

ROBIN M., SCHWAB B.

Rapport C.E.A. N° 703

Installation d'étude de transmission de chaleur à densité de flux élevée.

Summary. - Par suite de leur très faible pression de vapeur, les métaux à bas point de fusion (sodium, alliages sodium-potassium, etc.) peuvent être utilisés à haute température, comme fluides de chauffage, dans des installations dont la pression interne est voisine de la pression atmosphérique.

Grâce aux coefficients de convection très élevés que ces fluides permettent d'atteindre et aux importantes différences de température utilisables, il est possible de produire, à travers les surfaces d'échange, des densités de flux de chaleur considérables, de l'ordre de celles qui existent à travers les gaines des éléments combustibles des réacteurs nucléaires.

L'installation décrite a permis l'obtention d'une densité de flux de plus de 200 W/cm^2 , le fluide chauffant étant de l'alliage Na-K (à 56 pour cent en poids de potassium) porté à une température voisine de $550 \text{ }^\circ\text{C}$.

1957

21 pages

ROBIN M., SCHWAB B.

Rapport C.E.A. N° 703

Installation for the study of heat transfer with high flux density

Summary. - As a result of their very low vapour pressure, metals with a low fusion point (sodium, sodium-potassium alloys, etc.) can be used at high temperature, as heating fluids, in installations whose internal pressure is close to atmospheric pressure.

Owing to the very high convection coefficients which can be reached with these fluids and to the large temperature differences utilisable, it is possible to produce through the exchange surfaces considerable heat flux densities, of the order of those which exist through the casing of fuel elements in nuclear reactors.

The installation described allowed a flux density of more than 200 W/cm^2 to be obtained, the heating fluid being a Na-K alloy (containing 56 per cent by weight of potassium) brought to a temperature around $550 \text{ }^\circ\text{C}$.

1957

21 pages

PRÉSIDENCE DU CONSEIL
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

**INSTALLATION D'ÉTUDE
DE TRANSMISSION DE CHALEUR
A DENSITÉ DE FLUX ÉLEVÉE**

par

M. ROBIN et B. SCHWAB

Rapport CEA n° **703**

**CENTRE D'ÉTUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY
SERVICE DE DOCUMENTATION
Boîte postale n° 2 - Gif-sur-Yvette (S.-et-O.)**

- Rapport C.E.A. n° 703 -

Service de la Pile de Châtillon

INSTALLATION D'ETUDE DE TRANSMISSION DE CHALEUR
A DENSITE DE FLUX ELEVEE

par

M. ROBIN et B. SCHWAB

R.57-2174/SR

- 1957 -

INSTALLATION D'ETUDE DE TRANSMISSION DE CHALEUR

A DENSITE DE FLUX ELEVEE

I - OBJET DE LA RECHERCHE ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL -

1) Introduction -

Plus efficace que la convection turbulente, le phénomène d'ébullition locale permet, avec des écarts de température modérés, d'extraire un flux de chaleur de densité élevée d'une paroi solide, surchauffée par rapport au point d'ébullition du liquide en écoulement.

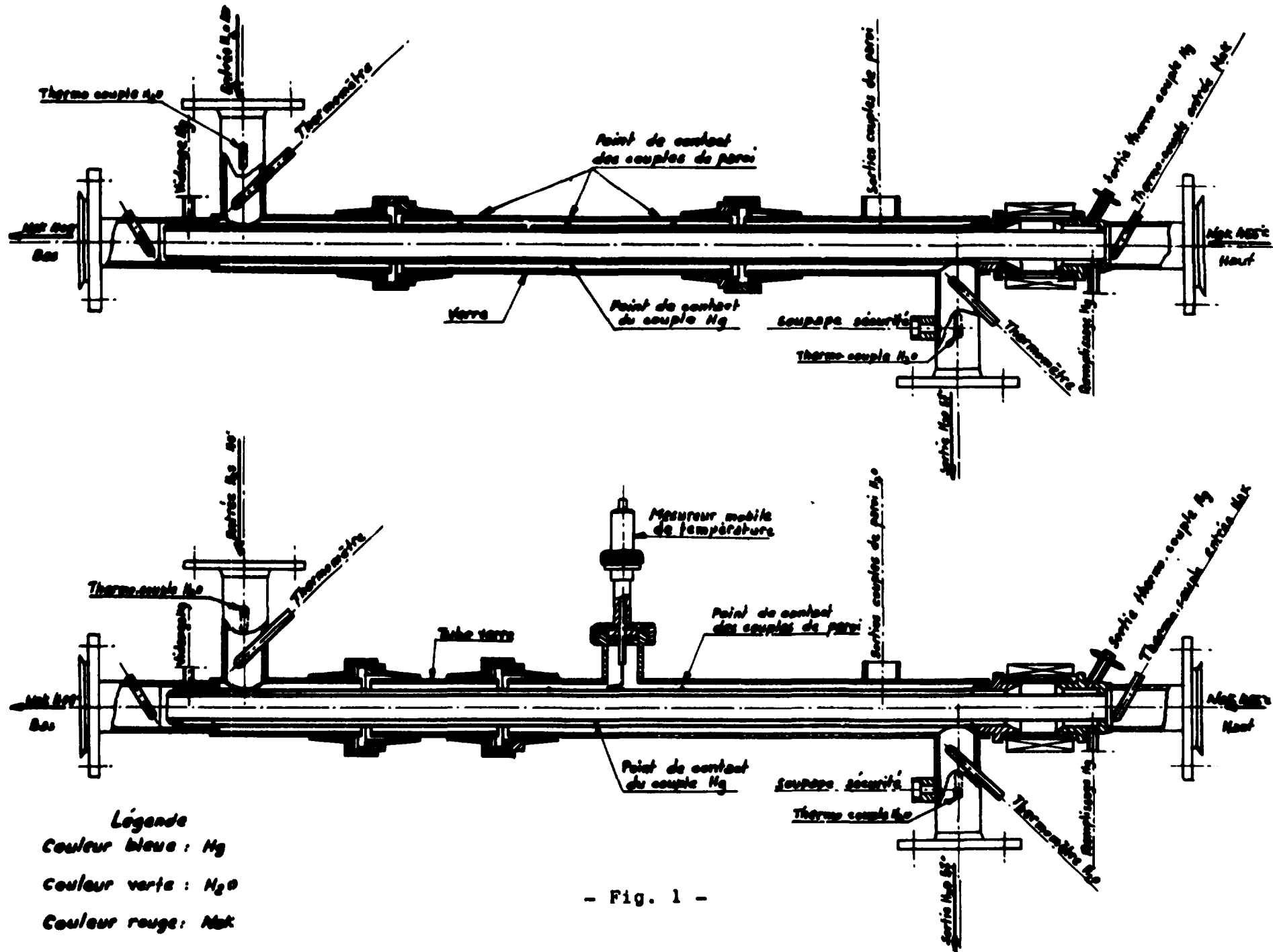
Le dispositif expérimental que nous allons décrire doit permettre l'étude de la transmission de la chaleur par convection avec ou sans ébullition locale sous une densité de flux de 200 watts/cm^2 , valeur rencontrée sur la surface de gaine du barreau central de la pile EL3.

2) Echangeur utilisé - (fig. 1 et 6)

La partie soumise aux essais comporte donc deux barreaux fictifs verticaux (voir fig. 1), petits échangeurs, dont la surface d'échange est identique et correspond très approximativement à la surface de gaine d'un barreau cylindrique non aileté, à refroidissement externe (type 11), de la pile EL3 (d'après note EL3 35-20 du 20/10/1955 des Chantiers de l'Atlantique). Cette surface d'échange mesure 132 cm de longueur et 3,2 cm de diamètre, soit $1326,34 \text{ cm}^2$ à comparer aux 1218 cm^2 correspondant au calcul n° 11 de la note précitée.

La puissance à évacuer devra prendre au moins la valeur :
 $0,2 \text{ kW/cm}^2 \cdot 1326,34 = 265 \text{ kW}$ soit $230\ 000 \text{ kcal/h}$.

Cette puissance sera apportée par de l'alliage Na-K (56 pour cent en poids de K) circulant de haut en bas dans un tube intérieur de $26 \times 28 \text{ mm}$ concentrique à la gaine de $30 \times 32 \text{ mm}$. Tube et gaine sont en acier étiré à froid sans soudure. Le tube intérieur a reçu une couche de nickelage d'une épaisseur de 30 microns (procédé KANIGEN) sur la surface interne au contact du Na-K. La gaine est nickelée par le même procédé sur sa surface externe (surface d'échange) en contact avec l'eau distillée de refroidissement. (La tenue de ces couches de nickel a été vérifiée, au cours d'un essai de 300 heures, sur un petit barreau, installé sur



Légende
 Couleur bleue : Hg
 Couleur verte : H₂O
 Couleur rouge : Mat

- Fig. 1 -

un circuit à alliage sodium-potassium, et refroidi par de l'eau de ville, la densité de flux thermique étant alors de 70 watts/cm²).

Tube central et gaine sont liés thermiquement par du mercure sous une pression d'azote de 8 kg/cm² environ. Le mercure est essentiellement destiné à servir de fluide tampon entre alliage sodium-potassium et eau, et de permettre de détecter une fuite éventuelle à travers le tube intérieur ou la gaine.

L'eau distillée de refroidissement s'écoule de bas en haut dans la section annulaire (aire 5, 20 cm²) comprise entre la gaine et un tube en pyrex (ϕ 41 x 48) destiné à permettre l'observation éventuelle du phénomène d'ébullition locale.

3) Mesures de températures prévues -

De ce point de vue, les deux barreaux échangeurs ne présentent pas une identité parfaite.

Les barreaux A et B sont munis de deux thermocouples mesurant les températures d'entrée et de sortie du Na-K, et de deux thermocouples mesurant les températures d'entrée et de sortie de l'eau distillée. Les quatre températures seront enregistrées à l'aide de potentiomètres MECI ; elles permettent, avec la mesure des débits d'eau distillée et de Na-K, de calculer le coefficient global de transmission. Les températures se répartiront par exemple comme l'indique la figure 7.

Nous proposerons d'atteindre également le coefficient de transmission entre surface extérieure de gaine et eau, ce qui nécessite la mesure de la température superficielle de gaine et celle de l'eau.

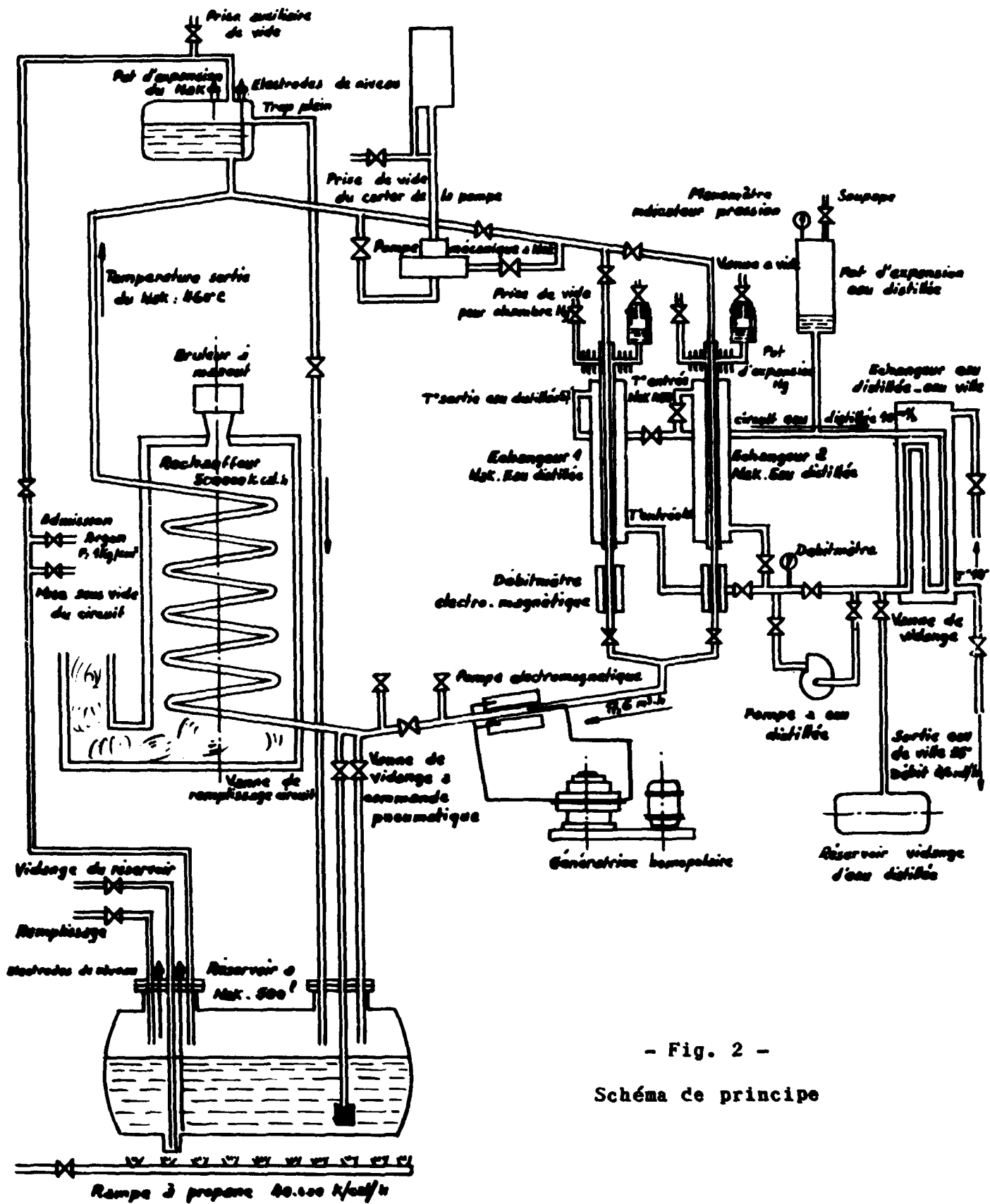
Les barreaux A et B sont munis de trois thermocouples soudés sur la gaine aux points indiqués sur la figure 1 et d'un thermocouple logé dans le mercure.

Côté eau, le barreau A est muni d'un thermocouple mobile permettant d'étudier la répartition de température dans la veine.

II - DISPOSITION GENERALE DE L'INSTALLATION (fig. 2) -

1) La boucle à Na-K -

1.1. - Le Na-K servant à apporter la chaleur aux barreaux A ou B est pompé en circuit fermé dans une boucle comportant deux pompes en série (l'une ou l'autre de ces pompes pouvant fournir le débit exigé par l'expérience) :



- Fig. 2 -
Schéma de principe

a) à la partie haute de la boucle se trouve une pompe centrifuge verticale, sans presse-étoupe, à moteur (3 ch) fonctionnant en atmosphère neutre. Cette pompe (pression : 2 kg/cm^2 , débit $20 \text{ m}^3/\text{h}$) a été essayée sur une boucle auxiliaire prévue à cet effet. Elle fonctionne actuellement correctement à une température de $560 \text{ }^\circ\text{C}$.

b) à la partie inférieure de la boucle se trouve une pompe électromagnétique à courant continu, alimentée par une génératrice homopolaire débitant $10\ 000$ ampères sous une tension de $0,5$ volt. Au cours d'essais à basse température ($50 \text{ }^\circ\text{C}$) la pompe a atteint les performances attendues, mais la génératrice homopolaire doit être révisée par suite de la salissure du mercure utilisé dans les collecteurs. Ces travaux sont actuellement en cours.

1.2. - Un débitmètre électromagnétique à aimant permanent réalisé et étalonné par nos soins, permet de mesurer le débit de Na-K qui sera d'ailleurs enregistré.

1.3. - Le Na-K en circulation est porté à la température désirée, dans un réchauffeur d'une puissance thermique nominale de $500\ 000 \text{ kcal/h}$ (environ 600 kW) fournie par un brûleur à fuel domestique. Ce réchauffeur construit par la Société STEIN et ROUBAIX est constitué essentiellement d'un casing en acier doux cylindrique vertical, garni intérieurement de briques réfractaires et muni d'un serpentín en acier inoxydable dont la partie supérieure forme chambre de combustion (chaleur transmise surtout par rayonnement), et dont la partie inférieure est léchée par les gaz chauds avant leur évacuation à la cheminée prévue à cet effet. Le Na-K circule dans le serpentín de bas en haut. Un thermocouple permet d'asservir la température de sortie du Na-K à la valeur choisie. Trois thermocouples soudés sur les parois du serpentín en des points judicieusement choisis permettent de contrôler la température du métal.

L'alimentation du brûleur en fuel s'effectue de façon classique à partir de la citerne de la chaufferie du bâtiment de la pile, et on dispose du tableau de commande et des sécurités habituelles.

La consommation de fuel à pleine puissance sera voisine de 80 kg/h , mais pour les essais prévus dans ce rapport le réchauffeur fonctionnera à mi-puissance.

1.4. - En cas d'incident ou hors des périodes d'essais, le Na-K peut être vidangé dans un réservoir de 500 litres disposé au point bas de l'installation. La vanne de vidange (du type à soufflet, comme toutes les vannes à sodium de la boucle) est à commande pneumatique (azote sous 4 kg/cm^2). Ce réservoir est d'ailleurs muni d'une rampe de réchauffeur par propane (puissance $40\ 000 \text{ kcal/h}$) permettant l'utilisation éventuelle du sodium (point de fusion $98 \text{ }^\circ\text{C}$) au lieu de l'alliage sodium-potassium (56 pour cent en poids de potassium, point de fusion $+ 8 \text{ }^\circ\text{C}$).

1.5. - La boucle à Na-K présente à sa partie supérieure un réservoir d'expansion destiné à permettre la libre dilatation du Na-K (variation de volume de l'ordre de 15 pour cent entre la température ambiante et 500 °C).

1.6. - L'ensemble des tuyauteries à Na-K, de diamètre 50/53, est muni de résistances de préchauffage blindées par tresse d'acier inoxydable et recouvert d'une couche de 100 mm de calorifuge "Stillite". Les résistances de préchauffage sont destinées à permettre l'utilisation de sodium dans la boucle au cours d'un essai ultérieur.

1.7. - Des électrodes maintenues sous une tension de 6 volts permettent de repérer les niveaux du Na-K dans les réservoirs.

1.8. - Des tuyauteries, reliables à un banc à vide et un épurateur d'argon, permettent :

- de faire le vide dans la boucle,
- de maintenir au-dessus des niveaux libres dans les réservoirs une atmosphère neutre d'argon complètement débarrassée d'oxygène et d'humidité.

1.9. - Matériau choisi, fabrication des appareils et tuyauteries, contrôle de fabrication.

La boucle à Na-K est exécutée entièrement en acier inoxydable 18-8-2,5 Mo (nuance NSMC des Aciéries électriques d'Ugine). Toutes les soudures ont été réalisées sous argon avec des électrodes en acier inoxydable au molybdène, décapées au bain nitrique-fluorhydrique, rincées, passivées puis testées au spectromètre à hélium. Le circuit ne comportant que des joints soudés, a été soumis à un vide secondaire, puis testé au spectromètre à hélium.

2) La boucle à eau distillée -

Par l'intermédiaire du barreau d'essai, le Na-K cède la chaleur qu'il transporte à de l'eau distillée circulant dans une boucle \varnothing 50/53 en acier inoxydable (NS 22 S) sous l'action d'une pompe centrifuge horizontale classique (débit maximum 11,5 m³/h sous une hauteur manométrique totale de 2 kg/cm²). La boucle à eau distillée comporte également :

- un réservoir de vidange isolé par une vanne à commande pneumatique,
- un réservoir d'expansion avec atmosphère sous pression contrôlée,
- un by-pass et diverses vannes de sectionnement,
- un débitmètre enregistreur du type à tore pendulaire couplé à un diaphragme normalisé,
- un échangeur à faisceau tubulaire en acier inoxydable bas carbone et enveloppe en acier doux A 37 du type 4 x 4, destiné à transmettre les calories

véhiculées par l'eau distillée à de l'eau prélevée sur le réseau urbain et déversée à l'égout (débit 8 m³/h contrôlé par rotamètre);

- la boucle à eau distillée a été réalisée en tube 50/53 avec des raccords à brides normalisées P.N.6 et joints Klingérit;

- lors des essais de la pompe, on a été amené à ajouter divers piquages de purge aux points hauts de l'installation afin que l'eau distillée n'entraîne pas de bulles d'air. Cette modification semble avoir été efficace.

3) Dispositifs électriques divers -

3.1. - Fonctionnement du réchauffeur (fig. 3).

- une pompe principale suivie d'un filtre et d'une pompe doseuse alimente en fuel le brûleur. L'air nécessaire à la combustion du fuel est fourni par un ventilateur dont le débit est réglé par un registre;

- le tirage de la cheminée est également réglé par un registre;

- un thermocouple soudé sur le tuyau de sortie du Na-K asservit le débit de fuel à la température par l'intermédiaire d'un régulateur. Un deuxième thermocouple monté de la même manière est relié à un indicateur de température qui sert de régulateur de sécurité en cas de non fonctionnement du premier régulateur: il arrête le brûleur si la température devient supérieure à la température de réglage;

- le débit d'air de combustion est asservi au débit de fuel par un deuxième régulateur;

- le tirage de la cheminée est maintenu constant par un troisième régulateur;

- tous ces asservissements peuvent être mis hors service et les réglages effectués manuellement.

3.2. - Niveau sur les réservoirs à métal liquide (fig. 4).

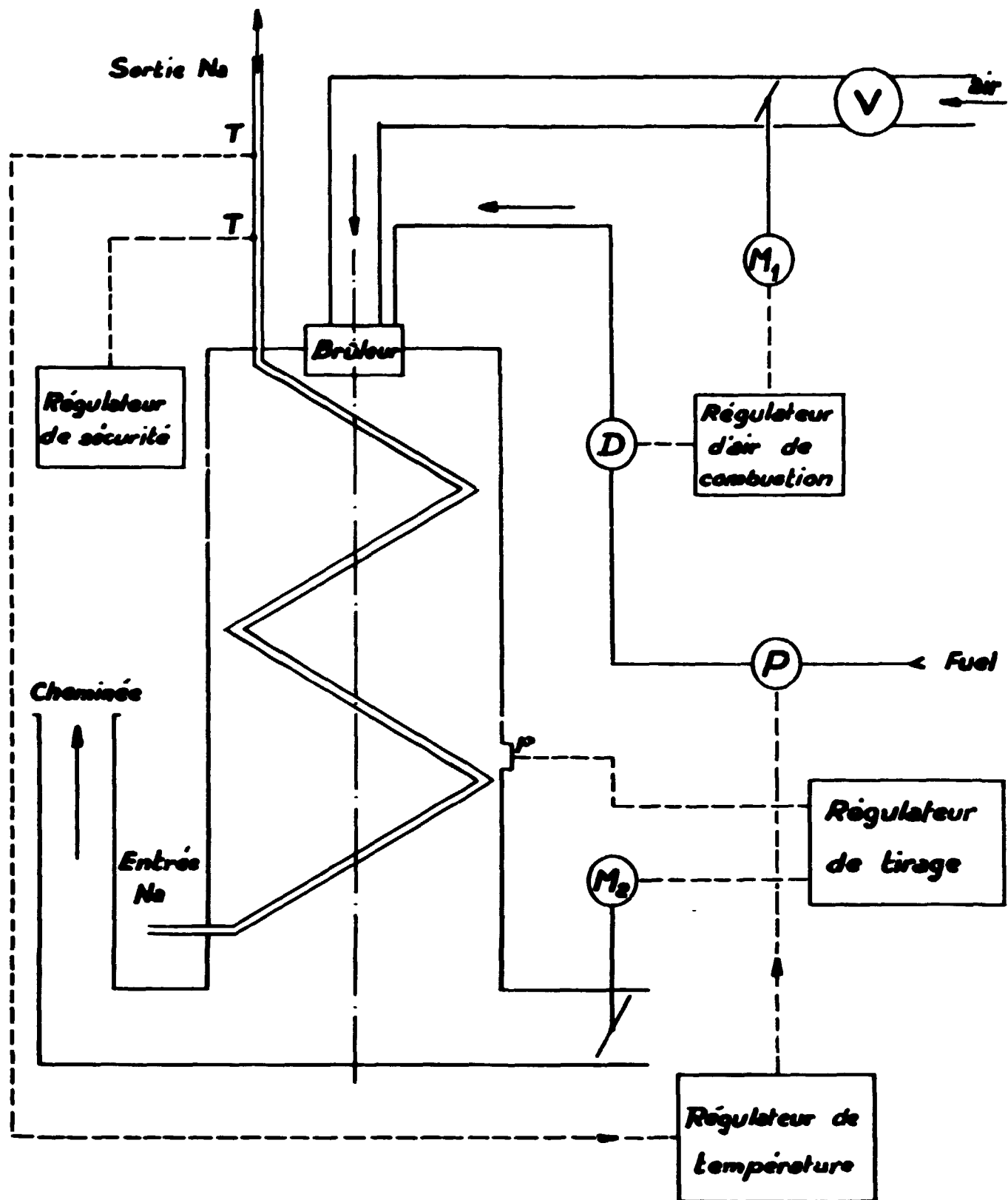
a) Réservoir de stockage.

Les électrodes isolées E₁ et E₂ ferment le circuit de simples lampes de signalisation alimentées en basse tension. Aucun dispositif d'alarme ou de sécurité n'est prévu.

b) Réservoir d'expansion.

L'électrode E₃ signale le parfait remplissage du circuit. Elle donne l'alarme en marche normale si le niveau vient à baisser, soit au début de la mise en marche du circuit par suite d'un mauvais remplissage (purge de l'argon), soit par suite d'une fuite de métal liquide (fuite à l'extérieur du circuit ou mauvaise étanchéité au siège des vannes de vidange).

c) Le bouton poussoir M met E₃ à la masse pour vérifier le bon fonction-



- Fig. 3 -

SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU RECHAUFFEUR

- | | |
|---|---|
| V Ventilateur (air de combustion) | ↑ Prise de pression dans la chambre de combustion |
| M₁ Moteur de commande du registre d'air | M₂ Moteur de commande du registre de tirage |
| P Pompe doseuse de fuel | T Mesure de température |
| D Débitmètre (fuel) | |

nement des circuits électriques avant le remplissage. La lampe L_4 du tableau général est à proximité de la vanne de remplissage du circuit.

d) Toutes les électrodes sont facilement démontables, pour permettre leur nettoyage se produisant, en cas de mise à la masse accidentelle soit par projection ou condensation de métal liquide sur l'isolant de l'électrode, soit par un dépôt solide au fond du réservoir (cas très rare si le circuit reste propre).

3.3. - Ensemble de détection des ruptures de soufflet sur les vannes à Na-K (fig. 5).

Fonctionnement.

Si le soufflet de la vanne ne fuit pas, l'électrode E est isolée de la masse et le relais R reste alimenté.

En cas de fuite, le relais R est mis en court-circuit par le fil de masse général reliant le circuit aux relais et son armature retombe.

Toute rupture accidentelle des circuits coupe l'alimentation du relais R correspondant (ou de tous les relais R dans le cas d'une rupture des fusibles F_1 F_2) provoquant un arrêt intempestif de l'installation.

Rôle du relais R (fig. 6).

Il possède :

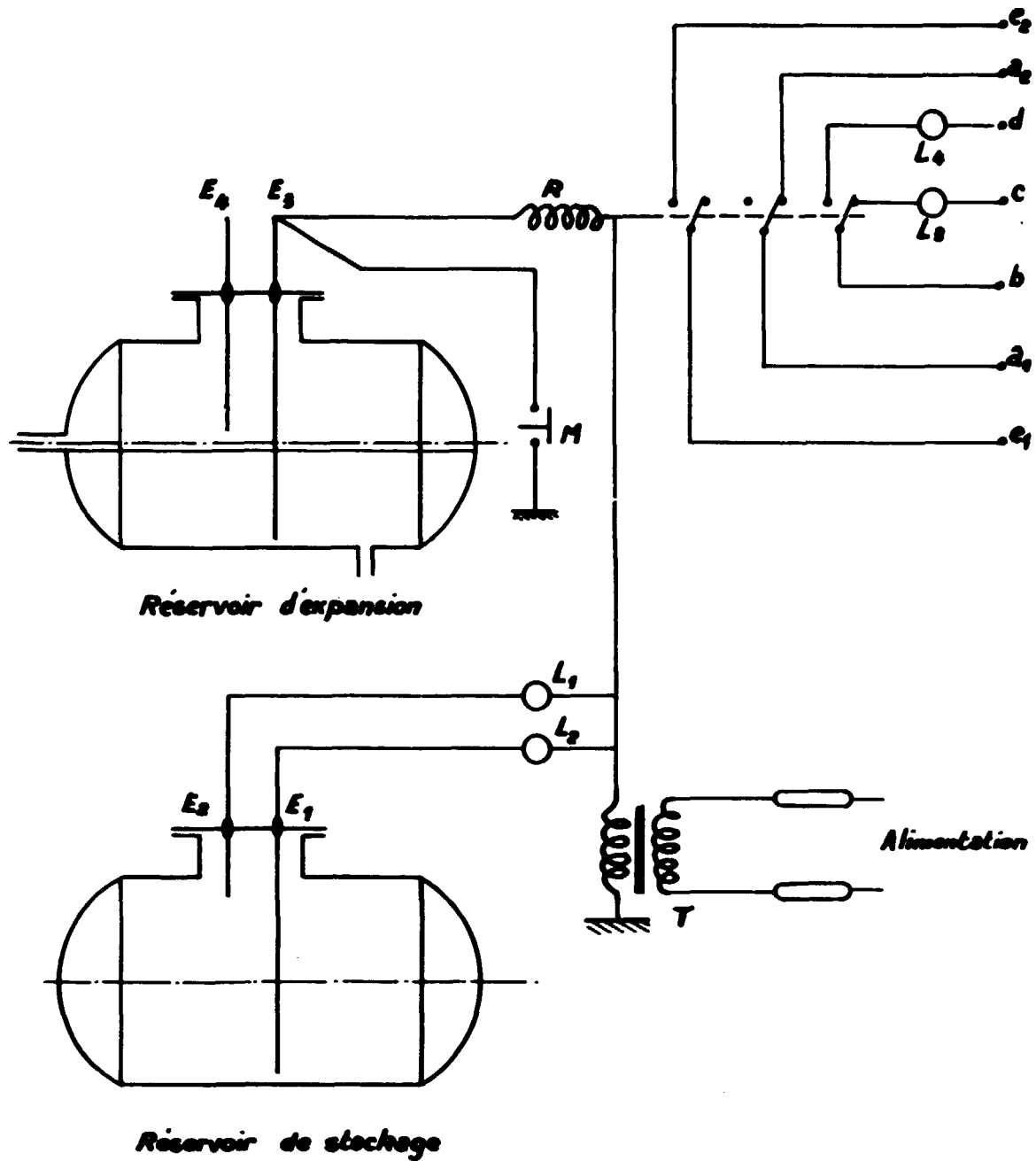
- a) un contact à ouverture au repos connecté en série avec ceux des autres relais R assurant les manoeuvres de sécurité (vidange du Na-K);
- b) un contact d'alarme à fermeture au repos ;
- c) un inverseur de signalisation de la vanne défectueuse sur le schéma du tableau.

3.4. - Vannes de vidange des circuits Na-K et eau.

Ce sont des vannes à commande pneumatique par vanne pilote d'électromagnétique. La vidange des circuits est obtenue par manque d'alimentation électrique.

En cas de panne d'alimentation, l'arrêt de la pompe d'eau distillée entraînerait l'ébullition de l'eau dans le barreau, ce qui risquerait de mettre ce circuit sous pression si la vanne pneumatique ne s'ouvrait pas automatiquement.

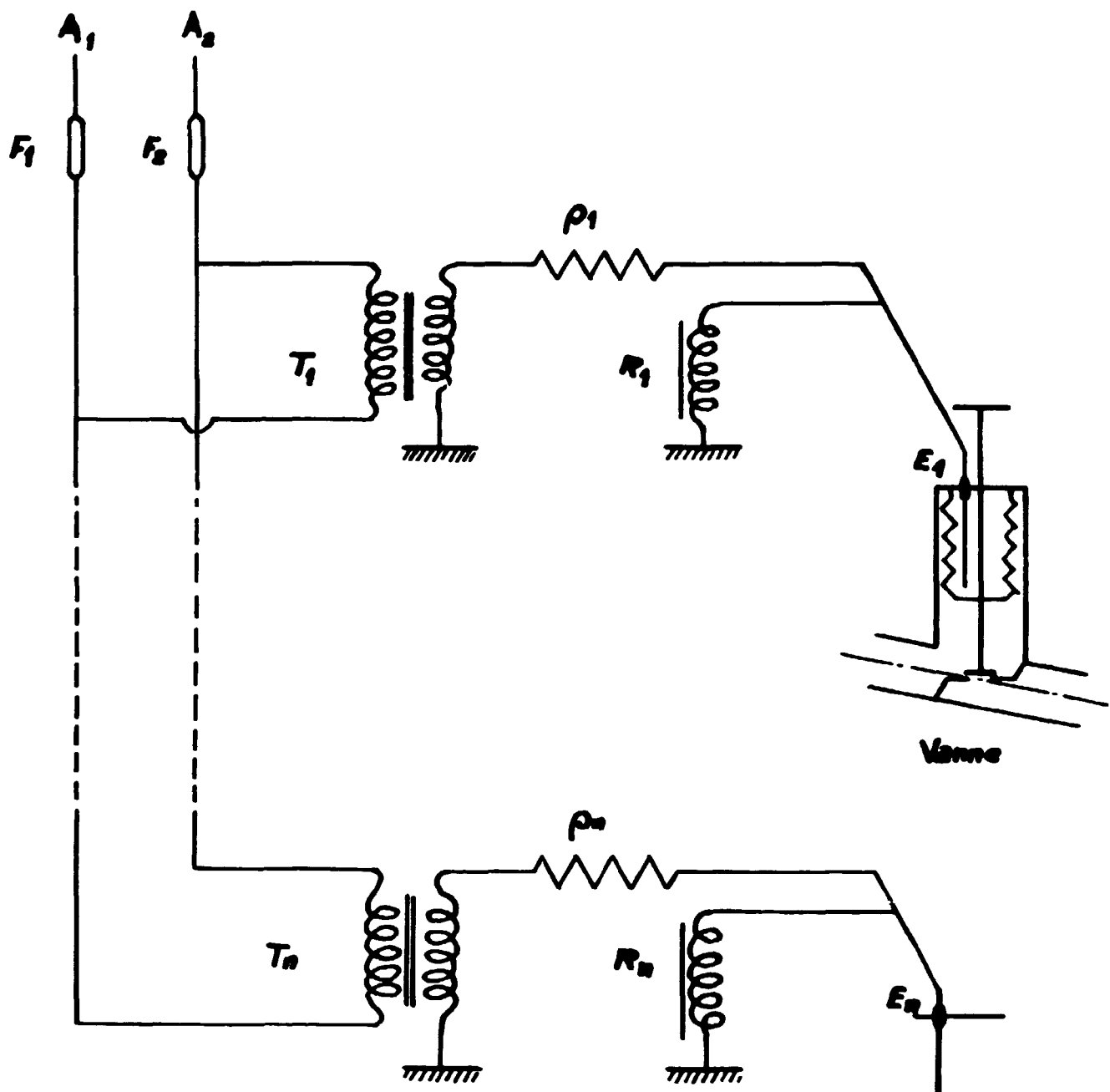
Par contre, il n'est pas nécessaire de vidanger le circuit de Na-K, d'autant plus que son remplissage est une opération longue et coûteuse (argon). La vanne de vidange est donc alimentée par une batterie d'accumulateurs.



- Fig. 4 -

NIVEAUX SUR LES RESERVOIRS A METAL LIQUIDE

- E_i Electrode isolée
- T Transformateur abaisseur
- L_1, L_2, L_4 Lampes de signalisation du niveau
- L_3 Lampe de signalisation d'un manque de niveau
- a_1, a_2 Circuit d'alarme
- e_1, e_2 Circuit de sécurité
- b, c Alimentation pulsée de L_3
- b, d Alimentation continue L_4
- M Bouton de vérification



- Fig. 5 -

ENSEMBLE DE DETECTION DE FUITE

SUR LES VANNES A SOUFFLET POUR METAUX LIQUIDES

- A_1, A_2 alimentation générale (220 V \sim par exemple)
- $T_1, T_2 \dots T_n$ transformateurs abaisseurs (220/24)
- $\rho_1, \rho_2 \dots \rho_n$ résistance limitant le courant de court circuit du transformateur
- $R_1, R_2 \dots R_n$ relais de protection et signalisation
- $E_1, \dots E_n$ électrode isolée de détection de fuite sur la vanne

3.5. - Mercure intermédiaire.

Dans chaque appareil comportant du mercure comme fluide intermédiaire, la pression de gaz de couverture est contrôlée par un manomètre à contact actionnant un circuit d'alarme et de signalisation lorsque la pression descend au-dessous du minimum imposé.

3.6. - Détection des fuites de mercure.

Une électrode isolée montée sur le réservoir d'expansion du mercure contrôle son niveau.

En cas de fuite de mercure, le circuit électrique s'ouvre et déclenche l'alarme et la signalisation.

3.7. - Incidents possibles et sécurités prévues.

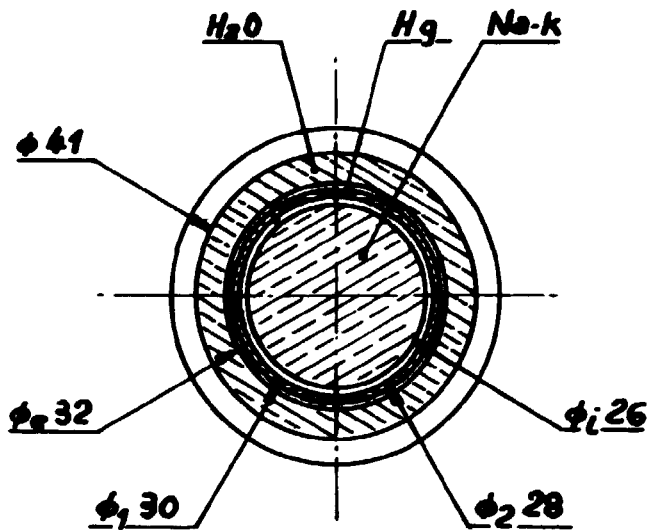
Nature de l'incident	Appareils de détection de l'incident	Danger présenté par l'incident	Réaction de l'installation
1 Coupure d'eau de ville	Enregistreur de la température d'eau distillée	montée très rapide des températures	Alarme, signalisation, arrêt du réchauffeur
2 Arrêt de la pompe à eau distillée	Contacteur d'alimentation de la pompe	Si les brûleurs sont en marche : ébullition rapide de l'eau, mise en pression du circuit d'eau	Alarme, signalisation, arrêt du réchauffeur, vidange de l'eau
3 Arrêt de la pompe à Na-K (peut se produire par échauffement du moteur)	Contacteur d'alimentation de la pompe	montée de la température du Na-K dans le réchauffeur	Alarme, signalisation, arrêt du réchauffeur
4 Baisse du niveau de mercure dans le barreau	Electrode de niveau	non immédiat	Alarme, signalisation,
5 Rupture d'un soufflet de vanne	Electrode de détection	Fuite de Na-K à l'extérieur	Alarme, signalisation, vidange du Na-K, entraîne 5
6 Baisse du niveau de Na-K (fuite à l'extérieur ou au siège de la vanne de vidange)	Electrode de niveau	Fuite de Na-K	Alarme, signalisation, arrêt pompe du Na-K qui entraîne 3
7 Baisse de pression sur le mercure du barreau	Manomètre à contacts électriques	Ebullition du mercure	Alarme, signalisation,
8 Panne d'alimentation électrique générale	Arrêt général de l'installation	Ebullition de l'eau distillée	Vidange de l'eau

III - CALCULS -

1) Calcul thermique du barreau échangeur -

a) Estimation du coefficient global de transmission K entre sodium et eau distillée.

On a par définition de K, rapporté à la surface de transmission côté eau : (voir fig. 6)



- Fig. 6 -

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_e} + \left(\frac{e}{\lambda}\right)_{Ni} + \frac{e_{e1}}{\lambda_{e1}} \frac{A_e}{A_{e1}} + \frac{e_{12}}{\lambda_{12}} \frac{A_e}{A_{12}} \quad (1)$$

$$+ \frac{e_{2i}}{\lambda_{2i}} \frac{A_e}{A_{2i}} + \left(\frac{e}{\lambda}\right)_{Ni} \frac{A_e}{A_i} + \frac{1}{h_i} \frac{A_e}{A_i}$$

A_e, A_1, A_2, A_i désignent les surfaces latérales de diamètres $\phi_e, \phi_1, \phi_2, \phi_i$, tandis que les A affectés de deux indices désignent les moyennes logarithmiques (ici pratiquement confondues avec les moyennes arithmétiques) des A caractérisés par chaque indice.

- $\left(\frac{e}{\lambda}\right)_{Ni}$ représente la résistance thermique du dépôt de nickel de 30 microns d'épaisseur ($\lambda = 3,8 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$);

- λ_{e1} représente le coefficient de conduction thermique du tube d'épaisseur e_{e1} (acier doux) limité par les surfaces A_e et A_1 .

On a les valeurs numériques suivantes :

$\lambda_{e1} = 39 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$ (McADAMS, Transmission de la chaleur, page 445)
 $\lambda_{12} = 11 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$ (mercure vers 400 °C)
 $\lambda_{2i} = 34 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$ (McADAMS, page 445)

$$e_{e1} = e_{12} = e_{2i} = 10^{-3} \text{ m}$$

et

$$\frac{A_e}{A_{e1}} = \frac{\phi_e}{\phi_{e1}} = \frac{32}{31} = 1,03$$

$$\frac{A_e}{A_{12}} = \frac{\phi_e}{\phi_{12}} = \frac{32}{29} = 1,1$$

$$\frac{A_e}{A_{2i}} = \frac{\phi_e}{\phi_{2i}} = \frac{32}{27} = 1,18$$

$$\frac{A_e}{A_i} = \frac{\phi_e}{\phi_i} = \frac{32}{26} = 1,23$$

Pour faire un calcul donnant une valeur minimum pour h_e , on négligera l'ébullition locale éventuelle et on appliquera la formule :

$$\frac{h_e D_e}{\lambda} = 0,023 \left(\frac{G D_e}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)^{0,4}$$

(McADAMS, Transmission de la chaleur, page 193)

Le débit d'eau distillée étant supposé égal à $10,1 \text{ m}^3/\text{h}$ (en fait la pompe centrifuge permet d'atteindre un débit de $11,5 \text{ m}^3/\text{h}$ soit une vitesse de $6,2 \text{ m/s}$) et la température d'entrée de l'eau étant de $40 \text{ }^\circ\text{C}$, son échauffement sera de : $\frac{230\ 000}{10\ 000 \cdot 1} = 22,8 \text{ }^\circ\text{C}$, d'où une température de sortie de $62,8 \text{ }^\circ\text{C}$ et une température moyenne de $51,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour l'eau à cette température : $P_n^{0,4} = 1,74$

$$\text{d'après McADAMS} \begin{cases} \lambda = 0,55 \text{ kcal/h.m. }^\circ\text{C} \\ \mu = 1,9 \text{ kg/h.m} \end{cases}$$

page 492

La section annulaire ($\phi 32 \times 41$) de passage de l'eau a pour aire : $5,8 \text{ cm}^2$ ou $5,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, et le diamètre hydraulique équivalent D_e mesure : $9 \times 10^{-3} \text{ m}$

Le débit massique unitaire G est égal à : $\frac{10\ 100}{5,8 \cdot 10^{-4}} = 1,74 \cdot 10^7 \text{ kg/h.m}^2$

et le nombre de REYNOLDS $\frac{1,74 \cdot 10^7 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{1,9} = 8,25 \cdot 10^4$

$$R_e^{0,8} = 8500$$

et $h_e = \frac{0,55}{9 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,023 \cdot 8500 \cdot 1,74 = 20\ 800 \text{ kcal/h.m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

Le coefficient de transmission entre paroi et Na-K sera estimé à l'aide de la formule de LYON affectée du coefficient 0,6, soit :

$$\frac{h_i \phi_i}{\lambda} = 0,6 (7 + 0,025 P_e^{0,8})$$

avec

$$P_e = R_e \times P_n = \frac{\mu C_p}{\lambda} \times \frac{\rho V \phi_i}{\mu}$$

Nous fixerons le débit de Na-K par la condition que la vitesse dans le barreau n'excède pas 10 m/s , ce qui correspond à un débit de :

$$10 \cdot 3600 \cdot \frac{3,14}{4} (26 \cdot 10^{-3})^2 = 19 \text{ m}^3/\text{h} \text{ ou } 19 \cdot 0,78 = 14,8 \text{ t/h}$$

La chaleur spécifique de Na-K étant de $0,237$ à la température présumée, la chute de température subie par l'alliage, entre entrée et sortie, sera de :

$$\Delta \theta_{\text{Na-K}} = \frac{230\ 000}{0,237 \cdot 14\ 800} = 65,5 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (fig. 7)}$$

Aux températures de 400 à 500 °C envisagées, $\lambda = 23,2$ kcal/h.m. °C
 $\mu = 0,685$ kg/h.m et $P_c = 0,007$

Le nombre de REYNOLDS relatif à l'écoulement de Na-K est égal à :

$$Re = \frac{780 \cdot 10 \cdot 3600 \cdot 26 \cdot 10^{-3}}{0,685} = 1,07 \cdot 10^6$$

d'où la valeur du nombre de PECLET : $1,07 \cdot 10^{-6} \cdot 7 \cdot 10^{-3} = 7,49 \cdot 10^3$

Par suite h_i prend la valeur :

$$h_i = \frac{0,6 \cdot 23,2}{26 \cdot 10^{-3}} \left[7 + 0,025 (7490)^{0,8} \right] = 20\ 250 \text{ kcal/h.m. } ^\circ\text{C}$$

Les coefficients de film côté eau et côté Na-K prendraient donc des valeurs voisines.

D'après l'équation (1), nous aurons :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{2,08 \cdot 10^4} + \frac{30 \cdot 10^{-6}}{3,8} + \frac{10^{-3}}{39} \cdot 1,03 + \frac{10^{-3}}{11} \cdot 1,1$$
$$+ \frac{10^{-3}}{34} \cdot 1,18 + \frac{30 \cdot 10^{-6}}{3,8} \cdot 1,23 + \frac{10^{-4}}{2,025} \cdot 1,23$$

$$\text{soit } \frac{1}{K} = 4,8 \cdot 10^{-5} + 7,8 \cdot 10^{-6} + 2,64 \cdot 10^{-5} + 1 \cdot 10^{-4} + 3,48 \cdot 10^{-5}$$
$$+ 9,7 \cdot 10^{-6} + 6,07 \cdot 10^{-5} = 2,875 \cdot 10^{-4}$$

d'où $K = 3480$ kcal/h.m². °C

b) Estimation des écarts de température correspondant aux diverses résistances thermiques s'opposant au passage de la chaleur du Na-K à l'eau.

La valeur moyenne de la densité de flux thermique rapporté à la surface A_0 est de :

$$\frac{230\ 000}{0,1326} = 1\ 735\ 000 \text{ kcal/h.m}^2$$

Les valeurs des résistances thermiques correspondantes sont indiquées dans l'équation (1) d'où, pour les diverses chutes de température, les valeurs suivantes :

- entre Na-K et paroi	=	$1,735 \cdot 10^6 \cdot 6,07 \cdot 10^{-5}$	=	105,5 °C
- dans le revêtement interne de nickel	=	$1,735 \cdot 10^6 \cdot 9,7 \cdot 10^{-6}$	=	16,8 °C
- dans l'épaisseur du tube interne	=	$1,735 \cdot 10^6 \cdot 3,48 \cdot 10^{-5}$	=	58,2 °C
- dans la couche de mercure	=	$1,735 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-4}$	=	173,5 °C
- dans le deuxième tube acier	=	$1,735 \cdot 10^6 \cdot 2,64 \cdot 10^{-5}$	=	44,2 °C
- dans le revêtement externe de nickel	=	$1,735 \cdot 10^6 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6}$	=	13,05 °C
- entre paroi et eau distillée	=	$1,735 \cdot 10^6 \cdot 4,8 \cdot 10^{-5}$	=	80,5 °C
				491,75 °C

Cette chute globale peut être réduite si l'on substitue du Na-K au mercure entre les deux tubes, l'écart de température correspondant n'étant plus que :

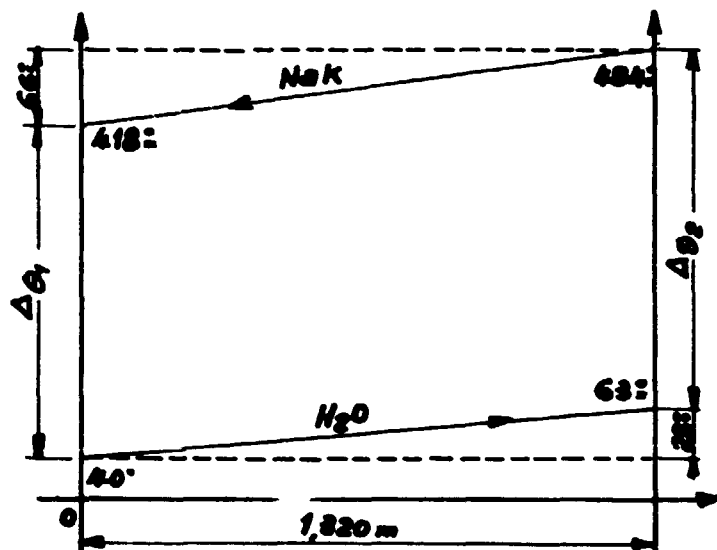
$$1,735 \cdot 10^6 \cdot \frac{10^{-3} \cdot 1,1}{23,2} = 82,5 \text{ °C}$$

et l'écart entre Na-K et eau devenant :

$$105,5 + 16,8 + 58,2 + 82,5 + 44,2 + 13,05 + 80,5 = 400,75 \text{ °C}$$

Si l'on ne veut pas surchauffer le tube intérieur en acier doux, on devra substituer du Na-K au mercure.

c) Température d'entrée et de sortie du Na-K (avec Na-K comme fluide intermédiaire) (voir fig. 7).



- Fig. 7 -

La différence moyenne logarithmique de température $\Delta\theta_m$ est égale à 401 °C environ, d'où, par définition de $\Delta\theta_m$

$$\frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{2,3 \log \frac{\Delta\theta_2}{\Delta\theta_1}} = 401 \quad (2)$$

et d'après la figure (7) :

$$\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1 = 65,5 - 22,8 = 42,7 \text{ °C} \quad (3)$$

En combinant les équations (2) et (3) il vient :

$$\log \frac{\Delta\theta_2}{\Delta\theta_1} = \frac{42,7}{2,2 \cdot 401} = 0,0465$$

d'où : $\Delta\theta_2 = 1,113 \Delta\theta_1$

et d'après (3) : $0,113 \cdot \Delta\theta_1 = 42,7 \text{ °C}$

d'où : $\Delta\theta_1 = 42,7 : 0,113 = 378 \text{ °C}$

et la température de sortie du Na-K sera : $378 + 40 = 418 \text{ °C}$

alors que la température d'entrée est de : $418 + 65,5 = 483,5 \text{ }^\circ\text{C}$
(en utilisant le mercure comme fluide intermédiaire, le point chaud serait à : $564,5 \text{ }^\circ\text{C}$).

Une répartition typique de température vers le milieu du barreau est donnée par la figure (8)

- température du Na-K ; $\frac{484 + 418}{2} = 451 \text{ }^\circ\text{C}$

- température de surface côté Na-K : $346 \text{ }^\circ\text{C}$

- température de surface côté eau : $131 \text{ }^\circ\text{C}$

Cette température montre que l'on doit s'attendre à observer de l'ébullition locale, la température moyenne de l'eau étant de $51 \text{ }^\circ\text{C}$ environ dans la section considérée.

Les calculs précédents négligent toute résistance thermique entre mercure et paroi (c'est-à-dire supposent les tubes parfaitement propres et mouillés par le liquide), condition mieux remplie par le Na-K que par le mercure.

2) Calcul de la contrainte thermique maximum -

D'après les écarts de température précédemment calculés, le tube soumis à la contrainte thermique maximum sera le tube en acier doux intérieur $\varnothing 26 \times 28$, la différence de température entre ses deux faces étant de $58,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

La température maximum de ce tube est de :
 $473,5 \text{ }^\circ\text{C} - 105,5 - 16,8 = 351 \text{ }^\circ\text{C}$ dans le cas où le fluide intermédiaire est du Na-K,

et de :
 $564,5 - 105,5 - 16,8 = 442 \text{ }^\circ\text{C}$ dans le cas d'emploi de mercure.

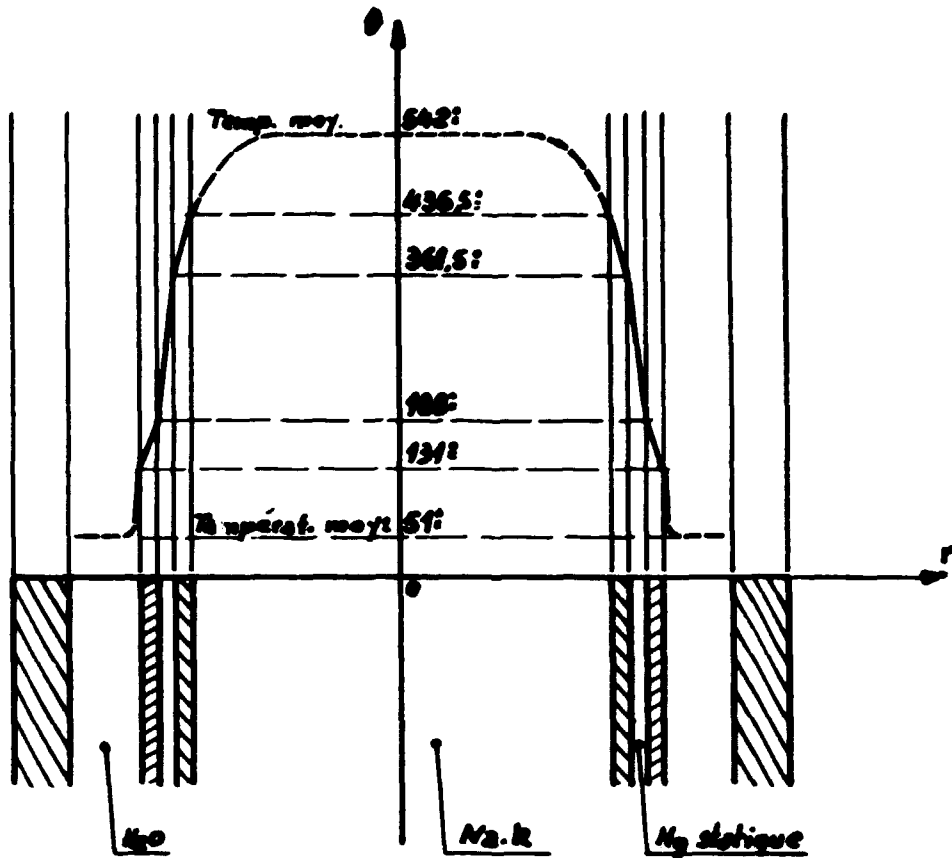
Nous ferons les calculs relatifs à ce dernier cas qui est le plus sévère.

Vers $450 \text{ }^\circ\text{C}$, pour l'acier doux, le module de YOUNG, E, prend la valeur $15\,400 \text{ kg/mm}^2$, et le module d'élasticité transversale $G = 6\,200 \text{ kg/mm}^2$. Il en résulte, pour le coefficient de POISSON, la valeur :

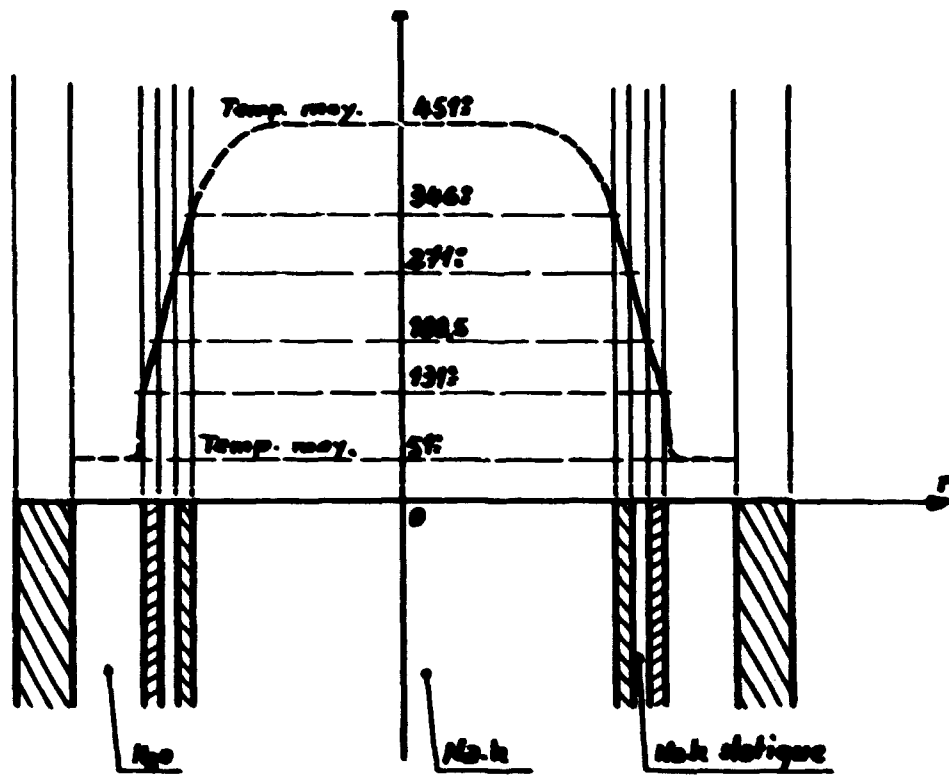
$$\sigma = \frac{15\,400}{2 \cdot 6200} - 1 = 0,24 \text{ (formule classique)}$$

Le tube étant mince, la contrainte thermique maximum s'exprime par :

$$S = E \frac{\alpha \Delta \theta}{2(1-\sigma)}$$



- Fig. 8 -



- Fig. 8' -

étant le coefficient de dilatation de l'acier, soit $12.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, d'où :

$$S = 15\,400 \frac{12.10^{-6} \cdot 58,2}{2(1-0,24)} \approx 8 \text{ kg/mm}^2$$

Cette valeur est acceptable, même à 450 °C, pour un service temporaire.

3) Estimation des pertes de charge dans la boucle à Na-K -

Cette estimation a été faite de façon classique, compte-tenu du nombre de REYNOLDS et des diverses pertes de charge singulières, dans le cas d'utilisation de l'une ou l'autre des deux pompes (les circuits ne sont pas équivalents car la pompe mécanique est montée en by-pass sur la conduite principale).

La figure (9) indique, pour divers débits de Na-K, les pertes de charge correspondantes de l'installation, ainsi que la caractéristique de la pompe mécanique. On voit qu'il y aura lieu d'ajuster le débit à l'aide de la vanne du by-pass.

IV - CONCLUSION -

L'installation a subi avec succès ses premiers essais qui ont permis de constater que la densité de flux thermique de 200 W/cm^2 s'obtient en portant la température maximum de l'alliage sodium-potassium à 550 °C, le fluide intermédiaire du barreau-échangeur étant du mercure.

Les résultats des mesures effectuées sur cette installation feront l'objet d'un rapport ultérieur.

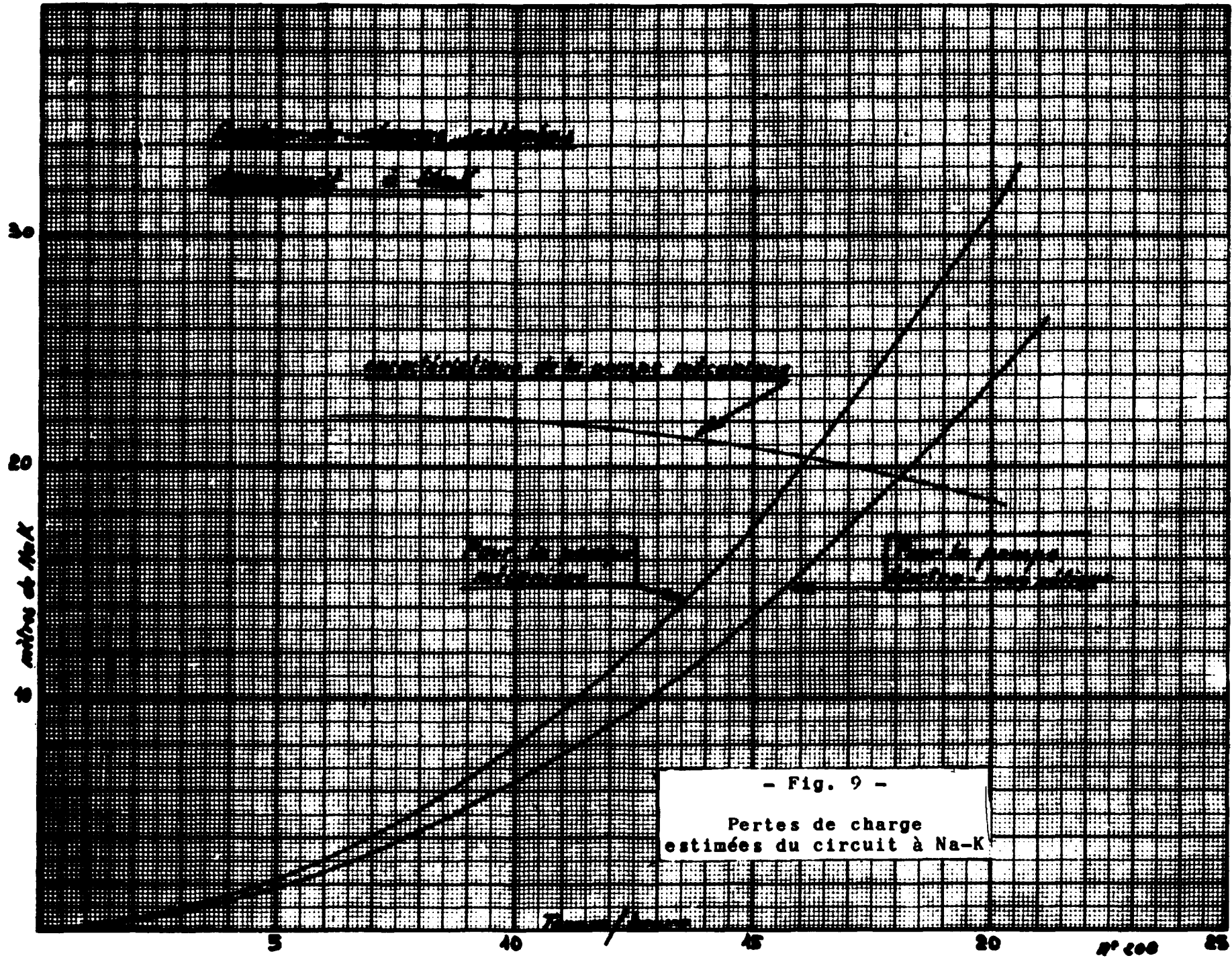


TABLE DES MATIERES

	Pages
I - OBJET DE LA RECHERCHE ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL -	
1) Introduction	1
2) Echangeur utilisé	1
3) Mesures de températures prévues	3
II - DISPOSITION GENERALE DE L'INSTALLATION -	
1) La boucle à Na-K	3
2) La boucle à eau distillée	6
3) Dispositifs électriques divers	7
III - CALCULS -	
1) Calcul thermique du barreau échangeur	11
2) Calcul de la contrainte thermique maximum	16
3) Estimation des pertes de charge dans la boucle à Na-K ...	18
IV - CONCLUSION -	18

FIN