

DEVELOPPEMENT DE LA FILTRATION ELECTROMAGNETIQUE  
DE L'EAU D'ALIMENTATION (\*)

L. DOLLÉ (\*\*)

---

RESUME

Le mémoire justifie le choix de la filtration électromagnétique pour séparer les produits de corrosion insolubles dans le circuit secondaire, en rappelle le principe et résume brièvement les résultats des études de développement. On précise ensuite l'ordre de grandeur des volumes d'eau à traiter aux deux endroits prédisposés dans le circuit, qui sont au niveau de la bache alimentaire et à la purge du générateur de vapeur. L'application en est ensuite discutée.

ABSTRACT

Electromagnetic filtration in the feed water circuit of the steam generators in nuclear power plants is efficient towards insoluble corrosion products. The principle of electromagnetic filtration is shortly recalled and the results of corresponding development work are summarized. The magnitude of water volumes to be treated on the two privileged parts of the circuit are estimated. These parts are on the feed water tank level and on the blow-down of the steam generator. The practical applications are discussed.

Séminaire ADERP - EDF Sur la chimie de l'eau et la corrosion dans les circuits eau-vapeur des centrales nucléaires.

Seillac, France, 17 - 21 Mars 1980.

CEA - CONF 5084

\*\* Division de Chimie, Département de Chimie Appliquée et d'Etudes Analytiques, Service de la Corrosion, d'Electrochimie et de Chimie des Fluides, Section d'Etude de la Chimie des Fluides, CEN/SACLAY, B.P. N° 2 - 91190 GIF/S/YVETTE.

# DEVELOPPEMENT DE LA FILTRATION ELECTROMAGNETIQUE DE L'EAU D'ALIMENTATION

L. DOLLÉ

---

## I. INTRODUCTION

L'eau d'alimentation des générateurs de vapeur comprend les condensats de la turbine repris aux condenseurs (condensat principal), les condensats des réchauffeurs et préchauffeurs et des séparateurs (condensats accessoires), l'eau d'appoint et le cas échéant l'eau de purge recyclée. La figure 1 représente un schéma très simplifié du circuit secondaire pour illustrer les diverses provenances des eaux constituant l'eau d'alimentation d'un générateur de vapeur. Rappelons pour fixer les idées que le débit de celle-ci vers un générateur de vapeur varie d'environ 1700 à 1900 tonnes par heure selon la centrale. Le schéma ne figure pas l'injection de l'eau d'appoint, dont la quantité est généralement relativement peu importante (autour de 1 % seulement du débit de la vaporisation) ; elle est de grande pureté, et n'a encore vu que peu de surface de circuit.

En l'absence de fuites notables aux condenseurs, la pureté chimique de l'eau d'alimentation ne serait pas difficile à contrôler, s'il n'y avait les énormes surfaces métalliques génératrices de produits de corrosion, avec lesquelles l'eau et la vapeur du circuit secondaire sont mises en contact. A titre indicatif, la quantité des produits de corrosion insolubles irréversiblement collectés sous forme de boues dans un générateur de vapeur peut varier de quelques dizaines à notablement plus d'une centaine de kg par an, et ainsi s'expliquent par exemple des dépôts de boues pouvant atteindre 180 mm d'épaisseur dans la partie froide d'un générateur de vapeur, observés à la centrale KKS de STADE [17].

.../...

## II. FILTRATION EN CIRCUIT DES PRODUITS DE CORROSION INSOLUBLES

### 1) Cas général

Si pour simplifier le raisonnement, on schématise séparément le circuit secondaire et le générateur de vapeur par une capacité de volume  $V$  dans laquelle l'apport et l'extraction des produits de corrosion ont lieu avec des vitesses constantes, la variation de leur concentration  $C$  s'écrit approximativement :

$$\frac{dC}{dt} = \frac{P}{V} - \frac{K}{V} C - E \frac{D}{V} C \quad (1)$$

si  $P$  représente la vitesse d'apport des produits de corrosion,  $E$  l'efficacité du dispositif d'extraction fonctionnant avec un débit  $D$ ,

et  $K$  une constante de vitesse caractérisant la variation de la concentration des produits de corrosion insolubles par dépôt de boues, ou tout autre mécanisme involontaire lié au fonctionnement du circuit.

La figure 2 illustre la solution de l'équation (1), la valeur stationnaire de la concentration dans l'eau qui circule est :

$$C = C_{\infty} + (C_0 - C_{\infty}) e^{-at} \quad (2)$$

$$\text{avec } a = \frac{K + ED}{V}$$

et  $C_0$  étant la concentration initiale des produits de corrosion insolubles en suspension.

La concentration limite  $C_{\infty}$  est

$$C_{\infty} = \frac{P}{a} \quad (3)$$

$$\text{en posant } p = \frac{P}{V}$$

.../...

La quantité de produits de corrosion que peut retenir le filtre est

$$\int_0^t EDC dt = ED \int_0^t C_{\infty} dt + \frac{C_0 - C_{\infty}}{a} (1 - e^{-at}) \quad (4)$$

et leur fraction déposée sous forme de boue :

$$\int_0^t KC dt = K \int_0^t C_{\infty} dt + \frac{C_0 - C_{\infty}}{a} (1 - e^{-at}) \quad (5)$$

Comme le temps de fonctionnement est généralement très long par rapport aux périodes des variations de concentration qui résultent de la vitesse des phénomènes concurrents de la filtration et de la formation de boues, les intégrales (4) et (5) deviennent approximativement :

$$\int_0^t EDC dt \approx EDC_{\infty} t \quad (4')$$

et

$$\int_0^t KC dt \approx KC_{\infty} t \quad (5')$$

S'agissant de produits de corrosion sous forme insoluble, leur vitesse d'apport ne s'identifie naturellement pas avec le classique taux de corrosion des matériaux constituant le circuit secondaire, mais s'exprime par un taux de relâchement moyen représentant la quantité de matière effectivement emportée par le fluide en circulation. Elle est très variable, puisqu'on a estimé par exemple que le fer est transporté irréversiblement vers chaque générateur de vapeur à raison d'un kg par jour dans la centrale de THANGE [2] et de 1,4 kg par jour répartis sur les 4 générateurs de vapeur dans la centrale de STADE [1].

.../...

## 2) Caractéristiques de fonctionnement d'un filtre

Le facteur d'efficacité d'un filtre vis-à-vis d'une impureté est défini par le rapport :

$$E = \frac{C_e - C_s}{C_e} \quad (6)$$

de la différence des concentrations d'entrée  $C_e$  et de sortie  $C_s$  à la concentration d'entrée

L'efficacité d'un filtre est à distinguer de son rendement, qui s'écrit :

$$p = \frac{C_o - C}{C_o} = 1 - \frac{C}{C_o} = 1 - e^{-E \frac{D}{V} t} \quad (7)$$

rapport de la différence des concentrations initiale  $C_o$  et instantanée ou finale  $C$  à la concentration initiale dans le circuit si l'apport d'impureté est nul, et en l'absence de toute autre cause de variation de la concentration (formation de dépôts ou de boues notamment).

En considérant comme seul significatif le premier terme du développement en série dans (7), le rendement du filtre peut s'écrire aussi :

$$p = \frac{C_o - C}{C_o} \approx E \frac{D}{V} t \quad (7')$$

Il est souvent utile, pour traiter le cas d'un circuit réel, d'exprimer directement l'action du filtre par une grandeur de caractère cinétique, qui est la constante de décroissance de la concentration de l'impureté, s'écrivant :

$$k = \frac{\ln 2}{\tau} = \frac{0,693}{\tau} \quad (8)$$

si  $\tau$  représente la période de la filtration, temps nécessaire au filtre pour réduire de moitié la concentration de cette impureté. .../...

### III. FILTRATION ELECTROMAGNETIQUE

#### 1) Caractère magnétique des produits de corrosion

La nature des produits de corrosion solides qui entrent en ligne de compte est approximativement connue par les analyses de boues retirées des générateurs de vapeur et de prélèvements de solides transportés par l'eau. Dans les centrales qui n'utilisent pas d'alliages cuivreux aux réchauffeurs, elles sont constituées essentiellement de fer en mélange avec des quantités peu importantes plus particulièrement de zinc, de nickel, de cuivre, de manganèse, de chrome. En eau désoxygénée et jusqu'aux environs de 570°C, la magnétite  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  est le seul thermodynamiquement stable parmi les oxydes de fer, soit sur les parois des tuyaux sous forme de couche protectrice, soit dispersée dans l'eau du circuit. La rouille  $\text{FeO} \cdot \text{OH}$  qui résulte d'opérations de montage ou formée ultérieurement pendant les arrêts se transforme, dans les mêmes conditions, par le mécanisme de la réaction de SCHIKORR, en magnétite cristallisée, de même que le fer dissous, ferreux ou ferrique. Or, l'oxyde double  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  possède une structure de spinelle, dont une particularité remarquable est de permettre la substitution du fer par d'autres éléments avec des dimensions atomiques voisines, ou de l'oxyde  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  par un autre oxyde d'élément trivalent. Il en résulte des ferrites du type  $\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  etc... Une propriété commune à la plupart des représentants de la structure cristalline ferritique est leur ferromagnétisme.

#### 2) Principe de la filtration électromagnétique

##### 2.1. Efficacité

Dans un gradient de champ magnétique, une particule magnétisable subit une force particulièrement intense si elle est ferromagnétique, proportionnelle à celui-ci et à l'aimantation qui résulte de l'intensité du champ ; elle la déplace dans le sens des champs croissants. Un filtre électromagnétique

.../...

comporte donc un garnissage capable de créer des gradients de champ magnétique, et présentant des sites d'accrochage (ou de capture) dont la surface intégrée sur le volume entier soit aussi grande que possible.

Le rapport de la vitesse de capture  $U_c$  d'une particule ferromagnétique dans le garnissage à la vitesse linéaire apparente  $U$  de l'eau dans le filtre est une grandeur sans dimension, qui exprime l'efficacité de celui-ci par une relation physique de la forme :

$$- \frac{\log (1 - E)}{L} = f \left( \frac{U_c}{U} \right) \quad (9)$$

en caractérisant ainsi l'efficacité du filtre par unité de longueur du garnissage,  $L$  étant la longueur efficace du filtre.

La vitesse de capture de la particule, qui résulte de la force magnétique qu'elle subit, s'écrit d'après la loi de STOKES :

$$U_c = \frac{F}{3\pi\eta d} \quad (10)$$

si  $\eta$  est la viscosité du fluide porteur et  $d$  le diamètre de la particule.

La force magnétique qui s'exerce sur une particule dont le moment dipolaire est  $m_p$  s'écrit :

$$F = \frac{1}{\mu_0} m_p \nabla \vec{B} = \frac{1}{\mu_0} \chi v \vec{B} \nabla \vec{B} \quad (11)$$

$\nabla$  étant l'opérateur de dérivation spatiale,

$\vec{B}$  le champ magnétique dans le filtre

$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  dans le système d'unités MKSA rationalisé.

$\chi$  la susceptibilité magnétique de la particule et  $v$  son volume.

.../...

On démontre ainsi [3] qu'il existe une relation entre les caractéristiques magnétiques du filtre et son efficacité, de la forme :

$$-\frac{\log(1-E)}{L} = f\left(\frac{\chi}{\eta} \frac{v}{d} \frac{\frac{1}{2} \nabla B^2}{U}\right) \quad (12)$$

en omettant provisoirement le facteur constant  $\frac{1}{3 \pi \mu_0}$ .

Tant que la variable  $\frac{\chi}{\eta} \frac{v}{d} \frac{\frac{1}{2} \nabla B^2}{U}$  n'est pas trop petite

la fonction  $f$  est approximativement une relation de proportionnalité. Par contre, si elle diminue en-deçà d'une valeur critique, l'efficacité du filtre tend vers zéro, il est alors lavé par le courant liquide trop rapide.

Mis à part ce cas, l'équation de l'efficacité du filtre électromagnétique devient donc :

$$-\log(1-E) = A L \chi \frac{1}{\eta} \frac{v}{d} \frac{\frac{1}{2} \nabla B^2}{U} \quad (13)$$

La constante  $A$  du filtre étant le facteur de proportionnalité, qui résulte, mise à part sa longueur  $L$ , de ses diverses caractéristiques dimensionnelles, dont notamment le coefficient de remplissage ; elle se détermine expérimentalement.

La figure 3 représente la variation relative d'efficacité du filtre en fonction de la vitesse linéaire apparente de l'eau.

## 2.2. Vitesse critique

Le bilan des forces que subit une particule dans une cavité élémentaire d'un garnissage de filtre électromagnétique, peut négliger toutes les autres devant la force magnétique et la force antagoniste d'entraînement dans la direction  
.../...



axiale de la veine liquide. Le garnissage du filtre présente une singularité hydrodynamique dans les angles que forment les génératrices d'une cavité magnétique élémentaire du garnissage ; la vitesse linéaire du fluide y est généralement fortement réduite si leur contact se fait avec une géométrie propice à la création de gradients de champ importants, et ils constituent les sites privilégiés de capture. La variable  $\frac{\chi}{\eta} \frac{v}{d} \frac{1/2 \sqrt{B^2}}{U}$  définit dans le garnissage en question une valeur critique de la vitesse U admissible, proportionnelle à  $\sqrt{B^2}$  tant que la saturation magnétique ne réduit pas appréciablement la variation des forces magnétiques.

La figure 4 représente à titre d'exemple la variation de la vitesse critique de l'eau en fonction du champ d'induction moyen dans le garnissage d'un filtre du type de celui qui sera décrit dans la suite de l'exposé.

### 2.3. Influence de la température de l'eau

Fondamentalement la température de fonctionnement du filtre agit de deux façons sur les forces antagonistes que subit une particule ferromagnétique dans le garnissage :

- la force magnétique est proportionnelle à l'aimantation de la particule et dépend de sa susceptibilité magnétique,
- la force d'entraînement dans le courant liquide, selon la loi de STOKES, est fonction de la viscosité de l'eau qui dépend fortement de sa température.

La résultante de ces deux forces, qui détermine la variation de l'efficacité du filtre en fonction de la température, est proportionnelle au rapport des valeurs numériques de l'aimantation de la particule et de la viscosité de l'eau. La figure 5 représente la variation de ce rapport pour la magnétite et diverses ferrites jusqu'à 300°C, température encore suffisamment éloignée de leur point de Curie pour que leur désaimantation réversible soit de faible importance. La valeur

.../...

croissante de ce rapport caractérise une nette amélioration du filtre quand la température de fonctionnement augmente.

#### 2.4. Description du filtre électromagnétique

Il est constitué d'une enveloppe tubulaire en matériau non magnétique (acier austénitique) remplie entièrement ou en partie seulement d'un garnissage, magnétisable par un enroulement de solénoïde disposé en une ou plusieurs bobines. Si le bobinage est concentrique, on limite le champ magnétique de fuite en refermant le circuit magnétique sur le garnissage au moyen d'armatures massives en fer. Le garnissage peut être de différents types, mais de tous ceux qui ont été préconisés jusqu'à présent, un remplissage de billes d'acier présente un ensemble d'avantages qui lui valent une préférence amplement justifiée pour une application industrielle à grande échelle. La figure 6 représente le schéma d'un filtre à garnissage de billes.

La régénération du filtre par décolmatage du garnissage de billes s'effectue, après désaimantation complète et différemment selon que le filtre fonctionne à basse température, ou à haute température sous forte pression. Dans le premier cas, on fluidise le garnissage au moyen d'un courant d'eau de rinçage suffisamment rapide ; par le frottement des billes qui en résulte, celles-ci sont nettoyées pendant leur chute qui les remet en place. L'opération de régénération ne dure que quelques minutes. Pour qu'elle soit applicable, il faut que l'enveloppe tubulaire ait une longueur totale à peu près double de la longueur utile. C'est le procédé mis en oeuvre par KWU\* [4\_7]. Un filtre fonctionnant à haute température peut de préférence être régénéré selon un mode opératoire développé au CEA [5\_7], qui évite de le refroidir et réduit la quantité d'eau de rinçage. Il s'agit de rinçages successifs par bulles de vapeur, alternés avec des vidanges rapides par détente du contenu dans un condenseur.

---

\* Kraftwerk Union

## 2.5. Etudes de mise au point et de fonctionnement

Elles visent essentiellement à déterminer expérimentalement la constante du filtre qui apparaît dans l'équation (13), et se traduisent par des mesures d'efficacité en fonction du champ magnétique appliqué et de la vitesse linéaire de l'eau et du taux d'épuisement de la capacité du garnissage jusqu'à la vitesse critique ; accessoirement on contrôle aussi la valeur du facteur d'efficacité en fonction de la concentration de solides en suspension si des extractions très poussées sont requises.

Ainsi, notamment dans les cas de mise en oeuvre pour le traitement des eaux de centrale, la concentration stationnaire des impuretés peut devenir suffisamment réduite pour qu'il soit logique d'admettre que le filtre ne présente d'intérêt que s'il peut encore rester suffisamment efficace pour qu'il ne soit pas nécessaire de traiter des débits d'eau notablement plus importants.

C'est en France au CEA et en Allemagne par KWU que les études les plus complètes ont été réalisées ; mais des études d'application industrielle de filtres du même type ont été aussi menées au Canada par l'AECL et en URSS. Le comportement du filtre électromagnétique, bien qu'à diverses échelles selon les conditions de mise en oeuvre, peut être considéré à présent comme connu jusqu'à la température d'utilisation de 300°C, et des mesures directes d'efficacité ont pu être étendues aux plus faibles concentrations de solides ; celles-ci étant difficilement accessibles à l'analyse chimique quantitative en circuit, cette dernière a été remplacée au CEA par des mesures d'activité de produits de corrosion activés en réacteur ou marqués sous forme de ferrites par un radioélément, comme le chrome-51 plus particulièrement.

Le présent exposé se limite au résumé, à titre indicatif, des résultats qui présentent un intérêt essentiel dans

.../...

un projet d'application, mais sans aborder ni l'optimisation d'un filtre déterminé, ni son équation de fonctionnement.

#### 2.5.1. Perte de charge du garnissage de billes

Le filtre électromagnétique se distingue par une perte de charge notablement réduite par rapport à celle de la plupart des milieux filtrants, et ne présente aucun danger de blocage de débit par colmatage. Si le garnissage est un lit de billes de 6 mm de diamètre, elle n'est que de 120 mbar par mètre de longueur et par  $\text{dm}^2$  de section, avec un débit spécifique de  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \text{ dm}^{-2}$  à la température de  $250^\circ\text{C}$  ; dans le garnissage colmaté, elle augmente de moitié environ.

#### 2.5.2. Capacité du garnissage de billes

Elle est approximativement de 2 g de solide exprimé en fer par kg de garnissage.

#### 2.5.3. Efficacité du filtre à garnissage de billes

D'une façon générale, l'augmentation de l'efficacité avec la température de fonctionnement a été démontrée, de même que l'amélioration attendue de gradients de champs magnétiques croissants qui résultent de l'utilisation de billes de plus petit diamètre, et aussi l'intérêt que présente un champ magnétique d'induction optimisé.

Par delà l'effet favorable de la viscosité décroissante de l'eau, les températures croissantes accélèrent la transformation du fer vers sa forme stable de ferrite ou de magnétite, dont la susceptibilité magnétique est notablement plus élevée que celle de toutes ses autres formes oxydées. A ce titre, l'influence de la présence d'oxygène résiduel dans un circuit est nettement révélatrice.

Pour citer en exemple quelques résultats expérimentaux seulement parmi les plus importants qui sont nécessaires à une étude d'application, la figure 7 illustre l'efficacité

.../...

élevée et constante dans toute l'étendue des concentrations de solides ferritiques qui peuvent intéresser.

La figure 8 représente la variation de la vitesse critique dans le filtre en fonction du taux d'épuisement de la capacité du garnissage.

#### IV. APPLICATION AU TRAITEMENT DE L'EAU D'ALIMENTATION

##### 1) Position du problème

Il semble admis que les réchauffeurs haute pression ne polluent que très peu l'eau d'alimentation [6] qui contient de l'ordre de 10 à 30 ppb de fer. Par contre les condensats de ces mêmes réchauffeurs sont une des plus importantes sources de produits de corrosion solides ; ces condensats apportent environ la moitié des oxydes solides, l'autre moitié provenant de la partie basse pression du circuit. Ainsi, il ne serait donc pas indispensable de filtrer l'eau d'alimentation en aval des réchauffeurs haute pression, et il suffirait d'en réduire jusqu'au minimum possible la teneur de solides dès le niveau de la bache alimentaire en amont des réchauffeurs haute pression. Le filtre fonctionnant alors dans des conditions notablement moins sévères, serait de ce fait d'un prix nettement moindre. C'est aussi dans ce sens qu'ont été déjà orientées les réflexions en Allemagne. Evidemment du fait de la séparation totale des solides dans le générateur, on constate d'après l'équation (1) qu'il faut traiter des débits importants pour diminuer notablement leur introduction dans le générateur. Mais le générateur de vapeur concentre par distillation les impuretés de l'eau d'alimentation, en y ajoutant naturellement les produits de sa propre corrosion. Pour cette raison, une purge efficace du générateur vient immédiatement à l'esprit afin de filtrer directement la suspension concentrée qu'il contient, et dont la sédimentation est la cause directe des amas de boues. Si le débit de la purge devait dépasser la limite acceptable pour la conservation du rendement thermodynamique de la

.../...

chaudière, la filtration se ferait de préférence à la température de l'eau du générateur, avec recyclage partiel du filtrat directement dans l'eau alimentaire au niveau des réchauffeurs haute pression.

## 2) Ordre de grandeur des débits à traiter

### 2.1. Condensats au niveau de la bache alimentaire

La fixation des produits de corrosion à ce niveau par formation de dépôts peut être négligée devant leur entraînement irréversible dans le générateur de vapeur par le débit d'eau d'alimentation. Il résulte donc de l'équation (1) qu'il faudrait pratiquement traiter le débit total de celle-ci pour réduire au dixième environ de sa valeur actuelle la quantité de solides ainsi introduits. D'ailleurs il faut avoir présent à l'esprit que de faibles proportions d'hématite  $Fe_2O_3$  ou d'hydroxyde  $FeOOH$  peuvent encore se trouver dans les produits de corrosion à ce niveau du circuit d'eau d'alimentation [6]. Ces oxydes ayant des susceptibilités magnétiques moins grandes que la magnétite, il en résulte une efficacité un peu réduite vis-à-vis du fer total si des champs magnétiques inducteurs plus forts ne peuvent être appliqués pour corriger l'effet. C'est ainsi que des efficacités de 70 à 80 % seulement ont été déjà enregistrées [6].

### 2.2. Purges du générateur de vapeur

Le bilan de solides dans le générateur de vapeur s'écrit :

$$QC_e - x Q C_s = k VC_s \quad (14)$$

Q étant le débit de l'eau d'alimentation avec une concentration  $C_e$  de produits de corrosion à l'entrée du générateur.

x la fraction d'eau prélevée par le filtre avec la concentration stationnaire  $C_s$  de produits de corrosion (en distinguant provisoirement  $C_s$  de  $C_{\infty}$  dans l'équation (2) )

k la constante de sédimentation et V le volume d'eau du générateur.

.../...

La concentration stationnaire des produits de corrosion dans le générateur est

$$C_s = \frac{C_e}{x + kV/Q} \quad (15)$$

Pour déterminer le terme inconnu  $kV$ , on fait le même bilan sans filtration et avec une purge supposée de 1 % :

$$C'_s = \frac{C_e}{0,01 + kV/Q} \quad (15')$$

La masse de boues déposées est d'autre part, après un temps  $t$  :

$$m = kC'_s Vt = \frac{kVt}{0,01 + kV/Q} C_e \quad (16)$$

et donc :

$$kV = \frac{0,01 m}{C_e t - \frac{m}{Q}} \quad (17)$$

A titre d'estimation, mais avec beaucoup de réserves pour défaut de résultats reproductibles suffisamment nombreux, en appliquant ce raisonnement au cas de la centrale KKS de STADE, [1] [6] [7], on calcule selon l'équation (15') avec une concentration stationnaire dans les générateurs de l'ordre de 50 fois plus élevée que la concentration d'entrée, une constante de sédimentation  $k$  de l'ordre de  $0,1 \cdot h^{-1}$ . Sachant que la quantité d'oxyde de fer introduite irréversiblement par jour dans les générateurs de vapeur de cette centrale d'après [1] [7] est estimée à 1,4 kg, l'équation (17) avec une incertitude également importante donne aussi une constante de sédimentation  $k$  de l'ordre de  $0,1 \cdot h^{-1}$ . Avec le même taux de pollution de 1,4 kg par jour et avec cette constante de temps approximative, en utilisant l'équation (3) on calculerait une concentration limite d'environ :

$$C_\infty \approx 0,5 \cdot 10^{-6}$$

ordre de grandeur qui se situe dans la fourchette des valeurs  
.../...

mesurées sur l'eau des générateurs de vapeur de STADE [17], mais cependant notablement plus faible que certaines valeurs également constatées [67] mais probablement plus caractéristiques des débuts de l'exploitation industrielle de la centrale. Si d'ailleurs l'eau d'alimentation entrant dans les générateurs de vapeur avec une concentration de solides à la limite des spécifications admises en Allemagne qui est [17] :

$$\Sigma Fe < 0,02 \text{ ppm}$$

la vitesse de pollution des générateurs de vapeur serait de l'ordre de  $0,08 \text{ kg.h}^{-1}$ , soit 1,9 kg par jour, valeur pas très éloignée de 1,4 kg par jour citée dans [17] comme étant la quantité de fer retenue dans ceux-ci.

Dans ces conditions, les purges pourraient extraire des générateurs une quantité de solides de l'ordre de 120 à 180 kg de fer par an\* alors qu'il y reste une quantité de l'ordre de 420 kg sous forme de boues. Avec la valeur limite de la concentration des solides de 0,5 ppm dans l'eau des générateurs, la quantité purgée serait approximativement comprise entre 144 et 216 kg par an. Ces deux estimations s'accordent bien, mais à certains moments, d'après [67] pour les raisons supposées ci-dessus, les purges ont été beaucoup plus chargées de solides, portant plusieurs ppm et même jusqu'à 10 ou 12 ppm de fer.

Si donc au-delà du taux de purge actuel qui se situe autour de 1 %, on filtre un débit x supplémentaire, le rapport de la concentration stationnaire à la concentration d'entrée des solides dans le générateur de vapeur varie comme suit :

x = 0	$C_s/C_e \approx 50$	Taux de purge total $\approx 1,5$
x = 1 %	33	2,5
x = 2 %	25	3,5

\* le taux de purge des générateurs de STADE se situe entre 1 et 1,5 %.

.../...



Ce résultat, qui peut paraître modeste avec son caractère très approximatif, est néanmoins le cas le moins favorable de la filtration d'une purge à la concentration stationnaire de solides. Or le fait que les dépôts de boues dans le générateur se produisent le plus souvent très nettement en des endroits hydrauliquement prédisposés, montre que la distribution des solides dans l'eau est très inhomogène. En conséquence, si la purge peut prélever de l'eau ainsi notablement plus chargée, l'effet de la filtration devient naturellement considérablement meilleur. Dans l'exemple connu du générateur de STADE, il s'agit avec certitude du côté froid au-dessus de la plaque tubulaire. On compare ainsi l'effet prévisible d'une filtration des purges de générateurs de vapeur, à raison d'environ 120 tonnes par heure (3 % au total), équivalent sensiblement à celui de la filtration d'environ 2000 tonnes par heure d'eau au niveau de la bache alimentaire (50 % du débit total) qui réduirait de moitié à peu près la quantité de solides dans l'eau d'alimentation à l'entrée du générateur. Bien entendu sur les 120 tonnes de purges, il faudrait recycler directement aux réchauffeurs haute pression environ 60 à 90 tonnes pour conserver le rendement thermodynamique.

Ce résultat modeste n'est pas en accord avec les équations (4) et (5) qui voudraient que la quantité de solides déposés dans le filtre par la purge accrue soit notablement plus importante par rapport à la fraction qui reste sous forme de boues retenue par le générateur de vapeur. Il se pourrait que la constante de sédimentation  $k = 0,1 \cdot h^{-1}$  soit notablement trop petite pour apprécier la cinétique de la sédimentation. Précisément l'inhomogénéité des concentrations de solides dans le milieu bouillant du générateur de vapeur peut en être la cause et une connaissance meilleure des courants qui la provoquent serait souhaitable. D'ailleurs l'effet de la purge de l'ordre de 1 % pris en compte dans le calcul de la constante de sédimentation, faute de résultats permettant de faire mieux, va dans le même sens. Cet état de fait n'a d'ailleurs pas échappé, puisque l'idée d'une circulation forcée dans le générateur de vapeur [6] concrétise l'importance qui lui est attachée autre part.

### 3) Mise en oeuvre

La filtration des purges à haute température avec un débit accru et recyclage direct n'est pas encore réalisée, mais elle a été proposée successivement en France [5] et en Allemagne [6]. La figure 9 en représente un schéma.

Par contre la filtration au niveau de la bache alimentaire et celle des purges de générateurs au débit actuel après refroidissement ont déjà abouti industriellement.

#### 3.1. Filtration au niveau de la bache alimentaire

La première application industrielle est celle d'un filtre KWU en Allemagne dans la centrale de KIEL sur une chaudière Benson de  $1000 \text{ t.h}^{-1}$ . Il s'agit d'un filtre de  $700 \text{ t.h}^{-1}$  (production de régime de la chaudière) avec une capacité de pointe de  $900 \text{ t.h}^{-1}$ , fonctionnant à  $130^\circ\text{C}$ , qui date de 1970. Sa puissance est de  $36 \text{ kW}$  [4]. Un système de deux filtres identiques a été installé peu après sur deux unités jumelées de  $300 \text{ MW}$ .

De l'avis du constructeur [7] des filtres atteignant des capacités de traitement de plus de  $9000 \text{ t.h}^{-1}$  devraient être réalisables. D'où l'intention de franchir un grand pas dans la conception d'un système de filtration pour les centrales électronucléaires de la classe des réacteurs de BIBLIS avec  $7200 \text{ t.h}^{-1}$  d'eau d'alimentation [6] qu'on envisage de réaliser au moyen de deux filtres doubles. D'autre part, dans la centrale de GUNDREMMINGEN la nouvelle tranche à réacteur bouillant devrait être équipée de filtres de  $1600 \text{ t.h}^{-1}$ , au même titre que les centrales de TULLNERFELD (non exploitée) et ISAR auparavant.

Entre temps [8] les études de faisabilité dans le circuit des condensats à l'entrée de la bache alimentaire de la tranche A de BIBLIS sont commencées avec un filtre de  $5 \text{ t.h}^{-1}$ .

On peut encore mentionner dans cette catégorie d'essais ceux plus anciens de quelques années déjà, d'un filtre KWU de  $10 \text{ t.h}^{-1}$  dans la ligne des condensats de réchauffeurs haute pression du SGHWR de WINFRITH [47].

Par ailleurs, des expériences d'application au traitement des condensats d'une centrale thermique à chaudière supercritique de 300 MWe avec un débit de 1000 à  $1150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  et à  $155^\circ\text{C}$  en URSS sont connues depuis quelque temps [87];

le filtre est du type KWU à billes. Un autre filtre, de construction domestique de  $1000 \text{ t.h}^{-1}$  a été essayé dans une centrale de 300 MWe à chaudière supercritique avec de l'eau conditionnée par l'hydrazine et l'ammoniac [97]. Avec un filtre du même type [107] des expériences de faisabilité ont été menées en centrale électronucléaire respectivement avec des condensats à  $90^\circ\text{C}$  et à  $160^\circ\text{C}$ .

### 3.2. Filtration des purges de générateur

La première mise en oeuvre date de la centrale KKS de STADE (640 MWe) ; le filtre électromagnétique traite l'eau de purge des quatre générateurs après réduction de la pression et refroidissement à  $50^\circ\text{C}$ , à raison de  $50 \text{ t.h}^{-1}$  (environ 1,5 % de taux de purge) [67]. En sortie de filtre l'eau est reprise dans un lit mélangé de résines échangeuses, puis restituée au condenseur. Ce filtre a fonctionné avec des concentrations de fer insoluble dans les purges très variables depuis la mise en exploitation de la centrale. Son efficacité vis-à-vis du fer approche 100 %, et d'autres éléments métalliques sous forme d'oxydes, y compris du plomb, sont fixés avec des efficacités variant de 50 % à 98 %. C'est également dans cette centrale que la première expérience dans la filtration des purges en eau conditionnée au phosphate de sodium a été faite (on sait que les oxydes de fer sont alors partiellement transformés en phosphate de fer).

Dans les centrales de BORSSELE (450 MWe), NECKARWESTHEIM (900 MWe) et les tranches BIBLIS-A (1200 MWe) et BIBLIS-B (1300 MWe) des filtres électromagnétiques retiennent le fer des eaux de purge avec des efficacités de 90 % à 100 % malgré le conditionnement au phosphate, la concentration du fer à l'entrée des filtres variant autour de moyennes comprises entre 0,5 et 1 ppm. La capacité de traitement du filtre standardisé d'une tranche de 1300 MWe se situe à  $100 \text{ t.h}^{-1}$  [6] et le projet s'achemine à présent vers la proposition de deux filtres indépendants en parallèle, dont l'un serait exclusivement réservé à la filtration séparative des purges de générateurs avec fuite d'eau primaire.

Enfin il convient de mentionner les expériences récentes de mise en oeuvre pour la filtration des purges réalisées par EdF dans les centrales de FESSENHEIM et du BUGEY.

#### V. CONCLUSION

Du seul point de vue de l'efficacité de la filtration des produits de corrosion insolubles dans l'eau d'alimentation que ce soit dans le circuit des condensats ou à la purge des générateurs de vapeur, l'intérêt du filtre électromagnétique ne pourrait plus être mis en doute. Mais les deux cas se distinguent par une différence importante des débits à traiter. Dans celui de la filtration des purges de générateurs, des améliorations notables du potentiel peuvent encore être escomptées, en généralisant le recyclage direct d'une fraction de l'effluent du filtre. Cependant une vue plus claire dans cette voie reste, à défaut d'expérience directe, conditionnée par une meilleure connaissance de l'hydraulique du générateur de vapeur pour localiser les endroits où de fortes concentrations de boues sont possibles, et décider ainsi des meilleures conditions d'extraction avec la purge accrue. Il s'agit là d'un intérêt futuriste qui reste lié à l'évolution de la construction des générateurs de vapeur.

En tout état de cause, la filtration des purges de générateurs de vapeur est possible avec des filtres de petite taille. Une filtration au niveau de la bache d'eau alimentaire, qui abaisserait notablement la quantité d'insolubles introduits dans le générateur de vapeur, exigerait certes un filtre de grande taille, mais reste technologiquement possible.

### Remerciements

L'auteur exprime sa reconnaissance particulièrement à M. J. CHENOUEARD qui a la responsabilité des expériences fondamentales d'application, à MM. P. GRANDCOLLOT et P. FAUVET qui participent activement à l'élaboration du traitement théorique de la filtration électromagnétique et de la cinétique du filtre.

### REFERENCES

- [1] R. BRUNNER, VGB Kraftwerkstechnik 56 n° 2 (1976) 90-100.
- [2] Communication personnelle.
- [3] L. DOLLÉ, P. GRANDCOLLOT, J. CHENOUEARD, R. DARRAS  
Extraction of insoluble corrosion products from the water circuits of nuclear power stations by electromagnetic filtration - Second World Filtration Congress London 18-20 Septembre 1979.
- [4] H.G. HEITMANN, Operating experience with electromagnetic separators and their application in the watersteam systems of power stations, 33 annual meeting - The International Water Conf. of the Eng. Soc. of Western Pennsylvania, Oct. 24th, 1972.
- [5] L. DOLLÉ, Procédé de décolmatage d'un filtre électromagnétique. B.F. n° 76.04646 du 19 Février 1976.
- [6] H.G. HEITMANN, Used of electromagnetic filters in nuclear power plants : experiments and operating experience -  
.../...

Int. Conf. on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems  
BNES Bournemouth 24-27 Oct. 1977.

- 7 H.G. HEITMANN, Ind. Water Eng. 12 (1969) 31-33
- 8 I.V. ZUBOV et al. Teploenergetika 23 (1976) n° 12, 66-69.
- 9 N.P. LAPOTYSHKINA et al. Teploenergetika 25 (1978) n° 1  
71-73.
- 10 I.P. SHTERENSHIS et al. Teploenergetika 23 (1976) n° 9,  
18-20.

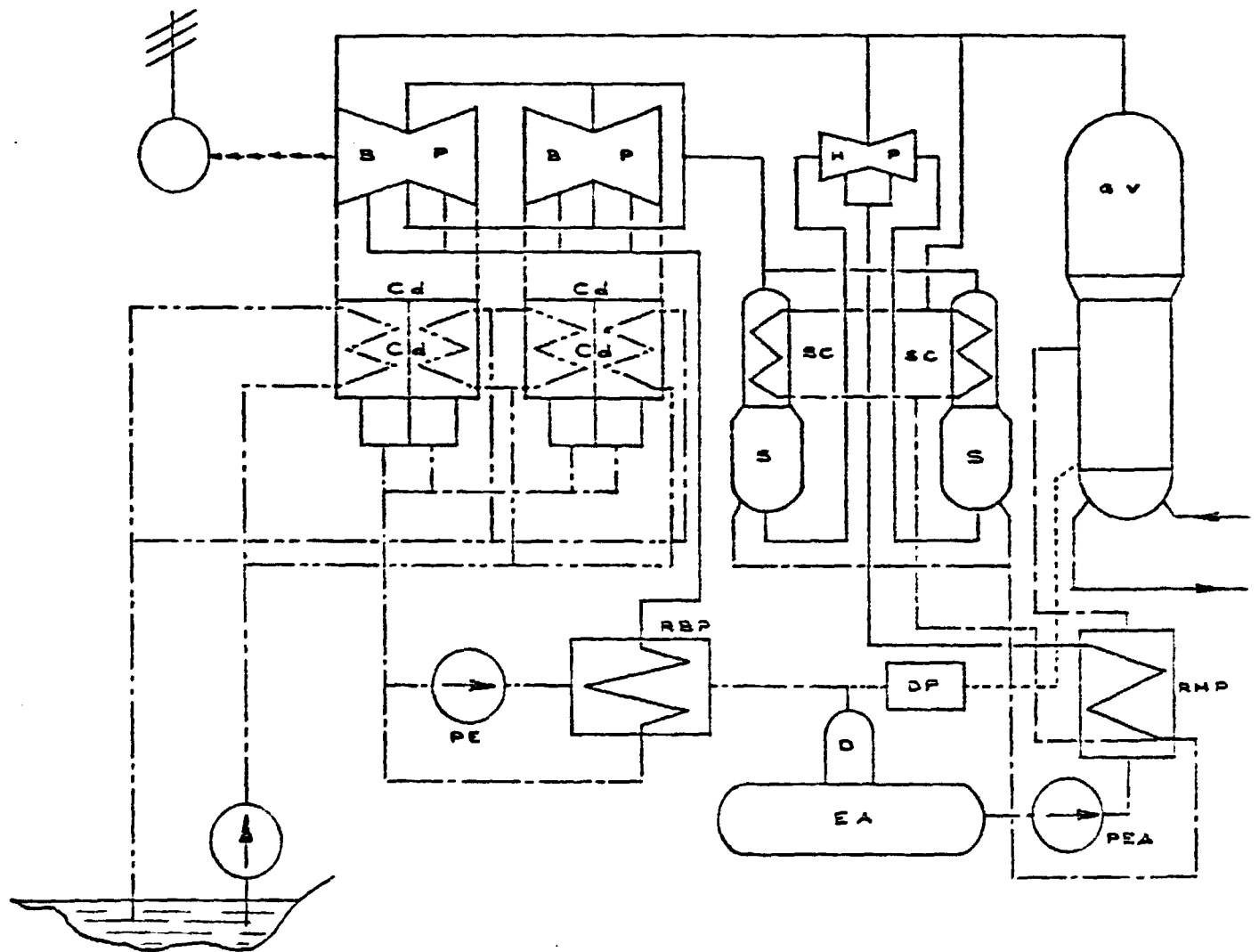


Fig - 1 SCHEMA SIMPLIFIE DU CIRCUIT DES CONDENSATS ET D'EAU ALIMENTAIRE

————	Vapeur	GV	Générateur de vapeur	D	Dégazeur
- - - - -	Purges	HP	Turbine haute pression	EA	Bacche d'eau alimentaire
.....	Condensats	S	Séparateurs	PEA	Pompe d'eau alimentaire
————	Eau de refroidissement	SC	Surchauffeurs	RHP	Réchauffeur basse pression
		BP	Turbine basse pression	DP	Déminéralisation des purges GV
		Cd	Condenseur		
		PE	Pompe d'extraction		
		RBP	Réchauffeurs basse pression		

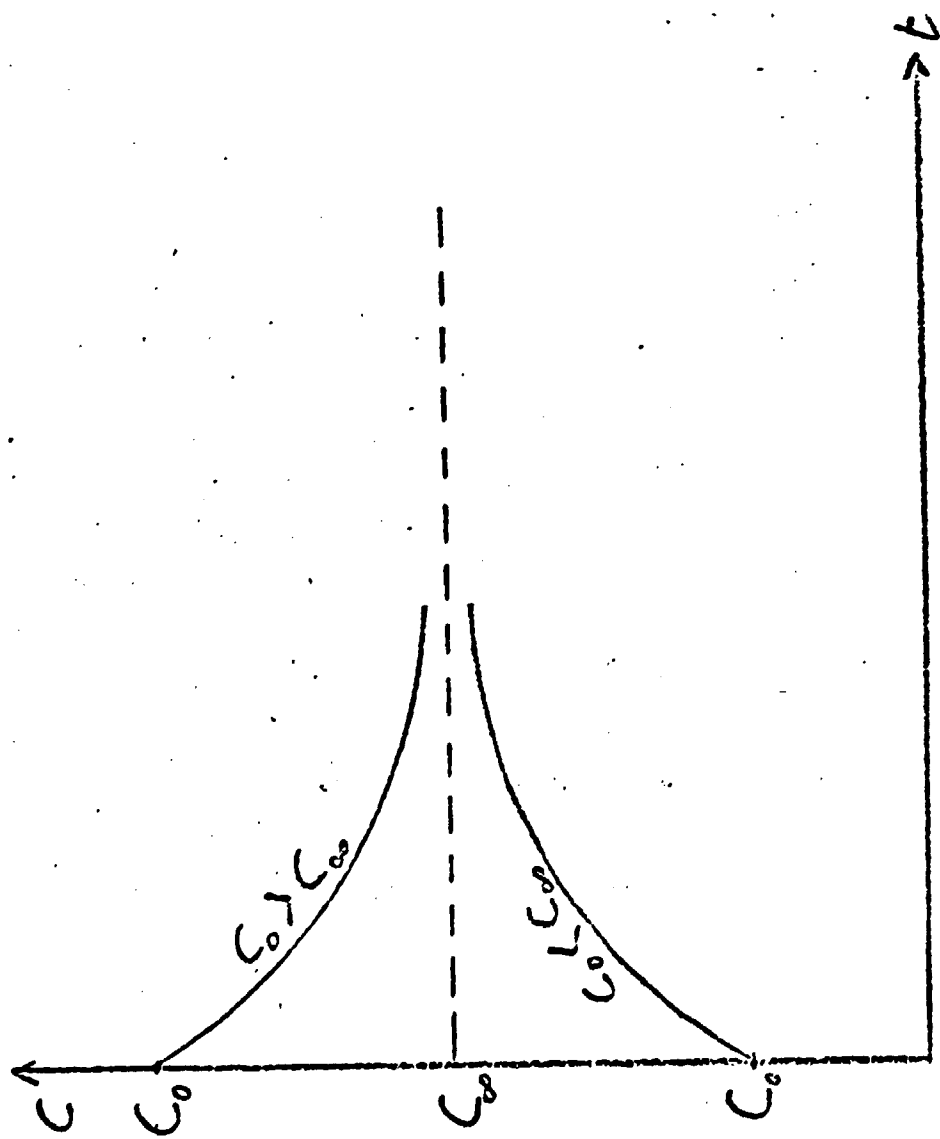


Fig. 2 Evolution de la concentration des produits de corrosion dans le circuit primaire  $C = f(t)$  (Equation 1)



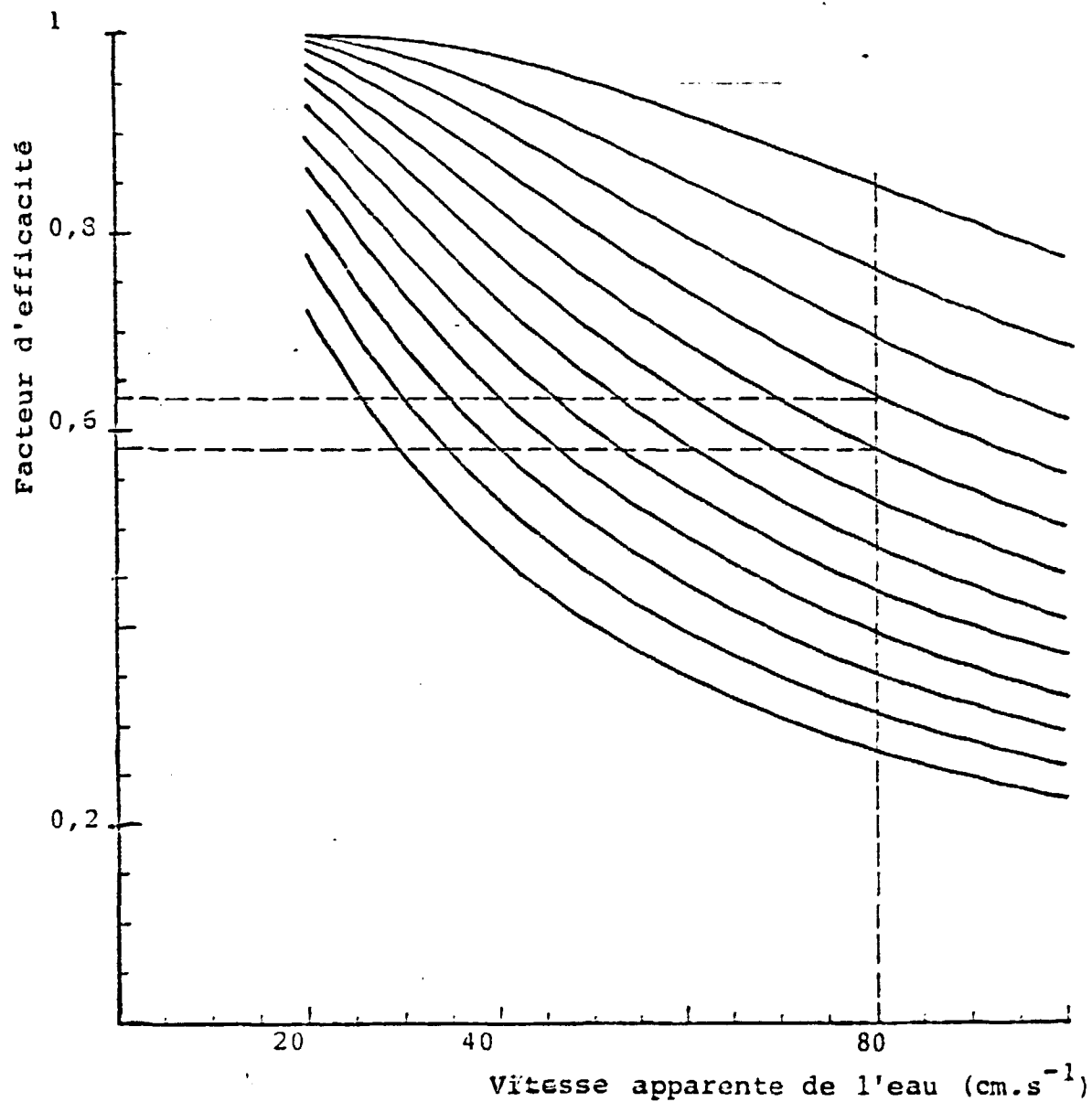


FIG. 3 - Variation d'efficacité du filtre en fonction de la vitesse linéaire  $V$ , pour différentes valeurs de la constante  $A$  de ce filtre (cf. § II.4).

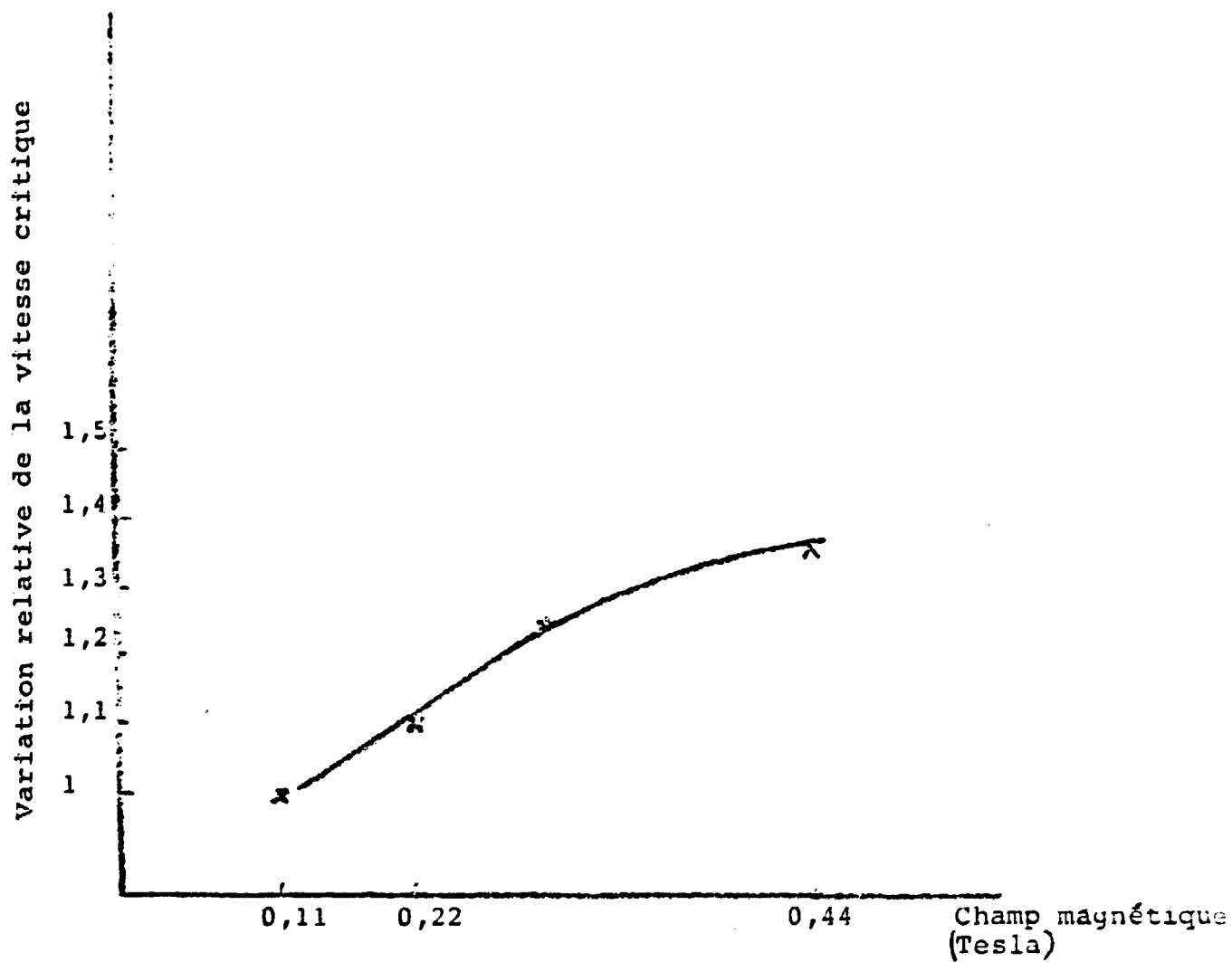


FIG..4 - Variation relative de la vitesse critique en fonction de l'intensité moyenne du champ magnétique.

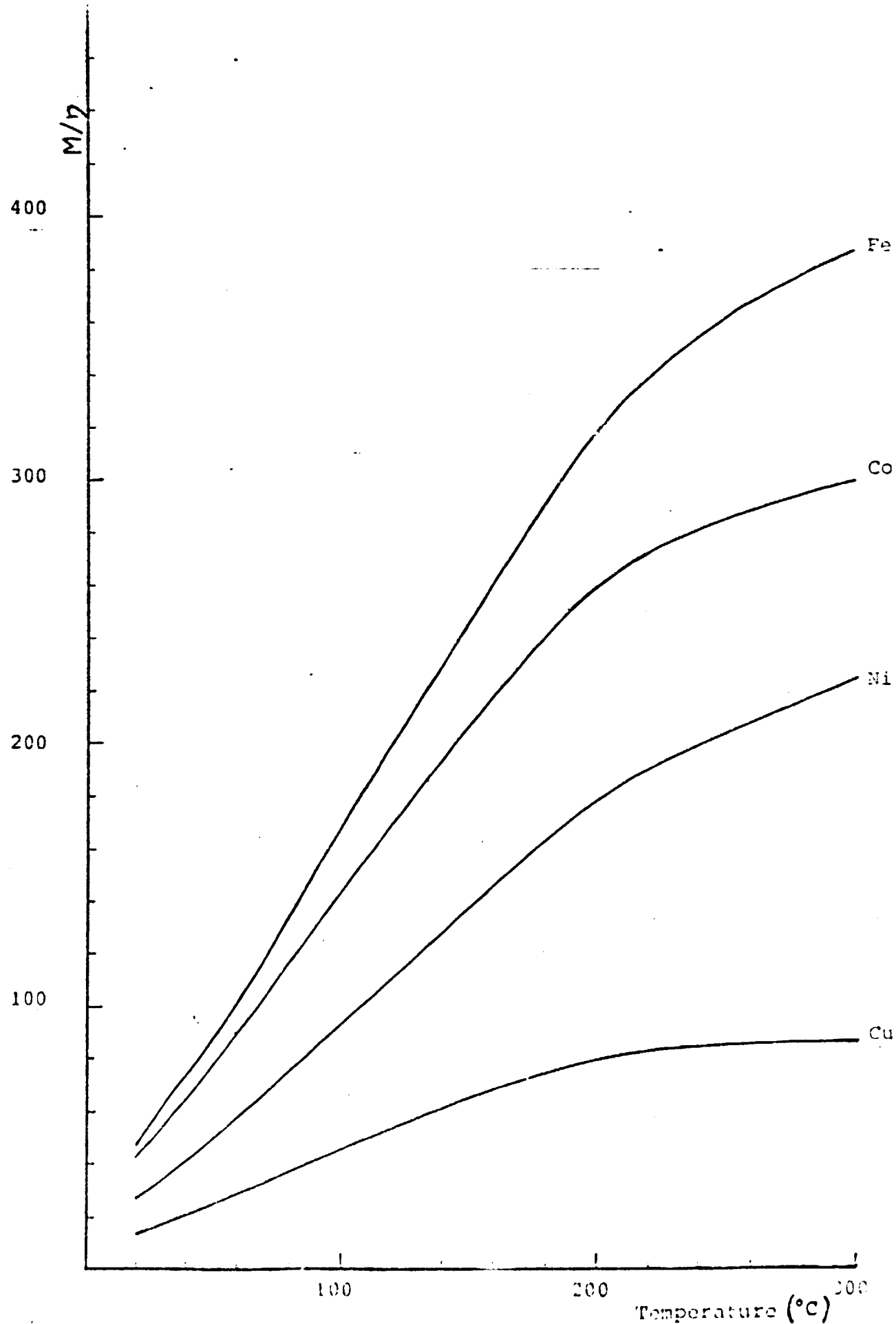


FIG. 5 - Variation du rapport  $M/\eta$  de la valeur numérique de l'aimantation de ferrites et de la viscosité de l'eau, en fonction de la température.

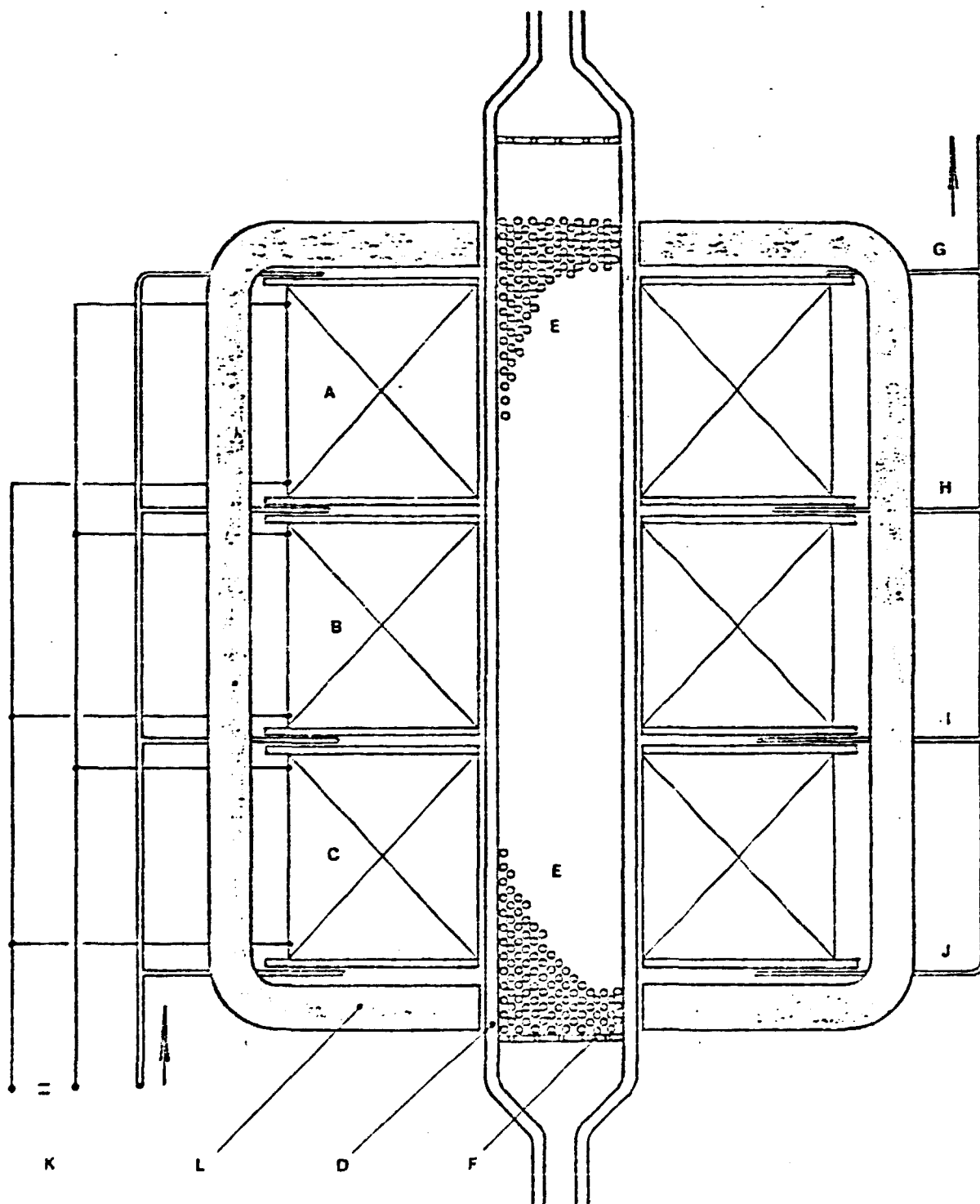


FIG. 6 - SCHEMA D'UN FILTRE ELECTROMAGNETIQUE EXPERIMENTAL.

A, B, C : BOBINES INDUCTRICES

D : TUBE DU FILTRE

E : GARNISSAGE DE BILLES

F : GRILLE DE SUPPORTAGE

G, H, I, J : CIRCULATION D'EAU DE REFROIDISSEMENT DES BOBINES

K : ALIMENTATION ELECTRIQUE DES BOBINES, EN COURANT CONTINU

L : ARMATURES MAGNETIQUES

EFFICACITE'

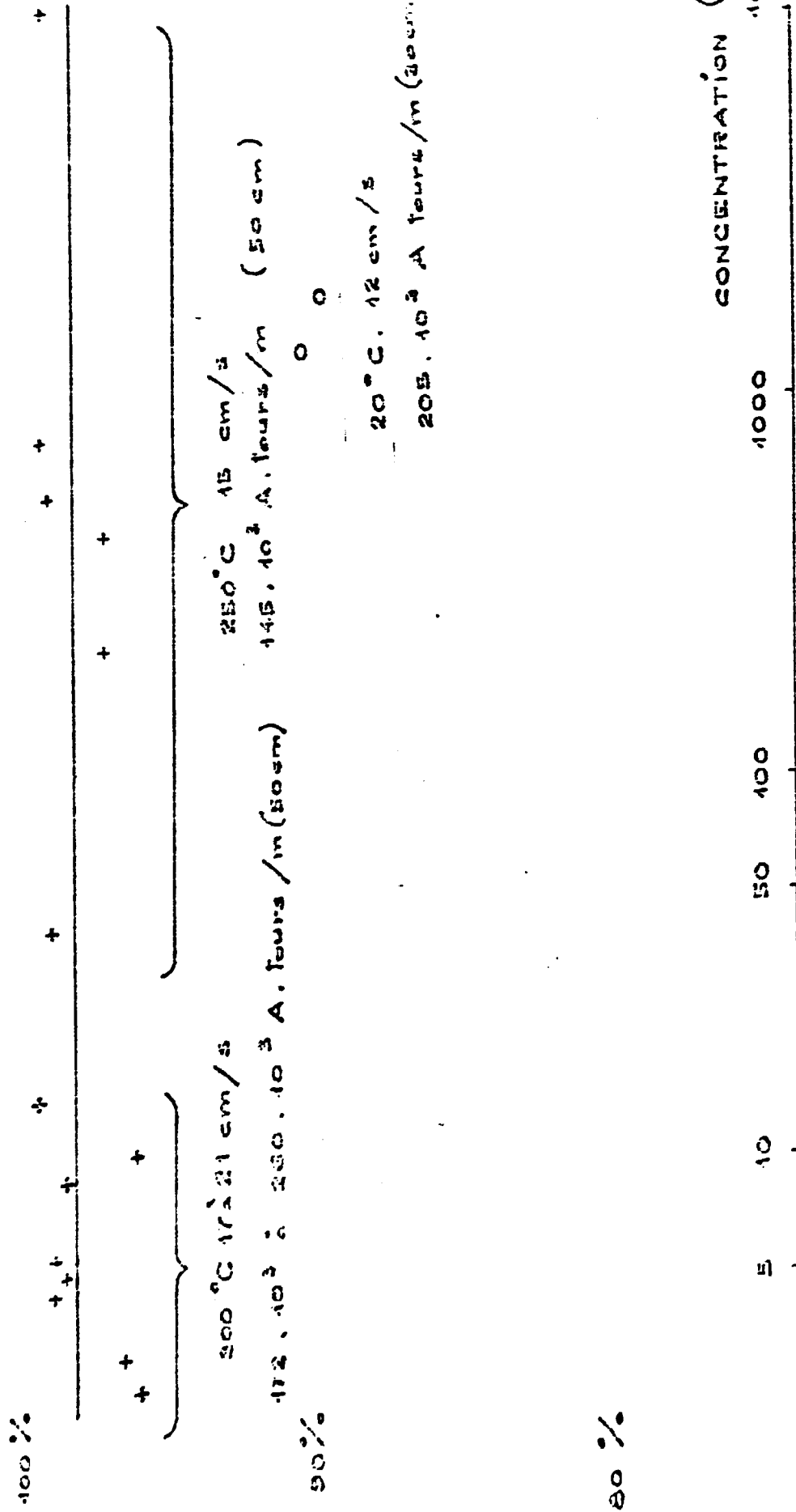


FIGURE 7 : EFFICACITE' EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE MAGNETITE

VITESSE CRITIQUE cm/s

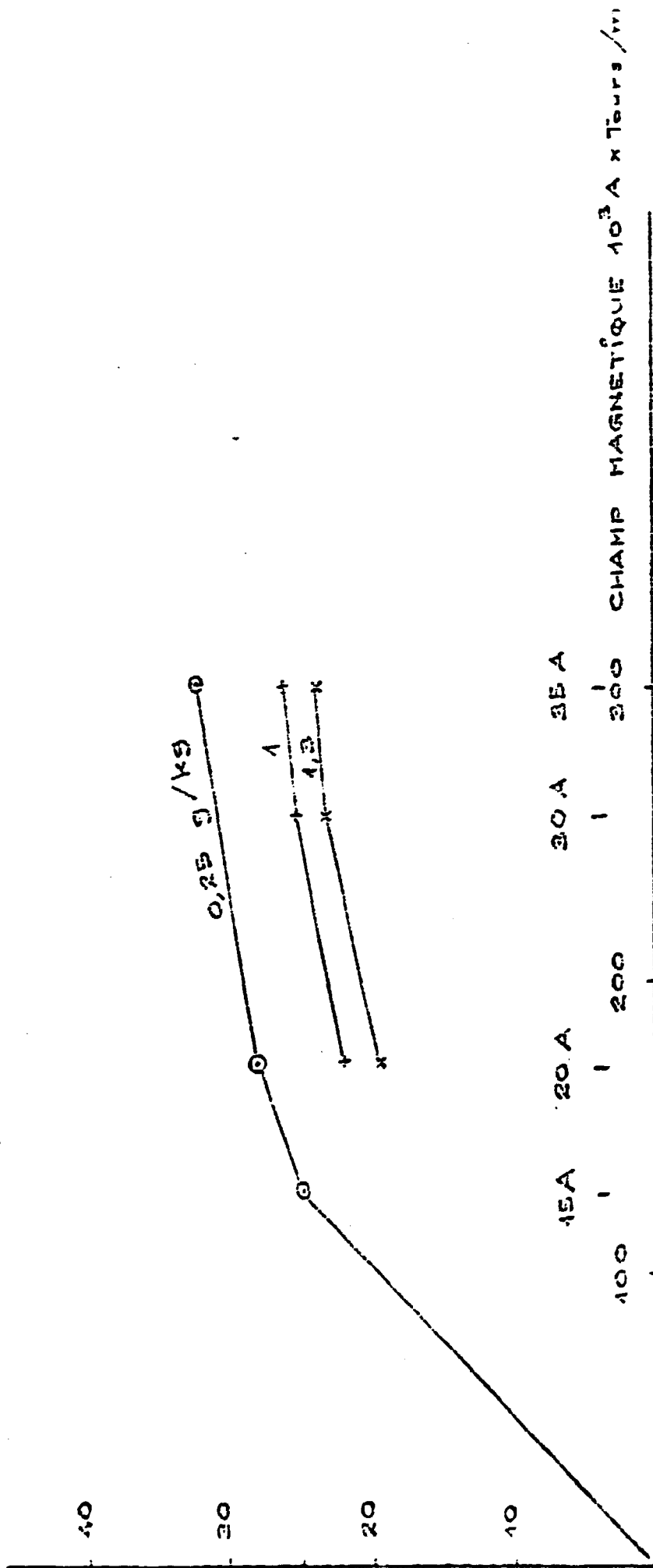


FIGURE 0 : EFFET DE LA CHARGE  
DU FILTRE

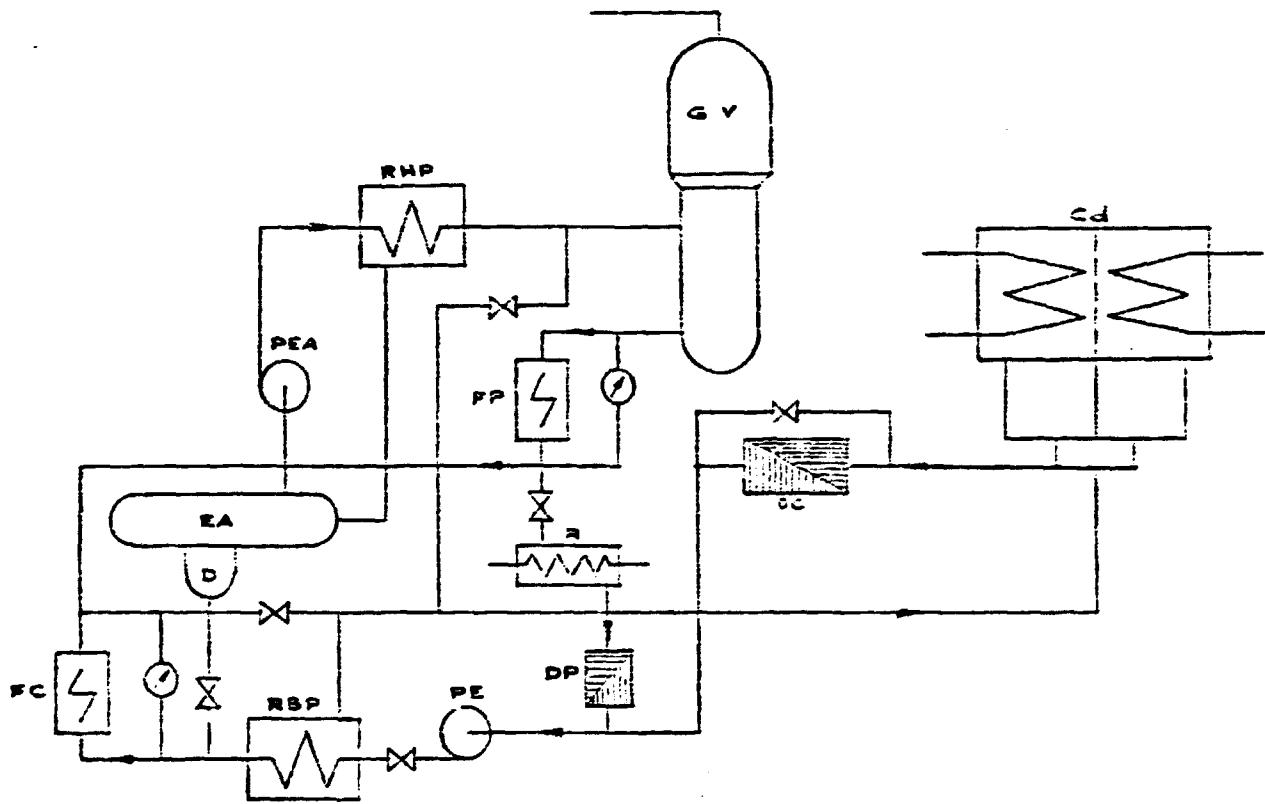


Fig. 9 FILTRATION ELECTROMAGNETIQUE DANS LE CIRCUIT D'EAU ALIMENTAIRE DE GÉNÉRATEUR DE VAPEUR

- |                                         |                                  |                                             |
|-----------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
| GV: Générateur de vapeur                | R: Réfrigérant                   | D: Dégazeur                                 |
| Cd: Condenseur                          | DP: Démminéralisation des purges | FC: Filtre électromagnétique des condensats |
| PE: Pompe d'extraction                  | PEA: Pompe d'eau alimentaire     | RHP: Réchauffeurs haute pression            |
| DC: Démminéralisation des condensats    | RBP: Réchauffeurs basse pression |                                             |
| FP: Filtre électromagnétique des purges | EA: Bache d'eau alimentaire      |                                             |

