

CEA - EDF

**CYCLES DE CONFERENCES SUR LES SOURCES  
FROIDES DES CENTRALES ELECTRIQUES**

Royaumont : 6-10 Octobre 1975

LA REFRIGERATION PAR ASPERSION

ROLLIN Philippe

ELECTRICITE DE FRANCE

- R é s u m é -

La réfrigération par aspersion - c'est-à-dire par pulvérisation d'eau dans l'air - fait ici l'objet d'une présentation générale en tant que système possible pour la réfrigération d'appoint ( écrêtement en circuit ouvert ) ou principale ( en circuit fermé ) de l'eau de circulation des condenseurs des Centrales thermiques.

L'exposé donne quelques indications sur les expériences menées en France et sur des systèmes récents développés aux Etats Unis, puis aborde les questions relatives aux performances, au coût et aux effets sur l'environnement des dispositifs d'aspersion.

## LA REFRIGERATION PAR ASPERSION

### I - INTRODUCTION

La réfrigération de l'eau par aspersion est un procédé connu depuis fort longtemps. Il consiste à projeter l'eau à refroidir sous forme de jets plus ou moins pulvérisés pour obtenir le refroidissement des gouttes d'eau au contact de l'air. C'est d'ailleurs le procédé utilisé dans une tour de réfrigération humide, avec cette différence que dans le cas du bassin d'aspersion il n'y a pas de coque pour assurer le tirage.

On voit tout de suite l'intérêt d'un tel système si son rendement de refroidissement est acceptable, car il évite la construction de tours coûteuses et d'esthétique discutable. Par contre, la surface requise au sol pour une même puissance calorifique dissipée est plus élevée, et les problèmes d'environnement risquent d'être localement plus aigus.

Jusqu'à ces dernières années, le dimensionnement de ce type d'installation était essentiellement empirique, et le procédé n'était guère utilisé que pour des petites installations industrielles; on peut citer :

- quelques réalisations en U.R.S.S.
- la Centrale américaine d' ARSENAL HILL, en Louisiane - 114 MW,
- la Centrale allemande de WOLFERSHEIM - 64 MW

La distribution de l'eau était toujours effectuée par des tuyauteries de répartition disposées sur un bassin de réception, et alimentées par des installations de pompage centralisées. Deux nouvelles techniques sont récemment apparues aux U.S.A. :

- le système à disques rotatifs CHERNE,
- le système à modules flottants CERAMIC

Ces deux systèmes ont fait l'objet d'études théoriques et pratiques sur des installations industrielles ; pour sa part, E.D.F. a mis en service un bassin expérimental à l'échelle 1 sur le site des Centrales de PORCHEVILLE.

.../...

## II - INTERET DU SYSTEME DANS LE CONTEXTE FRANCAIS

Le système de réfrigération par aspersion a retenu l'attention d' EDF depuis quelques années, avec la " prise de conscience écologique " liée à l'accroissement de puissance des Centrales.

En effet, pendant les périodes d'étiage survenant en période chaude ( Bassin de la Seine par exemple ), il est arrivé que des Centrales thermiques refroidies en circuit ouvert par des cours d'eau soient conduites à limiter leur puissance pour respecter les limites de températures imposées par la législation en vigueur. ( Par exemple, une réduction de 2 °C de la température des rejets entraîne une baisse de charge de l'ordre de 30% ). Il paraît souhaitable, dans ces conditions, de disposer d'un système auxiliaire de réfrigération de coût d'investissement le plus bas possible étant donné sa faible utilisation.

Le bassin d'aspersion semble donc dans ce cas une solution intéressante, d'autant plus qu'il assure une réoxygénation de l'eau des cours d'eau à une période où leur déficit en oxygène dissous est fortement accentué dans les zones industrielles et urbaines.

o o

o

Parallèlement, l'aspersion a été développée aux USA, avec l'apparition des systèmes mentionnés ci-dessus et décrits aux § IV et V, et la nouveauté réside dans le fait qu'elle est maintenant parfois envisagée pour la réfrigération principale de centrales thermiques de fortes puissances fonctionnant en circuit fermé, en remplacement permanent des réfrigérants atmosphériques humides.

Pour sa part EDF n'écarte pas la possibilité d'une usine de puissance importante refroidie en circuit fermé suivant ce principe.

Le coût et les performances de la réfrigération par aspersion méritaient donc une étude particulière, ce qui a conduit EDF à construire une station d'essais à Porcheville.

## III - LE BASSIN D'ASPERSION EXPERIMENTAL DE PORCHEVILLE

Le refroidissement de l'eau par un jet droit unique avait fait l'objet d'études préliminaires. La construction d'un bassin expérimental à échelle

industrielle a été décidé par EDF, pour étudier les interactions entre jets multiples, ou effet de taille : la concentration des jets est en effet de nature à diminuer le rendement global de refroidissement, défini ici comme

$$\epsilon = \frac{t^{\circ} \text{ eau entrée} - t^{\circ} \text{ eau sortie}}{t^{\circ} \text{ eau entrée} - t^{\circ} \text{ humide de l'air}}$$

par rapport à celui obtenu par un seul jet.

Le bassin expérimental a pour but d'étudier les caractéristiques thermiques des systèmes d'aspersion en fonction de différents paramètres, notamment :

- . conditions météorologiques,
- . nature et répartition des pulvérisateurs,
- . densité de pluie, et dimensions des zones aspergées,
- . pression de pulvérisation et taille des gouttes, etc...

On notera donc le point essentiel suivant : le dispositif expérimental n'est pas figé; il ne s'agit pas d'étudier uniquement les performances d'un système donné, comme ceux décrits aux § IV et V, mais d'une étude à caractère plus général devant permettre la modélisation de l'aspersion, et prenant en compte divers paramètres de construction en vue d'une étude d'optimisation.

Le bassin de Porcheville s'étend sur 5 000 m<sup>2</sup>; l'eau à refroidir est puisée dans le canal de rejet des centrales du site, avec un échauffement relativement faible de 6 à 7 °C par rapport à la Seine à l'amont ( ce qui rend les mesures plus difficiles ) . La station de pompage est équipée d'un groupe motopompe de 450 kW; la pompe peut fournir un débit de 2,2 m<sup>3</sup>/s sous 1,3 bars. Une centrale de mesures permet l'enregistrement rapide des paramètres météorologiques et des données de fonctionnement du bassin ( 50 points de mesure de température ) . ( figures 1 et 2 ) .

Un jet unique, situé à l'écart, permet la comparaison des résultats. Les essais ont commencé en 1974, mais la phase opérationnelle date de 1975 et l'expérimentation intensive est en cours.

La puissance thermique évacuée est relativement modeste; elle se situe autour de 50 MW/hectare; mais il faut souligner que ce résultat est obtenu avec des températures d'eau peu élevées, et qu'ils ne peuvent pas être comparés directement avec les performances d'autres systèmes fonctionnant

dans des conditions différentes. On notera que l'eau restituée est pratiquement saturée en oxygène dissous.

#### IV - LE SYSTEME CHERNE INDUSTRIAL Inc.

L'élément de base du système américain CHERNE est un rotor horizontal sur lequel sont montés des disques en PVC, de 60 cm de diamètre et distants de 10 cm. Ce rotor est placé entre 2 canaux parallèles de niveaux décalés; le canal supérieur distribue l'eau chaude sur chaque face des disques; l'effet centrifuge projette cette eau en l'air sous forme de gouttes qui retombent refroidies dans le canal inférieur (schéma de la figure 3).

Le module CHERNE comprend une ligne de rotors de 18 m de long, équipée de 150 disques, mue par un moteur de 30 kW. Pour cette puissance, le débit du module est un peu supérieur à 100 l/s.

Le système a fait l'objet d'essais industriels intensifs à la centrale ALLEN KING (Minnesota) d'août 1972 à avril 1973.

Une de ses caractéristiques intéressante est la création par le rotor d'un vent induit d'environ 5 m/s, ce qui rend le système relativement peu sensible au vent (gain de 15% en puissance thermique, par rapport au vent nul, pour un vent de 5 m/s). Par ailleurs la conception modulaire facilite l'entretien.

Les essais ont été effectués avec des températures d'eau à l'entrée élevées, jusqu'à 45 ou 50 °C; par suite les écarts de températures relevés et les puissances calorifiques évacuées sont importants: pour un module dont l'aire de réception des jets est de 200 m<sup>2</sup> environ, la puissance thermique peut ainsi dépasser 300 MW/ha de bassin récepteur dans ces conditions, mais il n'y a pas eu d'étude sur l'interaction des modules entre eux (effet de taille indiqué pour Porcheville), les projets d'installation étant faits avec des modules implantés en ligne, perpendiculairement à la direction des vents dominants.

A titre d'exemple d'utilisation, reprenons celui donné dans un dépliant publicitaire CHERNE pour la réfrigération en circuit fermé d'une tranche nucléaire de 500 MWe, pour un débit de 17 m<sup>3</sup>/s et une charge thermique de 1 000 MW :

. température à l'entrée des condenseurs	: 33,3 °C
. température à la sortie des condenseurs	: 47,2 °C
. température " humide " de l'air	: 25 °C
. nombre de modules	: 140
. puissance d'entraînement	: 4,2 MW

On notera que la disposition en ligne de 140 modules représente une longueur minimale de 2 800 m, et que l'implantation des canaux et des modules représente au minimum 6 hectares.

#### V - LE SYSTEME DE MODULES FLOTTANTS CERAMIC

Il s'agit là encore d'un système modulaire, construit aux Etats Unis par la CERAMIC COOLING TOWER COMPANY, destiné à la réfrigération d'appoint ou à la réfrigération principale.

Le module ( P.S.M. : Powered Spray Module ) se compose d'une pompe immergée à axe vertical et de quatre buses de pulvérisation reliées par une tuyauterie droite immergée; le groupe de pompage et les pulvérisateurs sont montés sur des flotteurs . ( figure 4 ) .

Le système CERAMIC a fait l'objet d'essais à grande échelle à la centrale américaine de DRESDEN, avec une centaine de modules répartis sur un canal de 800 m de long et 120 m de large, et les interactions entre modules ainsi que l'étude de la densité optimale ont été examinées. Un programme de calcul a été mis au point pour la détermination des installations nécessaires à la résolution de chaque cas particulier.

On notera que l'eau est puisée dans le bassin de refroidissement lui-même, de sorte que l'efficacité des modules décroît exponentiellement s'ils sont disposés le long d'un canal puisque la température de l'eau à refroidir diminue; le débit d'eau pompé est d'ailleurs supérieur au débit à refroidir, l'eau étant recyclée en moyenne 2 à 3 fois.

Comme indiqué plus haut, le système peut être utilisé :

- soit pour l'écêtement des températures en circuit ouvert, les modules étant placés en série dans le canal de rejet ( centrale de CHESTERFIELD en Virginie ).

- soit pour la réfrigération en circuit fermé, en association ou non avec un bassin de refroidissement ( centrale de SURRY, en Virginie : 2 x 1 100 MWe; en projet ).

- débit à refroidir	: 57 m <sup>3</sup> /s	} rejet calorifique : 472 th/s
- température d'eau " froide "	: 23,3 °C	
- température d'eau " chaude "	: 31,7 °C	
- température humide de l'air	: 15,6 °C	
- nombre de modules PSM type 4-10-75	: 320	
- répartition :	: 4 rangées de 80	
- puissance totale nécessaire	: 18 MW	
- dimensions minimales du canal	: 50 m x 3 900 m	

Dans cet exemple la puissance moyenne dissipée est de 100 MW/ha

## VI - PERFORMANCES DES DIFFERENTS SYSTEMES

La comparaison des différents systèmes indiqués est actuellement malaisée, car les essais ont été effectués dans des conditions très différentes ( par exemple avec des températures d'eau très élevées chez CHERNE ), et les résultats d'essais sont plus ou moins diffusés.

Cependant, pour permettre de donner un ordre de grandeur des performances que l'on peut attendre des systèmes d'aspersion, on a tracé ( figure 5 ) un abaque approximatif donnant l'écart  $E$  ( température d'eau chaude  $T_C$  moins température d'eau refroidie  $T_F$  ) et l'approche  $A$  ( température d'eau chaude moins température du thermomètre mouillé  $T_H$ , dite " température humide " en fonction de la "température humide"  $T_H$  ).

Connaissant la température  $T_C$  de l'eau à refroidir, et  $T_H$ , on trouve le point de fonctionnement à l'intersection de la droite  $E + A = T_C - T_H$  et de la droite  $T_H$  de l'abaque.

Cet abaque correspond à un débit de pluie de l'ordre de 1,5 à 2 m<sup>3</sup> par heure et par m<sup>2</sup> ( 4 à 5 m<sup>3</sup>/s par ha ), et suppose qu'il n'y a pas d'effet de taille très marqué ( au maximum 20 m de largeur pour une pluie fine, 30 à 40 m pour des grosses gouttes ). Bien que très imprécis, il permet cependant de concrétiser les performances que l'on peut attendre. Les quelques indications ci-après sont destinées à fixer les idées. :

- lorsque le débit surfacique augmente, le point représentatif  $M$  du fonctionnement sur la droite  $E + A = K$  ( valeur constante ) se déplace dans le sens de la réduction de l'écart  $E$  et de l'augmentation de l'approche  $A$ . Le rendement  $\epsilon$  défini au § III (  $\epsilon = \frac{E}{E + A}$  ) diminue, cependant que la puissance thermique évacuée augmente ( tant que l'on ne dépasse pas un certain débit ).

- La définition du rendement doit d'ailleurs être examinée attentivement. Par exemple, CHERNE prend comme rendement  $\beta$  le rapport de la quantité de chaleur réellement évacuée ( $Q_0 \times \Delta t$ ) au maximum de chaleur théorique qui pourrait être absorbée par l'air s'il ressortait du système saturé à la température de l'eau chaude; le rendement  $\beta$  ainsi défini croît avec le débit, alors que l'écart E et le rendement  $\xi$  diminuent.
- On remarquera que l'efficacité du refroidissement (rendement  $\xi$ ) augmente avec la "température humide" de l'air : une température basse ne favorise pas le refroidissement.
- On notera à titre indicatif que pour  $T_H$  comprise entre 15 et 20 °C, l'écart et l'approche ont des valeurs voisines  $E \approx A$ .
- Pour une installation d'écart  $E_0 = \Delta T$  donné, les variations de la température d'eau froide  $T_F$  seront d'amplitude plus réduite que celle de la température  $T_H$  du thermomètre mouillé. Par exemple, pour  $E_0 = 10$  °C, les variations respectives de  $T_F$  et  $T_H$  (sur l'abaque) sont de 12 °C et 20 °C.

#### VII - COUT DE L'ASPERSION

Le coût d'un système d'aspersion dépend des conditions d'utilisation. L'examen des deux cas cités aux § IV et V, à raison des prix de revient respectifs d'environ 25 000 et 30 000 US dollars pour les modules CHERNE et CERAMIC montre que le montant des investissements est du même ordre que pour un réfrigérant atmosphérique humide. Chaque cas nécessite donc en fait une étude particulière, tenant compte :

- . des coûts d'investissement, en y incluant la puissance électrique à installer pour compenser le supplément de puissance nécessaire à la réfrigération de l'usine et imputable au système.
- . des frais d'exploitation, qui dépendent de l'utilisation (base ou appoint),
- . du niveau de température adopté et de son incidence sur le rendement du groupe turbo-alternateur (coût du combustible),
- . de considérations d'esthétique ou d'environnement difficilement chiffrables.....etc..



## VIII - PROBLEMES D'ENVIRONNEMENT LIES AU FONCTIONNEMENT DES BASSINS

### D'ASPERSION .

#### 1 - Occupation des sols

L'aspersion permet de réduire la surface des lacs de refroidissement à moins de 5% de la surface requise sans pulvérisation. ( Mais l'occupation des sols est supérieure à celle des réfrigérants atmosphériques ).

#### 2 - Chimie des eaux

Généralement, il n'est pas utile d'incorporer des additifs chimiques à l'eau de circulation des systèmes d'aspersion. Cependant, la chaleur étant évacuée essentiellement par évaporation, il y a concentration des sels dans l'eau, et dans certains cas ( Centrale de Wölferstein en RFA par exemple ), il faut ajouter des produits chimiques lorsque l'eau est dure pour éviter des incrustations dans les condenseurs. Il peut donc y avoir dans ce cas des problèmes de pollution de l'air et de l'eau.

#### 3 - Brouillard et glace : ces effets sont très localisés

- CERANIC a établi des comparaisons entre aspersion et tours de réfrigération humide, basées sur de simples considérations sur les niveaux relatifs de température et d'hygrométrie. Elles n'offrent en fait qu'un intérêt très relatif quant aux fréquences d'occurrence des brouillards, étant donné l'existence permanente des panaches sur les réfrigérants.

- Les essais effectués par CHERIVE montrent que ce système ne fait que prolonger momentanément ( 10 à 15 minutes ), les conditions naturelles d'existence du brouillard.

Le givre et la glace ont été observés au maximum à 30 m et 6 m respectivement avec des vents inférieurs à 2 m/s

- Des observations ont été faites par la Commonwealth Edison Company ( Illinois ) sur un lac équipé de pulvérisateurs, pendant 656 jours ; des panaches de brouillard ont été observés au cours de 60 journées, se développant près du sol (  $h < 45m$  ) pendant de courtes périodes et ne dépassant 50m de long que dans 10% des cas.

Le verglas a été observé 6 fois, avec une distance maximale de 130m.

#### 4 - Entraînements

Les entraînements soulèvent des objections essentiellement pour les eaux saumâtres ou marines, en raison des dommages potentiels liés aux entraînements de sel sur la végétation et les cultures. L'aspersion utilisée en appoint pour refroidir de l'eau provenant de rivières polluées peut poser également un problème d'entraînement de germes pathogènes ( sans compter les odeurs désagréables ) Des essais divers ont été effectués, notamment par CERAMIC, CHERNE, RICHARDS of ROCKFORD ( autre fabricant de modules d'aspersion aux USA ).

A titre d'exemple, à la suite de nombreux essais effectués dans différentes conditions atmosphériques, les distances maximales de détection des entraînements ont été de 185 m et 150 m, respectivement pour les modules CERAMIC et CHERNE. Ces deux constructeurs fournissent d'ailleurs des graphiques pour l'estimation de l'entraînement en fonction de la distance et de la vitesse du vent. Une estimation pour le calcul des masses d'eau entraînées a été faite par RICHARDS of ROCKFORD Inc., à partir de la distribution des tailles des gouttes et de la théorie des transports. Il faut cependant souligner que les gouttes créées par les systèmes américains décrits plus haut sont relativement grosses et que le problème est à examiner en fonction de la taille des gouttes produites par le dispositif de pulvérisation.

#### 5 - Portes en eau

Elles sont de l'ordre de celles des réfrigérants atmosphériques humides, les échanges se faisant à environ 80% par évaporation. Ceci correspond approximativement à l'évaporation de  $1 \text{ m}^3$  pour évacuer 750 thermies (  $0,75 \cdot 10^6 \text{ kcal.}$  ), ou si l'on préfère à une puissance thermique de 3 000 MW pour  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 6 - Bruit

Le bruit des systèmes d'aspersion est inférieur à celui des réfrigérants atmosphériques humides à tirage naturel, et à fortiori à tirage forcé.

Le fonctionnement d'un module CHERNE ne s'entend plus à 75 m ,  
celui d'un ensemble de 14 modules RICHARDS of ROCKFORD à 600 m .  
Mais tout dépend du niveau de bruit ambiant. A Porcheville, le  
bruit du bassin à une centaine de m n'est pas dissociable du  
fond sonore.

#### IX - CONCLUSIONS

En ce qui concerne l'environnement, les résultats d'essais sur les  
bassins d'aspersion, quoique assez disparates, font apparaître que  
les problèmes d'environnement locaux ne concernent que des zones  
assez restreintes, plus réduites que pour les tours de réfrigération  
humides. Mais en ce domaine beaucoup d'études sont encore à réaliser,  
essentiellement en ce qui concerne les entraînements; des programmes  
d'étude sont d'ailleurs en cours, essentiellement aux U.S.A. où les  
systèmes d'aspersion connaissent actuellement un développement impor-  
tant.

L'implantation de l'aspersion en France dépendra des études techniques  
et économiques, ces dernières pouvant être différentes suivant les  
pays. L'installation de bassins pour la réfrigération d'appoint est  
d'ores et déjà impossible sur de nombreux sites existants, étant don-  
né les surfaces importantes dont il faudrait pouvoir disposer ( par  
exemple il faudrait environ 10 ha pour ramener les rejets des Centra-  
les de Porcheville de 32 °C à 30 °C ), ou par suite d'un voisinage  
urbain trop proche.

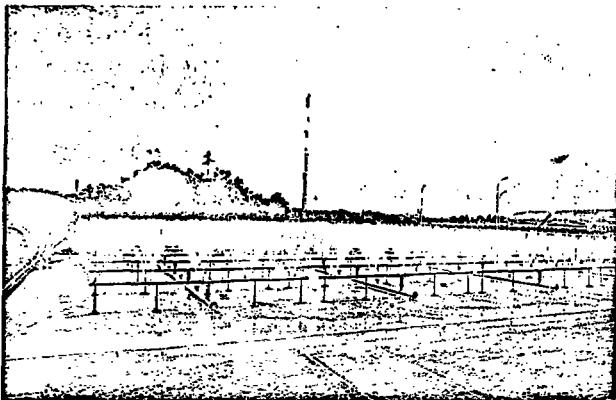


Figure 1 - Bassin d'aspersion de Porcheville

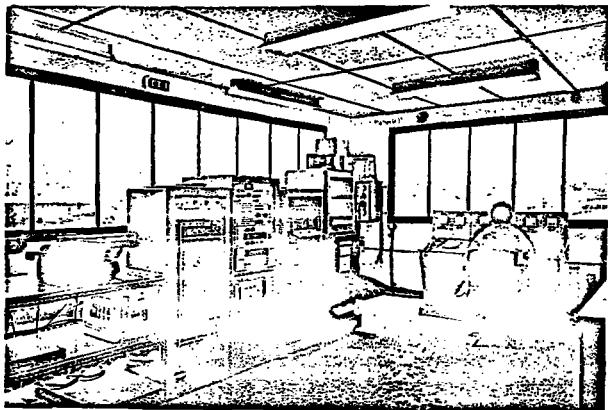


Figure 2 - Salle de contrôle du bassin de Porcheville

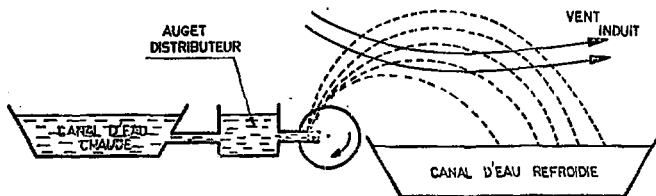


figure 3 : Principe du système CERNE à disques rotatifs

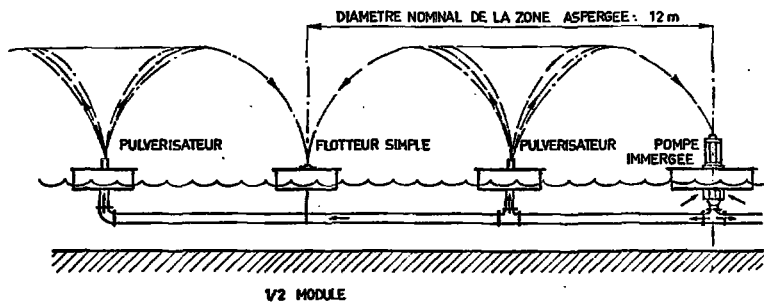
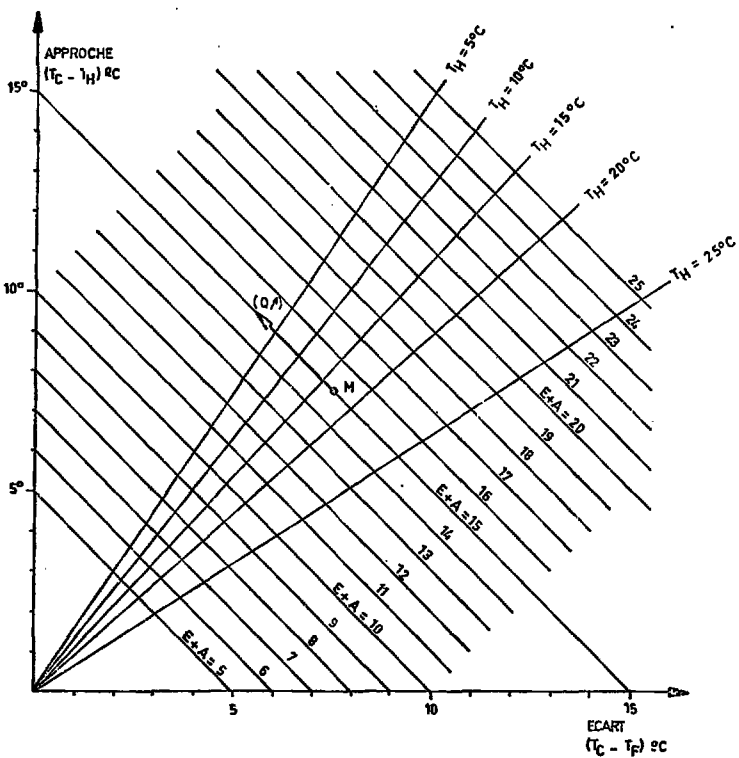


figure 4 : Principe du système CERAMIC à modules flottants



## BIBLIOGRAPHIE

- CHERNE fixed thermal rotor demonstration - Final test report
- CERAMIC COOLING TOWER COMPANY : the P.S.M. evaporative water cooling systems effects
- Environmental consequences of spray cooling systems  
CEE communication EP/SEM 2/R 10 du 24.1.74 par F.H. RAINWATER -  
US. EPA
- Le bassin d'aspersion - Note EDF - EGPSE E 1326
- Eléments d'information sur la réfrigération par aspersion  
Note EDF/SEPTEN, E-SE/GC 72-14
- Rapport du Conseil Economique et Social des Nations Unies  
EP/SEM 2/2 - 23.9.74  
Comité de l'énergie électrique ( Séminaire de Zürich 14 au 16.5.74 )
- A Model for salt drift deposition from spray ponds  
GUYER et COLAY - MIT O2139 - IAEA - SM - 187/37
- Spray pond mathematical model for cooling fresh water and brine  
ELGAWHARY - ROWE - OKLAHOMA STATE UNIVERSITY
- Evaporative cooling of circulating water  
BERGMAN - Pergamon Press.