ensemble, on peut se demander s'il n'est pas possible, non seulement de rejeter le flux d'air aussi haut qu'avec les tours, mais, en le diluant davantage dans l'atmosphère ambiante, d'en diminuer également la partie condensée visible.

ANALYSE DU PROBLEME DU LACHER DU PANACHE

Pour une tranche de 1000 MW, la convection naturelle d'un débit de 25 000 m³/s d'air échauffé de 19°C exige une tour de 170 m de haut. Le diamètre à la base imposé par les structures internes assurant le refroidissement de l'eau des condenseurs est d'environ 130 m. Compte tenu d'une hauteur minimale pour loger ces structures internes et les ventilateurs et de la vitesse d'air imposée, le réfrigérant à tirage forcé aurait un diamètre de l'ordre de 100 m et une hauteur d'une trentaine de mètres, ce qui le place moins haut que les bâtiments du réacteur. Le gain est évidemment très sensible de ce côté, mais, corrélativement, il faut rattrapper plus de 100 m sur le rejet du panache (pl. 1).

Il est évident que les effets souhaités vont être recherchés dans la vitesse de rejet de l'air en comptant sur les quantités de mouvement pour imprimer à l'air la propulsion désirée. Pour bien compléter l'énoncée du problème, il faut évidemment ajouter l'action du vent qui sera le facteur essentiel de rabattement du panache. Par ailleurs, les contraintes technologiques et économiques sur les ventilateurs peuvent limiter la vitesse d'éjection. En tirage naturel, l'air saturé sort de la tour à 4 m/s environ et il n'est pas envisagé de dépasser des vitesses de rejet forcé de 12 m/s pour le même débit, échauffement et taux de vapeur, puisqu'on souhaite ne pas trop modifier les structures internes où se font les transferts thermiques.

Une question qui nous préoccupe est celle que l'on nomme parfois la surhauteur. S'il existe des formules empiriques plus ou moins adaptées aux cheminées, leur extrapolation aux tours de réfrigération paraît assez hasardeuse compte tenu de la part expérimentale ajustée au domaine des cheminées qui ne se trouve pas être à l'échelle intéressante.

En fait, sur le plan de la mécanique des fluides, la question posée est celle d'un jet chaud dans un courant traversier. Ce problème a également fait l'objet de nombreux développements. Cependant, la présence de ce courant traversier qui peut être relativement fort par rapport à la vitesse de rejet complique passablement le phénomène et nous a obligés à entreprendre des études spécifiques.

Pour un jet de même masse volumique que le milieu ambiant, sans courant, il est bien établi que l'on peut considérer que la quantité de mouve-

ment existant au départ est conservée. Dans le cas qui nous intéresse, il ne peut en être question du fait des efforts exercés par le courant latéral et de la flottabilité du fluide rejeté.

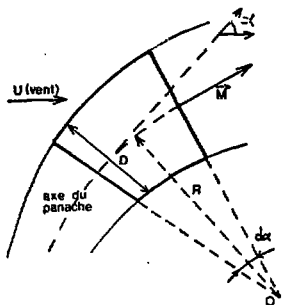
L'autre fait d'expérience extrêmement important dans la mécanique des jets vient du débit entraîné par les jets. C'est l'augmentation du débit par cet entraînement qui finit par diminuer la vitesse puisque les quantités de mouvement doivent rester constantes. Cette augmentation du débit par l'entraînement du fluide ambiant dilue en même temps les rejets, ce qui constitue un aspect très important du phénomène qui nous intéresse.

Pour 25 000 m³/s, le débit masse est d'environ 28,75 T/s, et la poussée due aux quantités de mouvement à la sortie du réfrigérant est d'environ 10 T pour le tirage naturel et 30 T pour un tirage forcé, c'est-à-dire trois fois plus, dans le rapport des vitesses où le rapport inverse des sections.

Ce rapport des sections joue par contre en sens inverse pour la force ascensionnelle de la poussée d'Archimède qui est d'environ 300 kg par mètre linéaire de panache à la sortie du réfrigérant à tirage naturel contre seulement 100 kg/m pour un tirage forcé. Mais nous verrons que cet effet de l'échauffement de l'air joue relativement peu au départ lorsque le panache est encore vertical, et que, par contre, son rôle n'est pas négligeable lorsque le panache a été incliné par le vent.

L'effet du vent est plus délicat à analyser. Le premier auquel on pense est reflété par la notion intuitive que l'on peut avoir de la "prise au vent" du panache, ce que nous traduirons par l'effort de traînée exercé par le vent sur la masse d'air rejetée. Pour un corps solide opaque au vent, cette traînée résulte essentiellement de la répartition des pressions qui règnent dans la couche limite. Pour un jet qui n'est pas imperméable au vent traversier, il y a interpénétration des deux écoulements dans le phénomène d'entraînement. Il n'en restera probablement pas moins vrai que l'effort du vent sur le rejet sera d'autant plus grand que ce rejet présente une surface de prise importante (maître couple) et que, par conséquent, les panaches issus des réfrigérants à tirage forcé seront moins sollicités et couchés par le vent.

Pour mettre des ordres de grandeurs autour de tous ces effets combinés, essayons d'évaluer la courbure imposée par le vent au panache à sa sortie du réfrigérant.



Si l'on appelle M le débit de quantité de mouvement dans le jet dont le rayon de courbure est R , on a l'équilibre suivant sur la normale à l'axe du jet :

$$\frac{M}{R} = F_n$$

F_n désignant la projection sur la normale des forces agissant par unité de longueur sur le jet.

F_n est constitué, d'une part de la traînée due au vent et d'autre part de la poussée d'Archimède.

$$F_n = \frac{1}{2} \rho C_D U^2 D \sin^2 \alpha - \Delta \rho g S \cos \alpha$$

- α est l'angle que fait l'axe du jet sur l'horizontale
 ρ la masse de fluide qui constitue le jet
 $\Delta \rho$ l'écart de cette masse par rapport à l'air ambiant
 D et S le diamètre et la section du jet
 U la vitesse locale du vent
 C_D coefficient de traînée

A la sortie du réfrigérant $\alpha = \frac{H}{2}$ et $R = \frac{M}{1/2 \rho C_D U^2 D}$

D'où il découle que pour 2 réfrigérants, si l'on admet le même coefficient de traînée, le rapport des rayons de courbure vaut :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{M_1}{M_2} \times \frac{D_2}{D_1}$$

Le débit étant le même, les quantités de mouvement sont proportionnelles aux vitesses de sortie W donc inversement proportionnelles aux sections :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{S_2 D_2}{S_1 D_1} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{3/2} = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{3/2}$$

Avec des vitesses trois fois plus fortes sur un réfrigérant à tirage forcé, le rayons de courbure du panache serait donc environ 5 fois supérieur à celui du panache issu du réfrigérant à tirage naturel.

Il n'est malheureusement pas possible d'aller beaucoup plus loin dans la comparaison des deux types de réfrigérant sans une étude beaucoup plus fine qui puisse tenir compte, en particulier, des interaction entre l'entraînement par le jet et la dynamique des écoulements.

ETUDES ENTREPRISES AU LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE

Pour effectuer ces études plus fines, il faut des moyens puissants. Nous avons mis en oeuvre à la fois des moyens expérimentaux et informatiques. Dans un canal de 50 m de long, de 4,20 m de large et de 1,50 m de haut (pl. 2), des essais isothermes ont d'abord été entrepris, et sur une autre installation le panache a été chauffé.

Simultanément, une approche théorique a été développée à partir des équations de Navier Stokes tridimensionnelles associée à des équations de bilan thermique ou autre. Les hypothèses consécutives portent essentiellement sur la vitesse dans la direction du vent qu'on suppose être peu différente de celle du vent et sur le gradient longitudinal de pression considéré comme faible devant les gradients transversaux. Compte tenu des résultats classiques dans les jets en milieu calme, nous avons également admis, dans la zone relativement proche de la sortie, que les transferts turbulents pouvaient être représentés par un coefficient de diffusion constant. La réaction du bilan thermique sur la dynamique a évidemment été prise en compte pour traduire la flottabilité variable de jet.

Ces études ont montré l'importance de la répartition des vitesses au rejet compte tenu de la dimension des sections de sortie.

Ainsi, pour une même section de sortie, donc une même vitesse, il n'est pas indiqué d'avoir un rejet annulaire sur une couronne, ni même un jet unique dans une section pleine circulaire. Il apparaît qu'il vaut mieux évacuer l'air par de multiples jets assez tassés. Il semble, d'après l'analyse précédemment faite, que ceci permette de réaliser le minimum de prise au vent latéral qui exerce ainsi une traînée plus faible sur cette structure plus perméable, tout en diluant sans doute davantage les rejets. L'expérience a ainsi montré que, compte tenu de la section énorme de sortie des réfrigérants à tirage naturel, le vent arrive parfois à refouler le débit dans la partie amont, contractant ainsi la veine de sortie à l'aval.

Ces études ont d'ailleurs mis en évidence, d'une façon très visible dans les calculs du champ de vitesse en particulier, une double circulation dans le jet (pl. 3). Ce phénomène, appelé parfois "écoulement en fer à cheval" a deux origines. L'une vient des quantités de mouvement verticales qui se trouvent être transversales à l'axe du jet quand celui-ci

est incliné par le vent et de l'effet d'entraînement créé réciproquement par le vent sur le jet autour duquel il s'enroule. L'autre origine vient des mouvements de convection naturelle qui ont lieu dans les sections transversales du jet incliné par le vent. Ce dernier écoulement est appelé "thermal" dans la littérature anglo-saxonne. Ces circulations transversales jouent un rôle important aussi bien dans la dynamique que dans la dilution de ces panaches et, par voie de conséquence, sur les longueurs visibles des panaches dans la région où il y a condensation.

A titre d'exemple, nous donnons sur les figures de la planche 4 une comparaison entre les panaches d'un type particulier de réfrigérant à tirage forcé par 32 ventilateurs et d'un réfrigérant à tirage naturel, pour une tranche de 1000 MW. Tant sur la longueur que la hauteur des panaches, la comparaison est à l'avantage de certains types de réfrigérants à tirage forcé pour des vitesses de vents faibles et moyennes, inférieures à 5 ou 6 m/s à 10 m d'altitude. Au delà de ces vitesses, le tirage forcé envoie le panache moins haut, mais ce dernier est, en général, plus dilué.

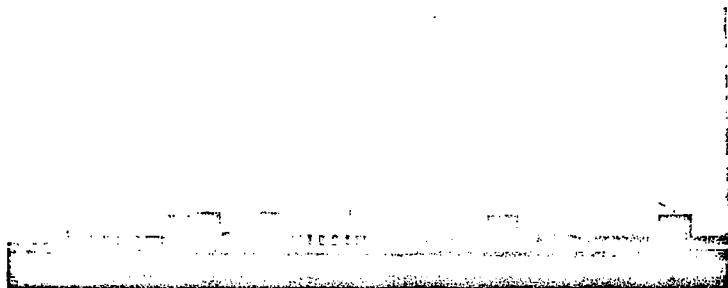
A côté de ces études de principe plus fondamentalement axées sur la recherche de l'optimum de la répartition du débit de sortie, des études particulières par site sont réalisées. En effet, la hauteur réduite des tours de réfrigération à tirage forcé les rend plus tributaires de leur position dans le plan masse de la centrale. La distribution des vitesses du vent à leur sortie se trouve très influencée par le sillage des autres bâtiments. Les effets de cette proximité ne sont pas forcément nuisibles mais nécessitent, dans chaque cas d'espace, d'être étudiés expérimentalement dans nos installations.

CONCLUSION

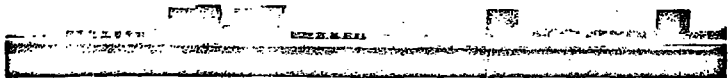
Les études entreprises à Electricité de France ont visé une analyse plus approfondie des écoulements à la sortie des réfrigérants soumis au vent. Elles ont montré que les réfrigérants à tirage forcé pouvaient allier à la discrétion visuelle des bâtiments celle des panaches émis d'une façon concurrentielle aux réfrigérants à tirage naturel. Les moyens mis en oeuvre pour cette étude servent à tirer le parti maximum des phénomènes et également à étudier pour chaque cas d'espace topographique et météorologique les champs d'humidité et de température, les formes et la longueur du panache visible émis par chaque type de matériel.

REFRIGERATION DE DEUX TRANCHES DE 1000 MW PH
VISUALISATION DES PANACHES CONDENSEES EN VEINE HYDRIQUE

REFRIGERANTS A TIRAGE FORCE



REFRIGERANTS A TIRAGE NATUREL

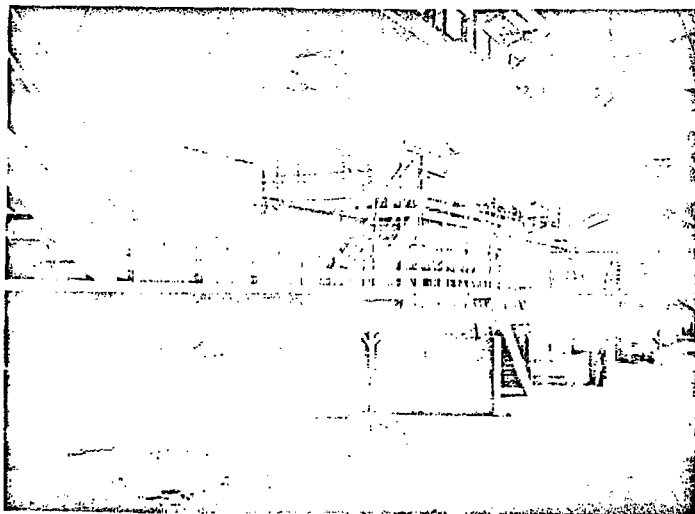
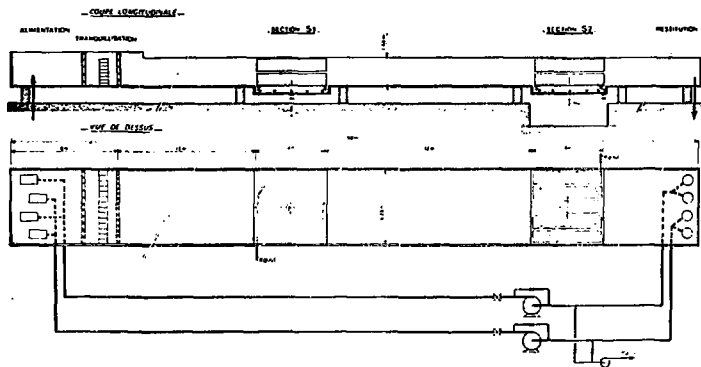


ECHELLE DU MODELE 1:500

ECHELLE DES PHOTOGRAPHIES 1/5

INSTALLATION D'ESSAIS

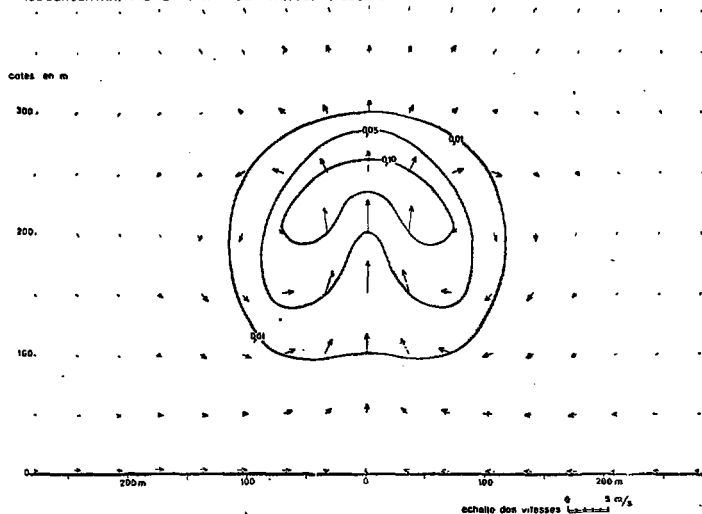
CANAL 18



RÉFRIGÉRANT A TIRAGE FORCÉ

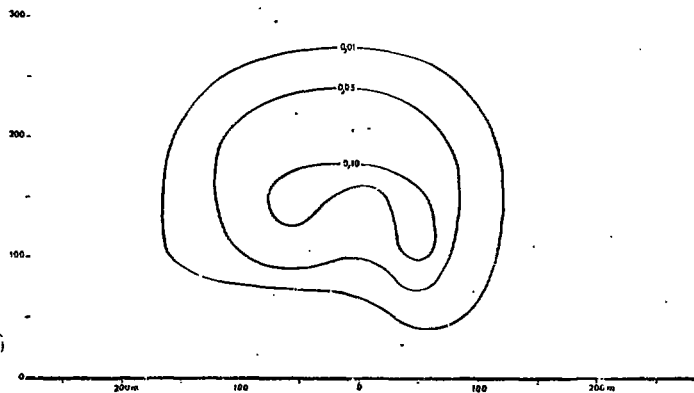
COUPE DANS UN PLAN PEPPENDICULAIRE A LA DIRECTION DU VENT. A 500m DU REFRIGÉRANT

* ISOCONCENTRATIONS ET CHAMP DE VITÉSSES CALCULÉS



* ISOCONCENTRATIONS MESUREES EN VEINE HYDRAULIQUE

coûtes en m



ETUDES DES PANACHES DE REFRIGERANTS ATMOSPHERIQUES (tranche de 1000MW)

★ PANACHE VISIBLE

— COURBES D ISOHUMIDITE (en gm³)

CONDITIONS METEOROLOGIQUES

Atmosphère stable
 Vitesse du vent : à 10m 8 m/s
 à 200m 88 m/s
 Température ambiante 5°C
 Humidité relative ambiante 92%
 Teneur naturelle en eau dans l'air ambiant 82 gm³

CARACTERISTIQUES DES REFRIGERANTS

S'IRAGE NATUREL

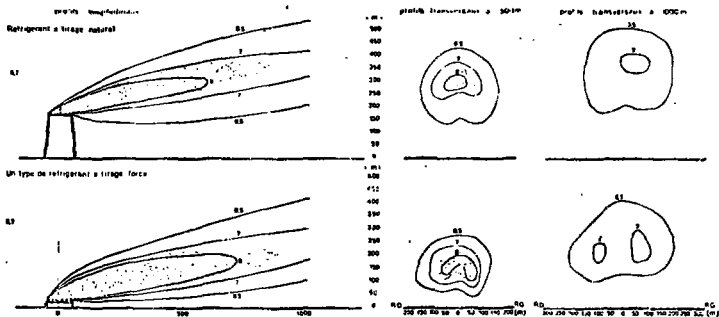
Hauteur totale 100m
 Vitesse de vent 34 m/s
 Elevation de température au vent 19°C
 Densité 817 25000 m/s
 Diamètre de sortie 07m
 Distance de base 130m

S'IRAGE FORCE

Hauteur totale 30m
 Vitesse de vent 17 m/s
 Elevation de température au vent 10°C
 Densité de air 25000 m/s
 Nombre de -millimètres 37
 Diamètre d'un millimètre 0,15m

Teneur en eau à la sortie du réfrigérant 21,8 gm³

MESURES EN CANAL HYDRAULIQUE



CALCULS PAR LE MODELE "PANACHE"

