

CEA-R 3395 - GIRAUD Bernard

LA PURIFICATION DU SODIUM A RAPSODIE

Sommaire. - Ce rapport fait partie d'une série de publications présentant l'essentiel des résultats des essais effectués à l'occasion du démarrage du premier réacteur français à neutrons rapides : RAPSODIE.

Cet article expose les techniques de la purification du sodium utilisé dans les circuits de refroidissement du réacteur tant au point de vue de leur réalisation technologique, que des résultats obtenus pendant la première année de fonctionnement.

1968

65 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

CEA-R 3395 - GIRAUD Bernard

SODIUM PURIFICATION IN RAPSODIE

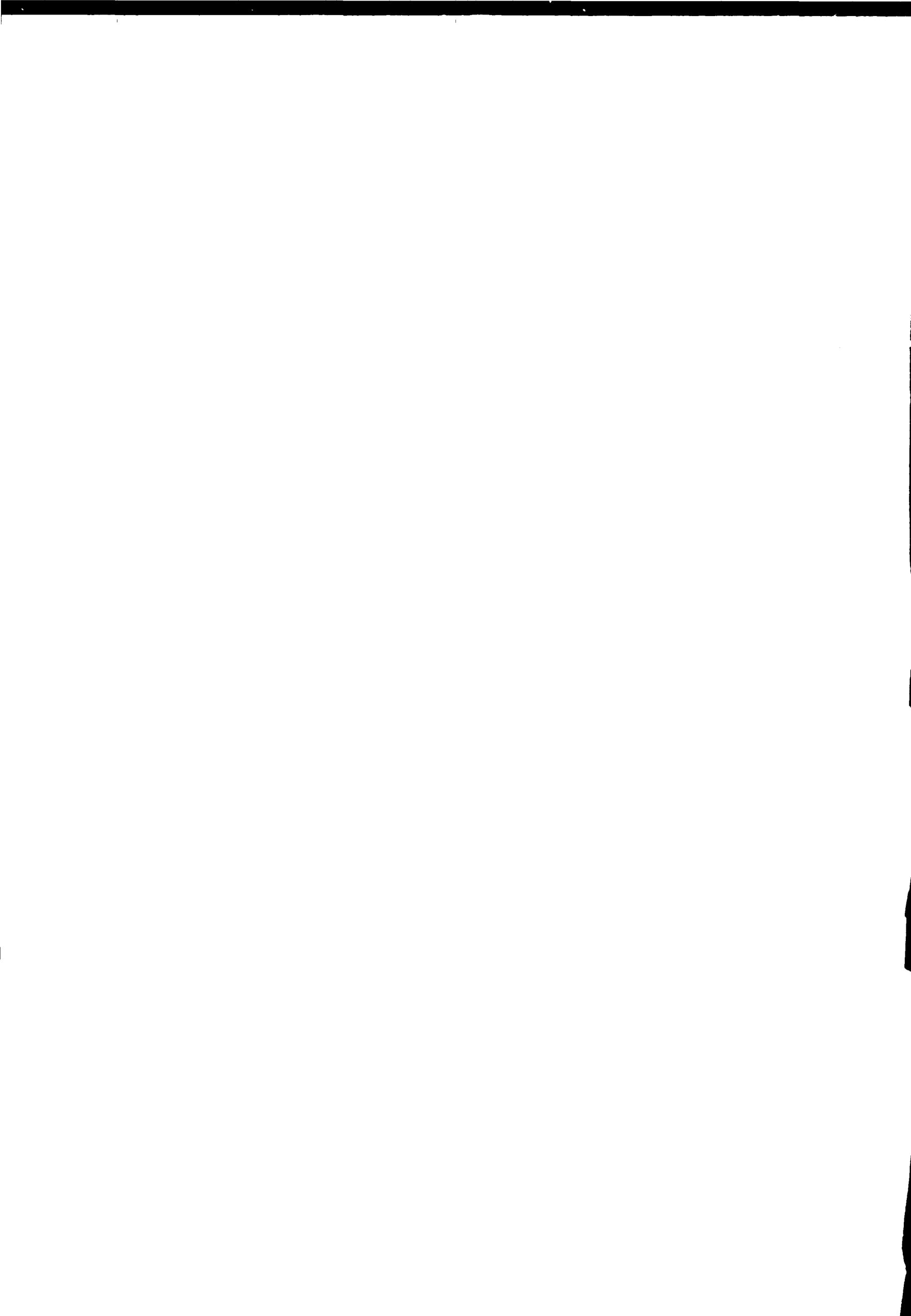
Summary. - This report is one of a series of publications presenting the main results of tests carried out during the start-up of the first french fast neutron reactor : RAPSODIE.

The article presents the sodium purification techniques used in the reactor cooling circuits both from the constructional point of view and with respect to results obtained during the first years working.

1968

65 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France



PREMIER MINISTRE

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

LA PURIFICATION DU SODIUM

A RAPSODIE

*par*

*Bernard GIRAUD*

DIRECTION DES PILES ATOMIQUES

Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache

Rapport CEA - R - 3395

A partir de 1968, les rapports CEA sont classés selon les catégories qui figurent dans le plan de classification ci-dessous et peuvent être obtenus soit en collections complètes, soit en collections partielles d'après ces catégories.

Ceux de nos correspondants qui reçoivent systématiquement nos rapports à titre d'échange, et qui sont intéressés par cette diffusion sélective, sont priés de se reporter à la lettre circulaire CENS/DOC/67/4690 du 20 décembre 1967 que nous leur avons adressée, et qui précise les conditions de diffusion.

A cette occasion nous rappelons que les rapports CEA sont également vendus au numéro par la Direction de la Documentation Française, 31, quai Voltaire, Paris 7e.

#### PLAN DE CLASSIFICATION

- |   |   |
|---|---|
| 1. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES ISOTOPES ET DES RAYONNEMENTS  | 8. PHYSIQUE   |
|   | 8.1 Accélérateurs   |
|   | 8.2 Electricité, électronique, détection des rayonnements             |
|   | 8.3 Physique des plasmas  |
|   | 8.4 Physique des états condensés de la matière                        |
|   | 8.5 Physique corpusculaire à haute énergie                            |
|   | 8.6 Physique nucléaire  |
|   | 8.7 Electronique quantique, lasers                                    |
| 2. BIOLOGIE ET MEDECINE   | 9. PHYSIQUE THEORIQUE ET MATHEMATIQUES                                |
| 2.1 Biologie générale   |   |
| 2.2 Indicateurs nucléaires en biologie                          |   |
| 2.3 Médecine du travail   |   |
| 2.4 Radiobiologie et Radioagronomie                             |   |
| 2.5 Utilisation des techniques nucléaires en médecine           |   |
| 3. CHIMIE   | 10. PROTECTION ET CONTROLE DES RAYONNEMENTS. TRAITEMENT DES EFFLUENTS |
| 3.1 Chimie générale   |   |
| 3.2 Chimie analytique   |   |
| 3.3 Procédés de séparation                                      |   |
| 3.4 Radiochimie   |   |
| 4. ETUDES DU DOMAINE DE L'ESPACE                                | 10.1 Protection sanitaire   |
|   | 10.2 Contrôle des rayonnements  |
|   | 10.3 Traitement des effluents   |
| 5. GEOPHYSIQUE, GEOLOGIE, MINERALOGIE ET METEOROLOGIE           | 11. SEPARATION DES ISOTOPES   |
| 6. METAUX, CERAMIQUES ET AUTRES MATERIAUX                       | 12. TECHNIQUES  |
| 6.1 Fabrication, propriétés et structure des matériaux          | 12.1 Mécanique des fluides - Techniques du vide                       |
| 6.2 Effets des rayonnements sur les matériaux                   | 12.2 Techniques des températures extrêmes                             |
| 6.3 Corrosion   | 12.3 Mécanique et outillage   |
| 7. NEUTRONIQUE, PHYSIQUE ET TECHNOLOGIE DES REACTEURS           | 13. UTILISATION ET DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE ATOMIQUE                |
| 7.1 Neutronique et physique des réacteurs                       | 13.1 Centres d'études nucléaires, laboratoires et usines              |
| 7.2 Refroidissement, protection, contrôle et sécurité           | 13.2 Etudes économiques, programme                                    |
| 7.3 Matériaux de structure et éléments classiques des réacteurs | 13.3 Divers (documentation, administration, législation, etc...)      |

*Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 31, quai Voltaire, PARIS VIIème.*

*The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 31, quai Voltaire, PARIS VIIème.*

**- Rapport CEA - R 3395 -**

**Centre d'Études Nucléaires de Cadarache  
Département de Recherche Physique  
Section Conduite de Rapsodie**

**LA PURIFICATION DU SODIUM A RAPSODIE**

par

Bernard GIRAUD

**- FEVRIER 1968 -**

## AVANT-PROPOS

Depuis le premier remplissage en sodium des circuits secondaires de RAPSODIE (Avril et Mai 1966), les problèmes posés par la purification du sodium ont été résolus sans difficulté majeure grâce à l'expérience acquise lors du fonctionnement des circuits prototypes de RAPSODIE, à la station d'essais HR1 de CADARACHE.

A cette station d'essais, puis au cours du démarrage de RAPSODIE, les personnes suivantes ont particulièrement étudié les problèmes de purification du sodium :

MM. J.P. DELISLE  
et N. LIONS

Ingénieurs au Département de Recherche Physique.

Ce rapport fait partie d'une série de publications<sup>(1)</sup>.

(1) Rapports déjà parus : "Masse critique, valeur des barres et coefficients de réactivité de RAPSODIE"  
L. STEVENS, J. GOURDON - CEA-R-3354  
"Le démarrage de RAPSODIE" R. PONTIER - CEA-R-3406  
"Mesures neutroniques dans le coeur et les couvertures de RAPSODIE"  
J. GOURDON, J.C. EDELINE - CEA-R-3416

## TABLE DES MATIERES

	Pages
RESUME	
AVANT-PROPOS	
I - DESCRIPTION GENERALE DE RAPSODIE	3
II - PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU SODIUM	13
III - PRINCIPES GENERAUX DE LA PURIFICATION DU SODIUM	17
IV - PRINCIPES GENERAUX DE LA MESURE DE LA PURETE DU SODIUM	19
V - TECHNOLOGIE DES CIRCUITS DE PURIFICATION A RAPSODIE	20
VI - LES REGULATIONS DES PIEGES FROIDS ET INDICATEURS DE BOUCHAGE	37
VII - EXEMPLES D'ENREGISTREMENTS DE TEMPERATURES DE BOUCHAGE	44
VIII - EXPERIENCE DE LA PURIFICATION DU SODIUM	52
IX - CONCLUSION	56
BIBLIOGRAPHIE	57

## I - DESCRIPTION GENERALE DE RAPSODIE

RAPSODIE est un réacteur à neutrons rapides d'une puissance de 20 MW thermiques, refroidi au sodium. Son combustible oxyde et ses performances en font avant tout un réacteur d'irradiation.

Construit dans le cadre de l'association conclue entre EURATOM et le COMMISSARIAT à l'ENERGIE ATOMIQUE pour l'étude et le développement des réacteurs à neutrons rapides, RAPSODIE est implanté sur le Centre d'Etudes Nucléaires de CADARACHE, dans le Sud-Est de la FRANCE, au confluent de la DURANCE et du VEKDON (figure 1).

Le réacteur a divergé le 28 Janvier 1967 et atteint pour la 1ère fois sa puissance nominale le 17 Mars 1967.

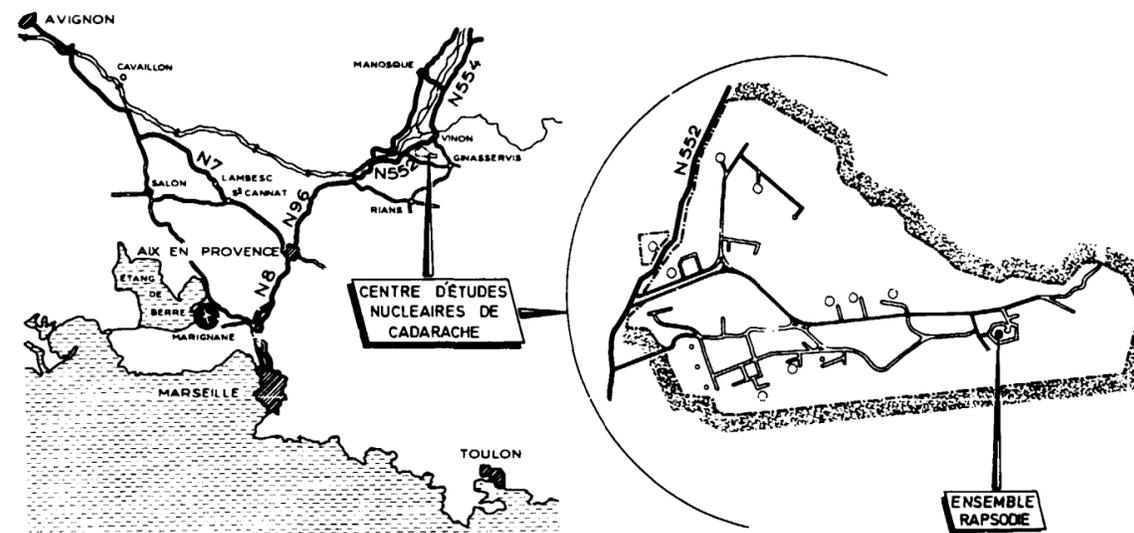


Figure 1 : Plan de situation du CEN/CADARACHE

## LA MISSION

Le principal objectif fixé à RAPSODIE est de procurer, le plus tôt possible, une connaissance suffisante du comportement des combustibles envisagés pour les réacteurs de la Filière à Neutrons Rapides. Cette connaissance sera recherchée, en premier lieu, dans l'expérience statistique qu'apportera l'irradiation du propre coeur du réacteur jusqu'à des taux pouvant atteindre 30 000 à 50 000 MWj/T.

En outre, l'expérience acquise au cours de la construction, des essais et de l'exploitation du réacteur, sera directement utilisable pour la conception des réacteurs futurs.

## LE MATERIAU

Le matériau combustible de la première charge de RAPSODIE est un oxyde mixte d'Uranium et de Plutonium comportant 25 % de  $\text{PuO}_2$  et 75 % d' $\text{UO}_2$ . Il représente l'une des solutions jugées susceptibles, actuellement, de répondre aux exigences de la Filière dans le domaine essentiel de la tenue du combustible à des taux d'irradiation élevés sous de fortes densités de puissance. Bien entendu, les dimensions réduites du coeur ont nécessité l'utilisation d'Uranium partiellement enrichi (60 % en  $^{235}\text{U}$ ).

Les couvertures sont constituées d' $\text{UC}_2$  non enrichi.

Enfin, le matériau réflecteur est de l'acier.

## LE COEUR ET LES COUVERTURES

Les matériaux fissiles et fertiles sont contenus dans des aiguilles d'acier inoxydable disposées en faisceaux dans des assemblages extérieurement identiques (figure 2).

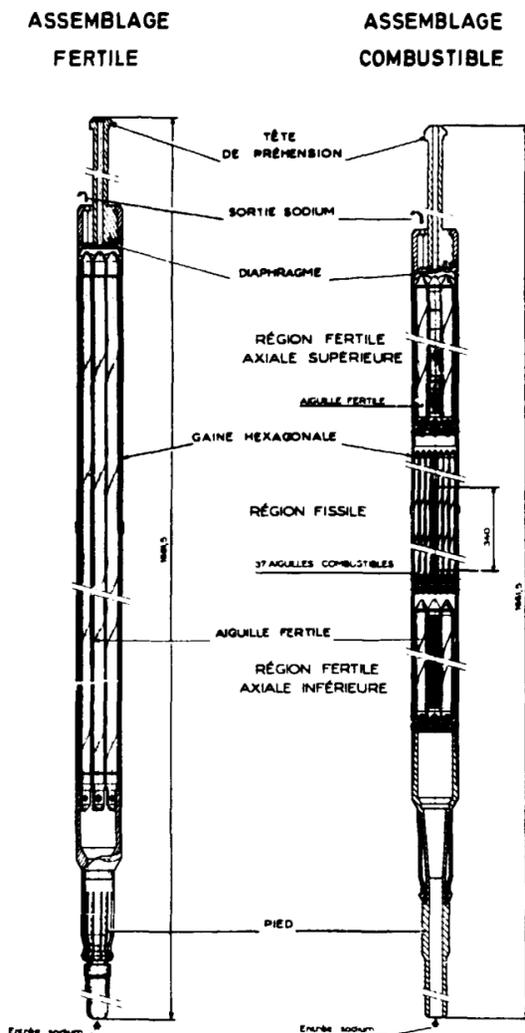
Les barreaux d'acier du réflecteur sont également de même géométrie.

L'ensemble du coeur, des couvertures et du réflecteur, obtenu par la juxtaposition des divers assemblages, se présente sous la forme d'un cylindre à

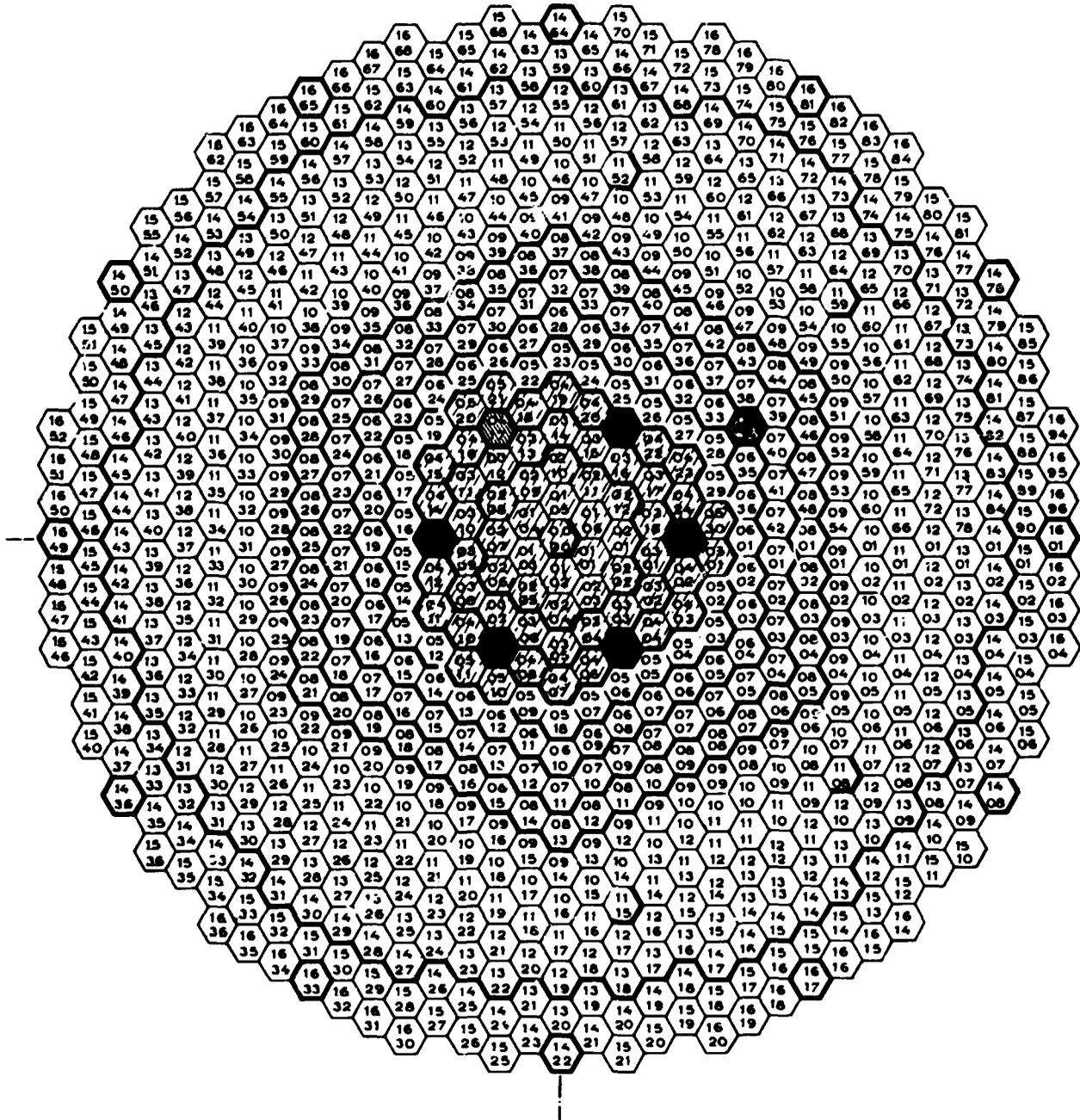
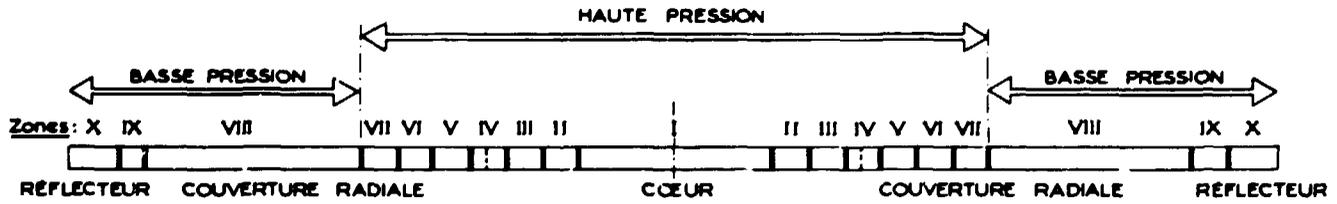
à axe vertical dont le plan est donné sur la figure 3.

Un courant de sodium traverse les assemblages de bas en haut, circule dans les espaces séparant les aiguilles, et en assure le refroidissement.

Les débits dans les différents assemblages, sont adaptés aux puissances dissipées grâce à la disposition en deux zones de pression de l'alimentation en sodium et à l'existence de diaphragmes dans les assemblages.



- Figure 2 - Assemblages fissiles et fertiles



- Barre sécurité
  - Emplacement de stockage périphérique
  - Emplacements instrumentables
- Source
  - Barre de pilotage

- Figure 3 - Plan du coeur

## LE BLOC PILE

Une cuve cylindrique, en acier inoxydable, contient les assemblages, supportés par un sommier, ainsi que les écrans de protection neutronique et thermique.

Elle est suspendue par sa partie haute à l'intérieur d'un massif de béton constituant la protection latérale et inférieure du réacteur, et qui joue le rôle d'enveloppe résistante en cas d'excursion de puissance à allure explosive.

Sa partie supérieure est fermée par un ensemble de bouchons tournants à travers lesquels s'effectue la manutention des assemblages, la manoeuvre des barres de contrôle, et la mesure des températures du sodium à la sortie des assemblages les plus chargés. Ces bouchons constituent en outre la protection supérieure du réacteur (voir figure 4).

## LES CIRCUITS

La cuve reçoit le sodium par sa base et le restitue, par deux orifices latéraux diamétralement opposés, à deux circuits primaires qui maintiennent confinée la circulation du sodium actif.

Un circuit secondaire dans lequel circule du sodium non actif est couplé à chacun des circuits primaires par un échangeur intermédiaire. L'énergie ainsi transférée à chaque circuit secondaire est évacuée à l'air atmosphérique par un échangeur terminal sodium-air.

La circulation du sodium dans ces deux boucles de refroidissement est actionnée, dans chacun des circuits primaires et secondaires, par une pompe mécanique centrifuge.

Autour du Bloc Pile et des boucles de refroidissement du coeur, s'articulent un certain nombre de circuits auxiliaires dont l'existence tient à des nécessités d'ordres divers : purification continue du sodium, couverture d'argon des niveaux libres de la cuve et des appareils des circuits, préchauffage et refroidissement de secours de la cuve et des circuits, refroidissement des protections du réacteur, refroidissement des emplacements de stockage et d'examen des assemblages actifs, maintien de certaines étanchéités, détection de ruptures de gaines, etc...

## LÉGENDE

### REPÈRE

- ① E5 - Cuve d'étanchéité
- ② E6 - Dispositif de mesures stéréotopographiques
- ③ B4 F4 Tuyauteries principales d'entrée et sortie sud
- ④ A4 - Tuyauterie d'alimentation azote d'intercuve II
- ⑤ G4 - Tuyauterie de DRG sud
- ⑥ E5 - Enveloppe de préchauffage
- ⑦ C4 - Distributeur d'azote
- ⑧ C6 - Clavelage de l'enveloppe préchauffage
- ⑨ E4 - Ecrans thermiques
- ⑩ A4 - Tuyauterie de remplissage et de vidange
- ⑪ C4 - Casse-siphon
- ⑫ E4 - Tuyauterie d'injection de secours
- ⑬ D6 - Sommier
- ⑭ D5 - Écrans neutroniques
- ⑮ D6 - Diffuseur
- ⑯ D7 - Diaphragmes annulaires
- ⑰ F6 - Cuve de sécurité

### REPÈRE

- ⑱ G7 - Enveloppe extérieure
- ⑲ C2 - Pont thermique
- ⑳ E3 - Grand Bouchon Tournant
- ㉑ D3 - Petit Bouchon Tournant
- ㉒ D2 - Bouchon de Contrôle
- ㉓ B1 - Plaque support des BT et de la cuve d'étanchéité
- ㉔ B2 - Plaque de repos
- ㉕ E1 - Joints liquéfiables
- ㉖ E1 - Joints à lèvres
- ㉗ D5 - Assemblage fissile
- ㉘ E5 - Assemblage fertile
- ㉙ D5 - Barre de contrôle
- ㉚ F4 - Couvercle cœur
- ㉛ D3 - Tube de commande du mécanisme de barre de contrôle
- ㉜ D1 - Carter des mécanismes
- ㉝ D4 - Canal de manutention

### FLUIDES

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>⑳ - Argon de couverture</li> <li>㉞ - Argon interjoints</li> <li>㉟ - Azote de préchauffage</li> <li>㊱ - Azote de l'intercuve I</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>㊲ - Azote de l'intercuve II</li> <li>㊳ - Azote de refroidissement des protections</li> <li>㊴ - Sodium</li> </ul> |
|---|---|

### BÉTONS



Béton ordinaire (d=2,3)



Béton lourd à la baryte (d=3,5)



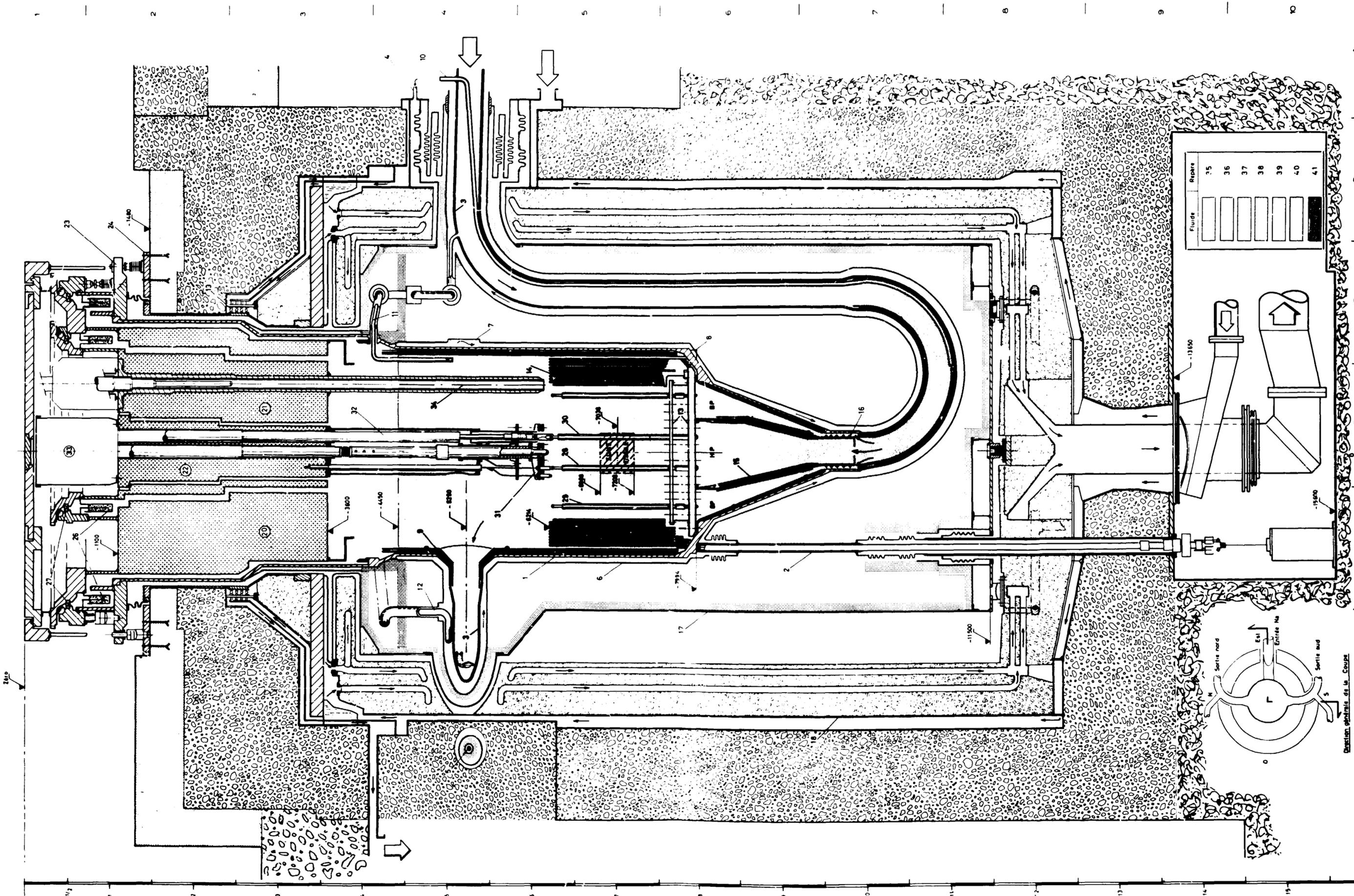
Béton ordinaire boré (d=2,8)



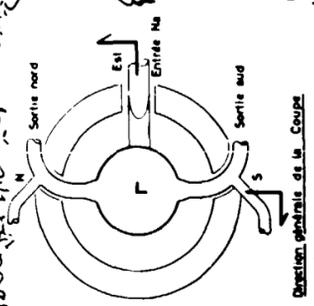
Béton aux riblons boré (d=5,4)



Béton aux terres rares (d=2,4)



Fluide						
Repare	35	36	37	38	39	40



- Figure 4 -

## LE CONTROLE DE LA REACTIVITE

Le contrôle de la réactivité du réacteur est obtenu au moyen de barres absorbantes, en  $B_4C$ , qui plongent dans le coeur. Ces barres de contrôle, au nombre de 6, sont manoeuvrées à l'aide de mécanismes traversant les bouchons de la cuve du réacteur. Cinq d'entre elles assurent la compensation des variations lentes de réactivité, une sixième permet le pilotage du réacteur.

L'arrêt de sécurité du réacteur est obtenu, selon le degré d'urgence de l'intervention,

- par la descente simultanée des barres de sécurité,
- par la chute accélérée de ces barres.

Ces actions de sécurité sont commandées soit manuellement par l'opérateur, soit automatiquement par un ensemble de circuits logiques qui analyse en permanence les paramètres essentiels de la sécurité du réacteur.

## LA MANUTENTION

Le chargement et le déchargement des éléments du coeur sont réalisés à partir d'un dispositif mobile extérieur à la cuve, la HOTTE PRIMAIRE, et des deux bouchons tournants occupant la partie supérieure de la cuve.

La rotation combinée de ces deux bouchons, excentrés l'un par rapport à l'autre, permet à la Hotte Primaire, au travers d'un canal lié au plus petit de ces bouchons, de se positionner et d'intervenir sur l'un quelconque des emplacements du coeur ou des couvertures. La Hotte Primaire assure en outre, le transport des éléments neufs ou irradiés entre la pile et les emplacements de stockage intermédiaire du BLOC DE TRANSFERT.

Le transport des éléments entre le Bloc de Transfert et les emplacement de stockage définitif du Bâtiment Actif est assuré par une HOTTE SECONDAIRE.

Enfin des HOTTES SPECIALES permettent la manipulation des dispositifs expérimentaux et des organes du réacteur dont la contamination réclame des précautions particulières.

## LA CONDUITE DE L'INSTALLATION

Le réacteur est conduit et surveillé depuis une salle de commande extérieure au réacteur, qui dispose en permanence des informations en provenance de l'installation.

Le réacteur est conduit par des opérateurs.

Seul, le maintien à un niveau de fonctionnement stable peut être assuré par un stabilisateur automatique de puissance.

La surveillance du réacteur bénéficie de l'assistance d'un système de Traitement Centralisé de Mesures et Signalisations (TCMS).

## LES BATIMENTS

Le Bloc-Pile, les circuits primaires, le Bloc de Transfert, les appareillages de purification du sodium et d'une manière plus générale les parties du réacteur qu'il est nécessaire d'isoler de l'extérieur, y compris dans les situations les plus graves, sont contenus dans une enceinte étanche capable de résister à la pression et à la température engendrées par un feu de sodium. Cette enceinte est conditionnée. Un système d'étagement des pressions entre les différentes zones de l'enceinte étanche garantit l'habitabilité des zones de travail.

Un Bâtiment Actif où s'opère le stockage des assemblages et la décontamination des matériels, un bâtiment des circuits thermiques qui renferme les circuits de sodium secondaires, et un bâtiment électro-mécanique où sont regroupés les moyens d'alimentation et de distribution d'énergie, complètent l'installation (voir figure 5).

## CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU REACTEUR

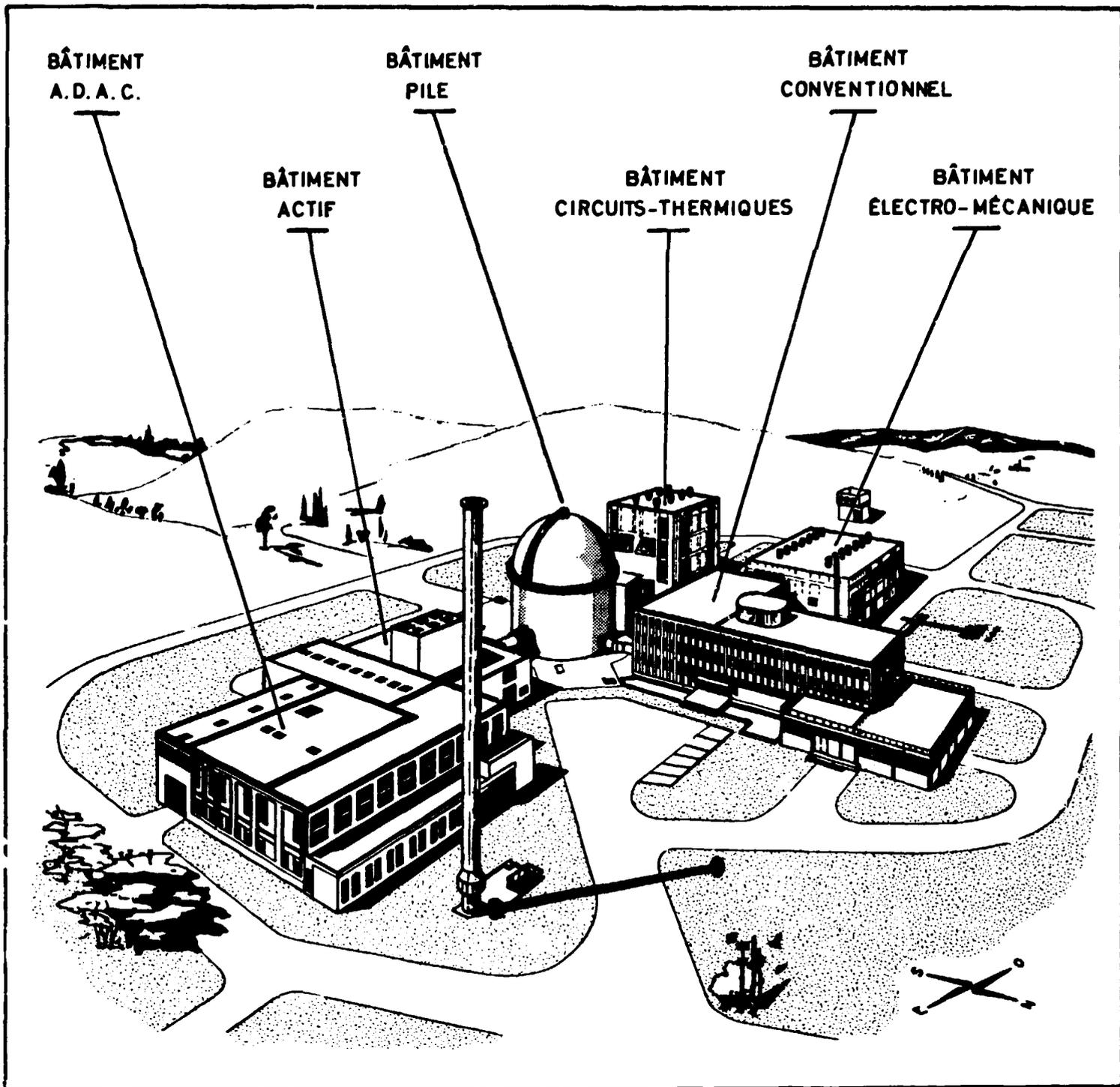
Le tableau suivant rassemble les principales caractéristiques nominales du réacteur.

Puissance thermique	20 MW
Nature du combustible	UO <sub>2</sub> - PUO <sub>2</sub>
Volume du coeur	50 litres
Débit de sodium (1)	628 Tonnes/heure
Température d'entrée (1)	410°C
Température moyenne de sortie (1)	500°C
Flux neutronique maximum	1,7 10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> /s
Densité de puissance maximum	535 kW/l
Température au point le plus chaud du combustible	1700°C
Température au point le plus chaud de la gaine	590°C
Taux d'irradiation maximum pour 100 jours de marche à 20 MW	10 000 MWj/T

Tableau 1 - Caractéristiques principales au point nominal initial

(1) En septembre 1967, le réacteur était exploité avec les valeurs suivantes :

- débit 680 t/h
- température d'entrée 425° C.
- température moyenne de sortie 510° C.



- Figure 5 - Implantation des Bâtiments

## II - PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU SODIUM

Avant d'aborder les problèmes liés à la purification du sodium, il est bon de rappeler l'essentiel des propriétés physiques et chimiques du sodium. Il deviendra alors plus aisé de comprendre l'emploi du sodium liquide comme fluide de refroidissement d'un réacteur rapide.

Corps simple, donc thermiquement stable, le sodium est capable de supporter des températures très élevées compatibles avec celles des cycles thermodynamiques des centrales thermiques modernes. (A RAPSODIE 425 - 510°C. - Température maximale sortie assemblage fissile le plus chargé : 560°C).

A la pression atmosphérique, il reste liquide de 98 à 883°C environ; sa faible pression de vapeur réduit le risque de cavitation des pompes alors même qu'il est utilisé sous basse pression (3 bars abs. au maximum à RAPSODIE) ce qui autorise la construction de tuyauteries et de capacités (réservoirs, pompes, échangeurs) avec des parois minces.

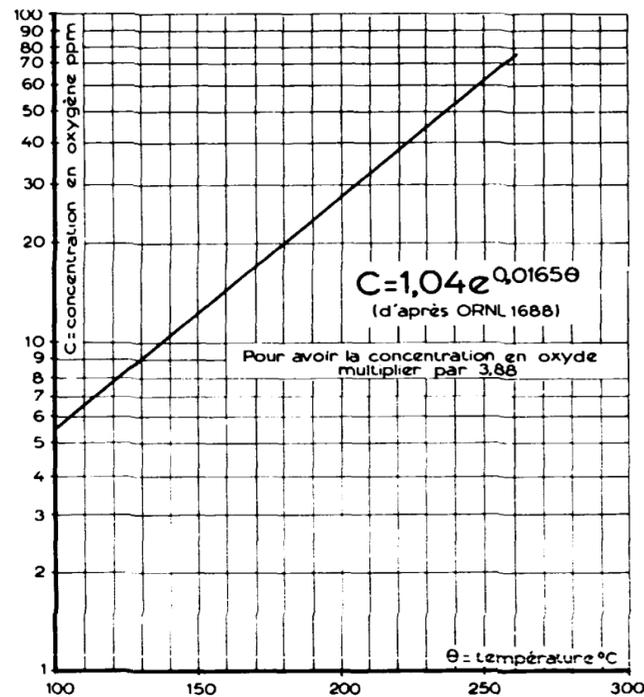
Comparée à celle de l'eau, la capacité calorifique du sodium liquide est assez faible (251 kcal/m<sup>3</sup>.°C. à 500°C); elle reste cependant élevée par rapport à celle des gaz ou de la vapeur d'eau. Sa conductivité thermique est excellente, de l'ordre de 80 fois celle de l'eau (52,2 kcal/h.m.°C. à 500°C); il en résulte que des flux de chaleur importants sont transmis avec de faibles écarts de température entre paroi et liquide. En contrepartie, il faut se prémunir contre le risque de chocs thermiques sur les matériaux de structure lors des régimes transitoires.

La masse spécifique et la viscosité du sodium sont faibles : (833 kg/m<sup>3</sup> et 0,243 centipoise à 500°C), valeurs qui laissent prévoir un pompage aisé et des pertes de charge raisonnables dans les circuits.

Corps simple, le sodium n'est pas décomposé par les divers rayonnements nucléaires.

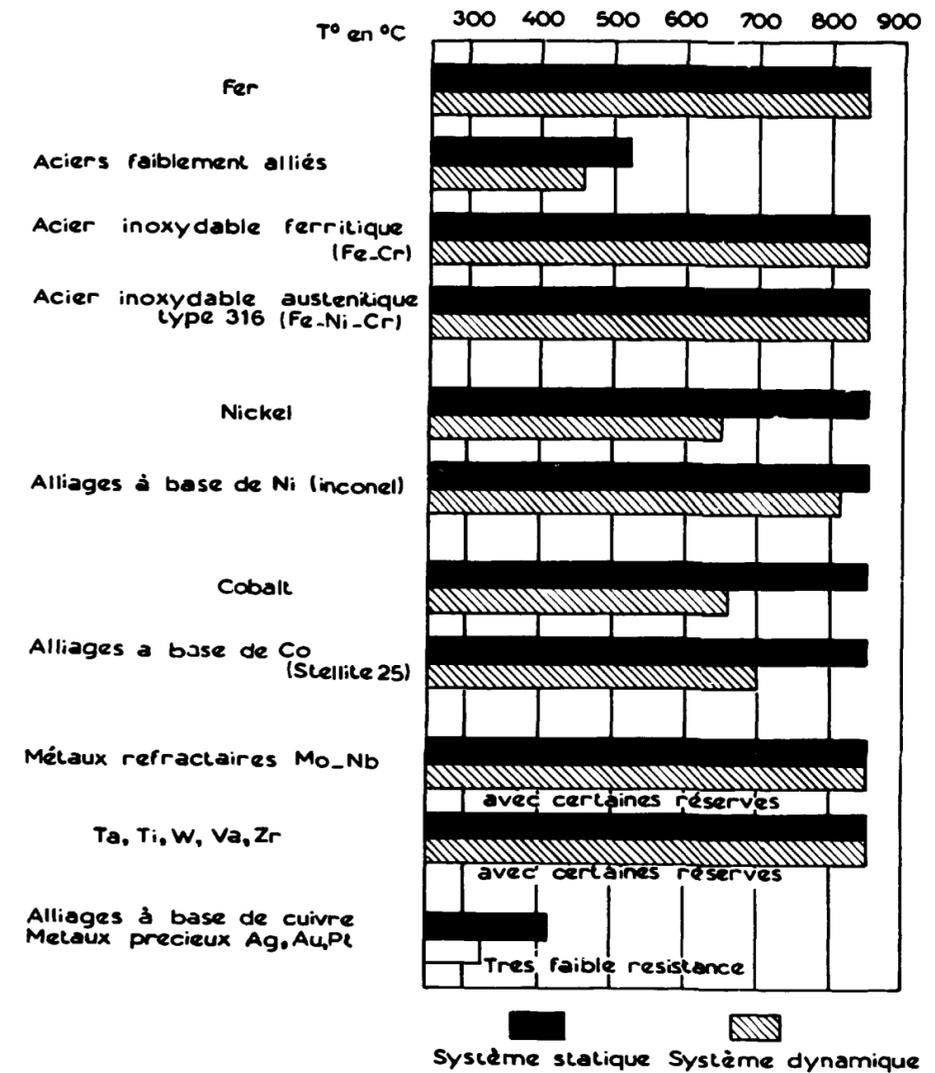
Aux neutrons rapides et intermédiaires, il ne présente qu'une faible section efficace de capture ; son pouvoir modérateur est faible : il dégrade peu le spectre d'énergie des neutrons. Cependant, il s'active rapidement jusqu'à saturation en traversant le coeur du réacteur, l'isotope  $^{24}\text{Na}$  émettant des rayonnements  $\beta$  et  $\gamma$  avec une période de 15 heures environ. L'isotope  $^{22}\text{Na}$  (émetteur  $\beta$  et  $\gamma$ ) est produit en quantité très faible par réaction  $(n, 2n)$  ; cependant il s'accumule progressivement dans les circuits en raison de sa période relativement grande : 2,6 ans.

Très avide d'oxygène, le sodium s'oxyde à l'air libre et réagit violemment avec l'eau. A l'état d'impureté dans les circuits, l'oxyde de sodium dont la solubilité augmente très vite avec la température (voir figure 6), doit être constamment maintenu à un faible taux : il s'agit d'éviter à la fois les effets de corrosion et les conséquences mécaniques et thermiques des dépôts d'oxyde.



- Figure 6 - Teneur du sodium saturé en oxyde

Le sodium exempt d'oxyde est très peu corrosif vis à vis des divers aciers inoxydables. Un grand nombre d'alliages sont susceptibles de le contenir jusqu'à 900°C (voir figure 7).



Resistance à la corrosion par le sodium de différents métaux et alliages

Ce diagramme indique la température au dessous de laquelle un système utilisé durant 1000 heures avec une attaque de la surface du métal inférieure à 0,13 mm.

- Figure 7 - Résistance à la corrosion par le sodium de différents métaux et alliages

A RAPSODIE, l'emploi exclusif de l'acier inoxydable austénitique Z 6 CND 18/12 (type 316 américain) comme matériau en contact avec le sodium autriciserait des teneurs maximales en oxygène de l'ordre de 50 ppm (température de saturation : 230°C)

Eléments	AFNOR 02.001 Acier Z 6 CND 18/12
C	0,04 à 0,07 %
Si	0,50 % maximum
Mn	1,4 à 2 %
S	0,025 % maximum
P	0,025 % maximum
Cr	16 à 18 %
Ni	12 à 14 %
Mo	2 à 2,5 %

Tableau 2 - Composition de l'acier 316

A RAPSODIE, il est utilisé 100 m<sup>3</sup> environ de sodium. Celui-ci, livré en "pureté nucléaire", présentait initialement les caractéristiques suivantes :

Teneur des impuretés en ppm

Calcium < 10	Bore < 5
Oxygène < 50	Lithium < 20
Soufre < 10	Argent < 20
Chlore < 18	Uranium < 5

Tableau 3 - Sodium "pureté nucléaire" livré à RAPSODIE

### III - PRINCIPES GENERAUX DE LA PURIFICATION DU SODIUM

Selon la pureté désirée pour le sodium des circuits, il est généralement fait usage de deux procédés principaux :

Procédé physique :

Nous avons indiqué par la figure 6, que la solubilité des oxydes dans le sodium décroît avec la température. Le procédé de purification physique est basé sur cette propriété.

Le sodium est refroidi dans une capacité du circuit. Il se produit alors dans sa masse une précipitation des oxydes de telle sorte que la concentration des oxydes restant en solution soit celle de la saturation à la température considérée. Le passage du sodium liquide dans un filtre permet de séparer les oxydes ayant précipité.

L'appareil permettant de refroidir et de filtrer le sodium est appelé "piège froid". Dans sa masse filtrante constituant le point froid du circuit sont concentrés les oxydes.

Ce procédé permet d'obtenir des concentrations minimales d'oxygène voisines de 10 ppm.

Pour abaisser encore cette teneur en oxygène, on doit alors avoir recours à un procédé chimique.

Procédé chimique :

Le sodium déjà purifié par les pièges froids (teneur 10 ppm en O<sup>2</sup> envi-

ron) est réchauffé à 650°C. Les oxydes qu'il contient sont alors réduits par un métal plus réducteur (copeaux de zirconium par exemple).

Seul le procédé physique par pièges froids est actuellement exploité dans l'installation "RAPSODIE".

#### IV . PRINCIPES GENERAUX DE LA MESURE DE LA PURETE DU SODIUM

Selon le degré de pureté du sodium, on a recours à deux procédés de mesure.

##### Procédé physique

Son principe est analogue à celui du piège froid et s'emploie pour des teneurs en oxygène supérieures à 10 ppm environ.

En abaissant progressivement la température du sodium, on cherche à boucher partiellement des orifices de faible section par des cristaux d'oxyde. Lorsque ce bouchage partiel est stabilisé (débit de sodium constant par les orifices), la température du sodium à cet endroit est celle correspondant à la saturation en oxyde, car il y a présence stable et simultanée d'oxyde en solution et précipité.

L'appareil permettant d'effectuer cette mesure de manière continue et automatique est "l'indicateur de bouchage".

##### Procédé électrique

Lorsque la teneur du sodium en oxygène devient inférieure à 10 ppm, la mesure par l'indicateur de bouchage devient imprécise, on recourt alors à une mesure de résistivité en prenant soin de mesurer simultanément la température du sodium.

Le "rhomètre" est l'appareil de mesure de la résistivité du sodium,

Ces deux types d'appareils sont installés à RAPSODIE, mais le "rhomètre" n'a pas encore été utilisé.

## V - TECHNOLOGIE DES CIRCUITS DE PURIFICATION A RAPSODIE

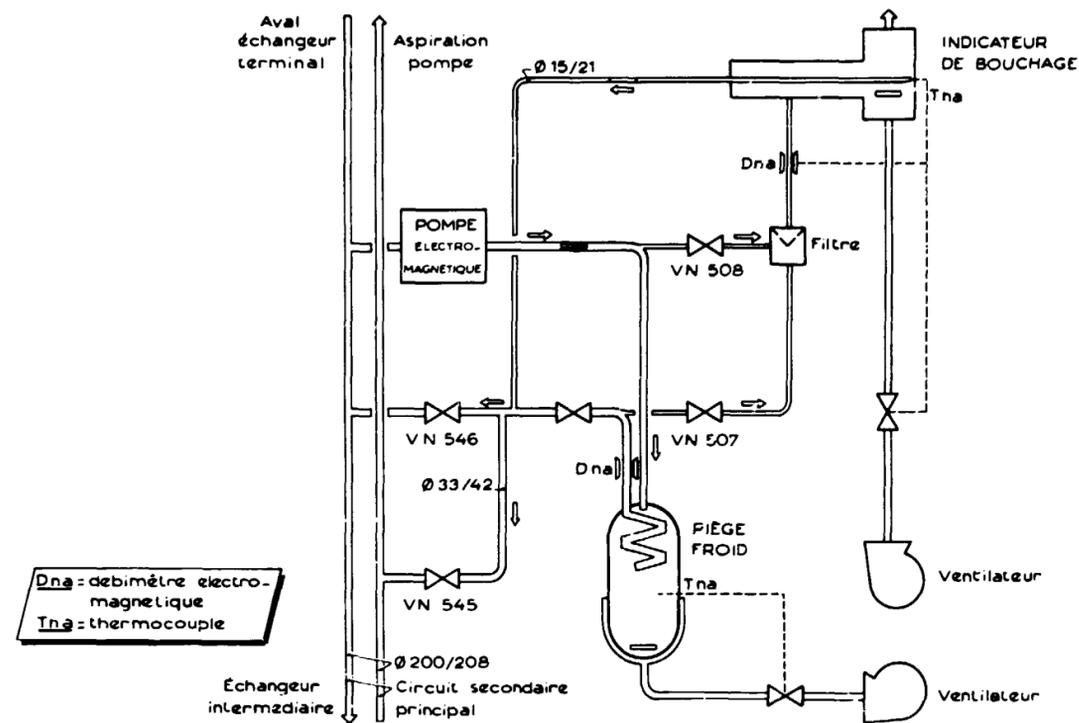
Pour donner une vue complète des circuits et appareils de purification en service à RAPSODIE, nous décrirons successivement la purification des circuits secondaires puis celle des circuits primaires.

### 5.1. Circuits secondaires

Rappelons tout d'abord que les 2 circuits secondaires évacuent la puissance thermique du réacteur chacun par un échangeur sodium-air de 10 MW. Ils reçoivent cette puissance par les échangeurs intermédiaires à partir du sodium primaire circulant dans le réacteur.

Les 2 circuits secondaires sont indépendants et comportent chacun un circuit de purification.

#### 5.1.1. Description d'un circuit de purification secondaire : voir figure 8



- Figure 8 - Schéma du circuit de purification secondaire

Le circuit de purification implanté dans le bâtiment thermique au plancher + 3 m, comprend les appareils suivants :

- Une pompe électromagnétique à courant alternatif.
- Un piège froid (voir figure 9)

Celui-ci comprend une cuve, contenant l'échangeur-économiseur, dans la partie supérieure, et le piège froid proprement dit, dans la partie inférieure. L'ensemble est préchauffé électriquement et calorifugé. Le sodium à purifier n'étant pas actif, les pièges secondaires ne sont pas munis d'enveloppe de sécurité, ni de protection contre les rayonnements gamma.

<u>Spécifications de calcul</u>	
<u>Sodium</u>	
Débit en fonctionnement normal	1000 kg/h
- <u>Fonction échangeur</u> :	
Température d'entrée sodium à purifier	550°C
Température de sortie sodium à purifier	160°C
Température d'entrée sodium purifié	130°C
Température de sortie sodium purifié	520°C
- <u>Fonction piège</u> :	
Température d'entrée	160°C
Température de sortie	130°C
<u>Air</u>	
Débit	4050 kg/h
Température d'entrée	30°C
Température de sortie	40°C

- Cuve

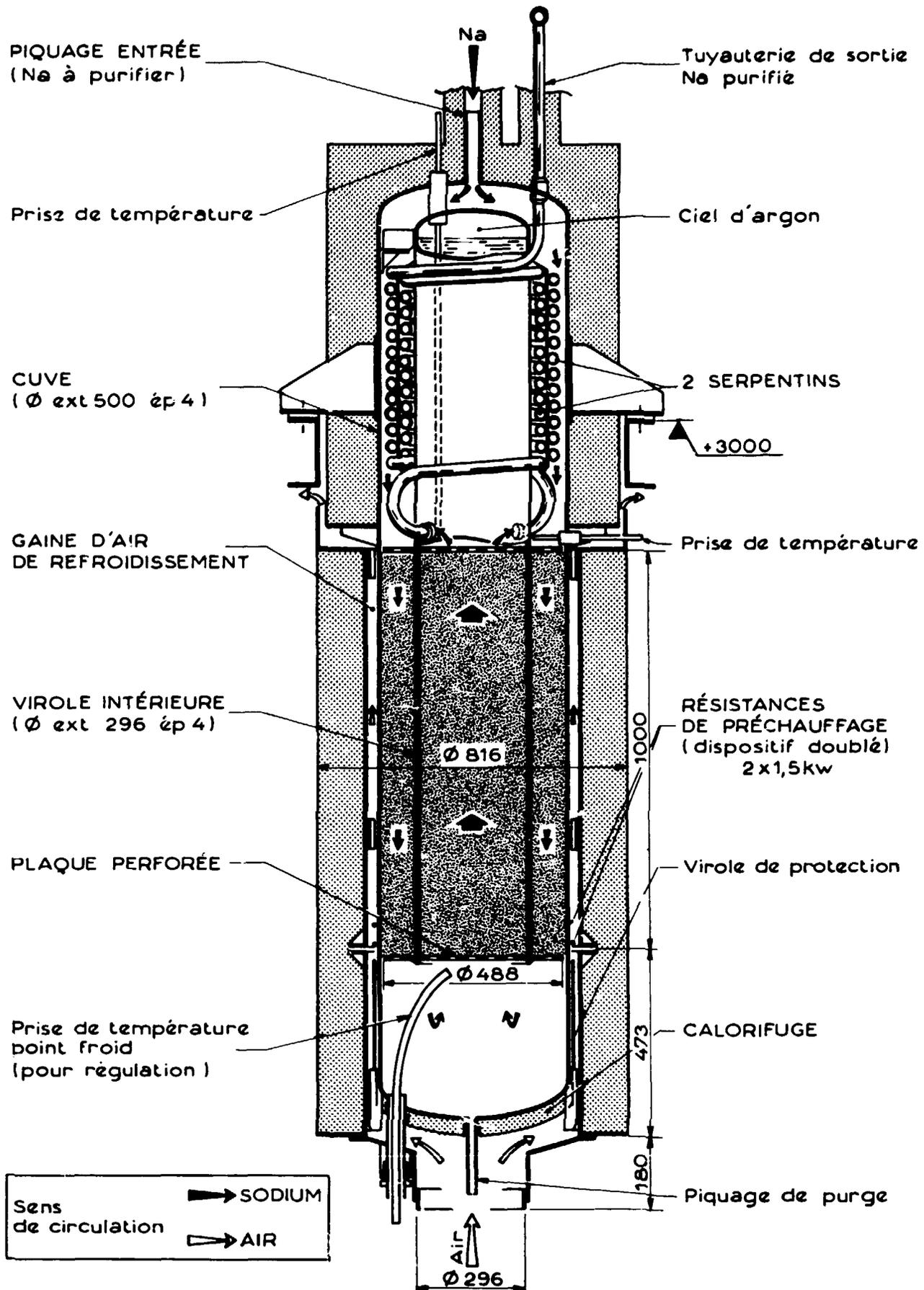
Elle est constituée par une virole en acier inoxydable austénitique, fermée par deux fonds bombés, et portant latéralement 4 supports qui permettent de fixer le piège froid sur la charpente métallique du circuit.

Elle contient une virole concentrique fermée par un fond bombé à l'extrémité supérieure, et fixée à ce niveau à la cuve par des plats et des consoles. Cette virole peut se dilater librement vers le bas. Elle est munie sur sa partie inférieure de 2 plaques perforées, définissant avec elle-même et la cuve, deux volumes annulaires le plus froid, situé à l'extérieur, est garni de laine d'acier inoxydable.

La cuve porte sur le fond supérieur un piètement recevant la tuyauterie d'entrée du sodium à purifier, 2 trous de passage des tuyauteries de sodium purifié et un tube en doigt de gant pour prise de température.

Le fond inférieur porte un piètement obturé, pour purge éventuelle.

-- La partie supérieure du piège froid réalise la fonction économiseur. L'échangeur économiseur se compose de 2 serpentins montés en parallèle, autour de la



- Figure 9 - Coupe d'un piège froid secondaire

virole intérieure, et surtout de la cuve par le fond supérieur. Ils sont réunis à l'extérieur du piège par une même tuyauterie.

4 supports soudés à la virole intérieure, et munis chacun de 2 attaches, maintiennent en position les serpentins.

- La partie inférieure du piège froid réalise la fonction piège.

Le refroidissement du sodium se fait par une circulation d'air dans une gaine en acier doux, entourant la cuve sur toute la hauteur correspondant au piège froid proprement dit. Cette gaine, fixée à la partie inférieure de la cuve, porte le piétement d'entrée d'air et une gouttière circulaire débouchant à l'air libre à sa partie supérieure.

Un groupe moto-ventilateur assure le soufflage d'air.

Débit à assurer ..... 5000 m<sup>3</sup>/h  
Différence de pression ..... 26 mbars.

L'air pénètre à la partie inférieure de la gaine, refroidit le piège de bas en haut, et sort latéralement par un dispositif à chicane situé à mi-hauteur du piège froid.

- Circulation du sodium

Le sodium à purifier entre à la partie supérieure de la cuve, et s'écoule le long des serpentins dans l'espace annulaire virole-cuve où sa température décroît; il pénètre ensuite dans l'espace annulaire extérieur, rempli de laine d'acier inoxydable où il est refroidi par l'air qui circule à contre-courant dans la gaine entourant la cuve. Il débouche alors dans le fond inférieur où se trouve le point froid du piège. Il remonte ensuite dans l'espace central rempli de laine d'acier qui retient l'oxyde, sort de la partie piège pour pénétrer dans les serpentins de l'échangeur-économiseur où il se réchauffe. Le sodium purifié sort par les serpentins à travers le fond supérieur de la cuve.

Le sodium peut s'établir en niveau libre au-dessus des plaques perforées dans la virole intérieure, sous une atmosphère d'argon emprisonnée.

- Préchauffage électrique

Il est assuré par une résistance électrique de 1500 W disposée sur la virole de la cuve. Le dispositif est doublé par mesure de sécurité.

c) Un filtre

constitué d'un cylindre de tissu métallique ( $\varnothing$  40 mm, hauteur 120 mm), fil de  $\varnothing$  0,24 au pas carré de 0,7 mm.

Ce tissu est appliqué par le sodium à filtrer sur un cylindre constitué d'une tôle perforée d'orifices carrés de 5 mm au pas de 8.

Le sodium à filtrer pénètre dans le filtre par l'une des 2 tuyauteries de  $\varnothing$  16/21 et sort par une tuyauterie identique située dans l'axe du cylindre filtrant.

Le filtre est calculé pour un débit de 200 kg/h à 540°C. Sa pression d'épreuve est de 11 bars.

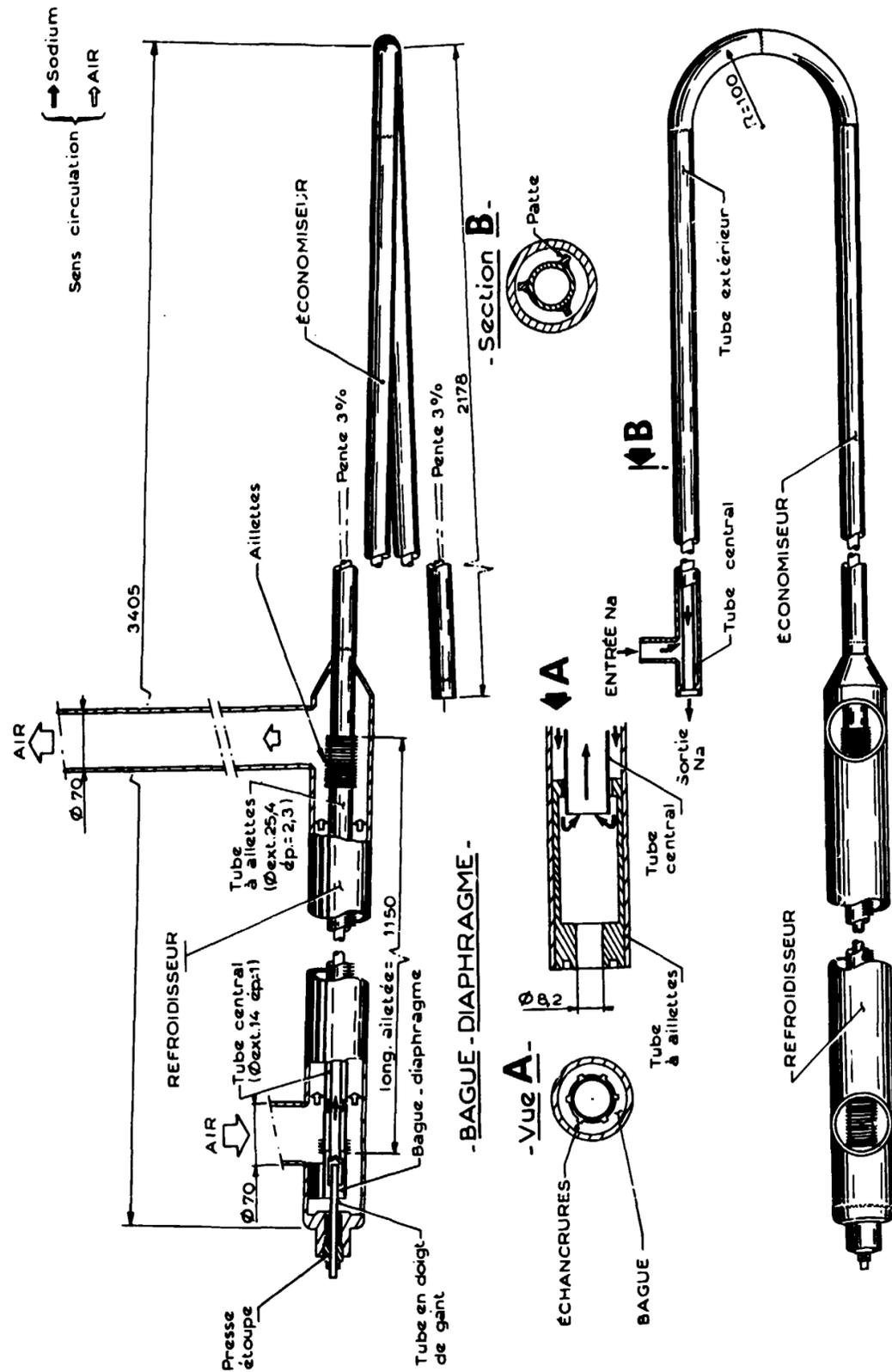
d) Indicateur de bouchage (voir figure 10)

Un refroidisseur est constitué d'un tube aileté parcouru extérieurement par un débit d'air et contenant la tuyauterie de retour. Le sodium ainsi refroidi dans cette chambre annulaire traverse les orifices de l'indicateur de bouchage (6 orifices de 2,25 mm<sup>2</sup> environ) et sort de l'appareil par un tube intérieur à celui du refroidisseur. Cette disposition de 2 tubes concentriques ( $\varnothing$  21/27 &  $\varnothing$  12/14) se poursuit sur une longueur de 4 m environ et constitue l'économiseur.

Le débit d'air de refroidissement est asservi au débit de sodium et à la température mesurée près des orifices.

Caractéristiques nominales de cet appareil

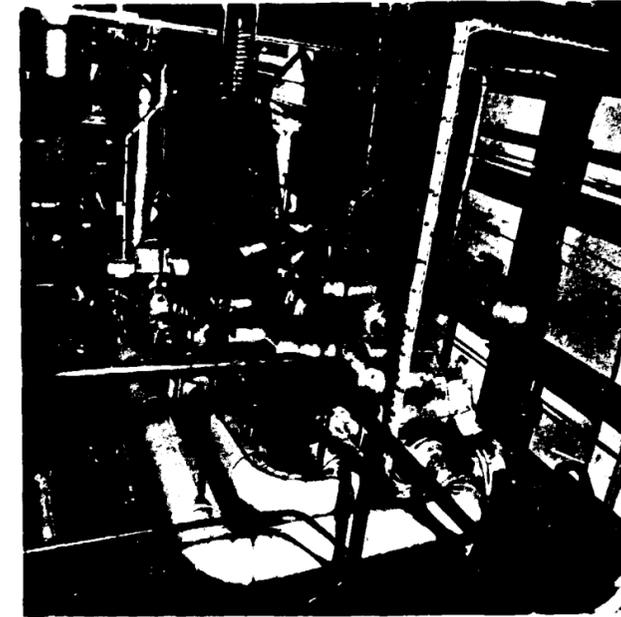
Débit	200 kg/h
Température entrée économiseur	540°C
Température sortie économiseur	512°C
Entrée indicateur de bouchage	188°C
Sortie indicateur de bouchage	160°C
Température minimale du point froid	110°C
Pression d'épreuve	11 bars
Débit air	200 kg/h
Température entrée air	30°C
Température sortie air	67°C



- Figure 10 - Indicateur de louchage

### 5.1.2. Fonctionnement du circuit de purification secondaire (voir figure 8)

La pompe de circulation électromagnétique du circuit de purification aspire le sodium à la sortie de l'échangeur terminal Na/air avec un débit de 1000 kg/h et le refoule dans le piège froid. Le débit de cette pompe est contrôlé par un débitmètre électromagnétique placé à la sortie du piège froid. Le diamètre des tuyauteries est de 33/42 mm.



- Figure 11 - Vue du circuit de purification secondaire sud

Le sodium purifié retourne dans le circuit principal par l'intermédiaire de la vanne manuelle VN 546.

La purification du sodium secondaire est donc possible en permanence grâce à la pompe électromagnétique. Cependant, en cas d'indisponibilité de cette pompe, la purification reste possible à plus faible débit en utilisant la différence de pression existant entre les tuyauteries d'amenée et de retour du sodium à l'échangeur intermédiaire Na-Na en fermant VN 546 et en ouvrant VN 545. Toutefois, dans ce cas, le débit de purification dépend de la perte de charge de l'échangeur Na-Na, c'est-à-dire du débit de la pompe secondaire principale.

L'alimentation de l'indicateur de bouchage par tuyauterie de 15/21 mm est prise en parallèle sur le piège froid. Par le jeu des vannes VN 507 et VN 508, il est possible d'alimenter l'indicateur de bouchage par l'intermédiaire

du filtre, en sodium purifié ou non, permettant de mesurer ainsi l'efficacité du piège froid.

## 5.2. Circuit primaire (voir figure 12)

Bien que les problèmes de purification proprement dite soient identiques pour le sodium primaire et le sodium secondaire, il est intéressant de mettre en évidence les différences de conception du circuit primaire et les appareils qui le composent. En effet, la structure du circuit primaire est dominée par les problèmes d'activité dus au sodium\* et aux impuretés activées qu'il peut éventuellement transporter (produits d'érosion des structures, produits de fission).

Ainsi à l'exception des pièges froids, implantés dans 2 cellules particulières B5 (-14 m), l'ensemble des appareils constituant le circuit de purification est contenu dans une armoire métallique placée dans la cellule B6 (-9 m).

Cette disposition a été adoptée pour les raisons suivantes :

- simplification du système de préchauffage. C'est en effet l'ensemble de l'armoire qui est porté en température par des résistances de chauffage;
- simplification de la double enveloppe de sécurité en cas de fuite de sodium. Une seule enceinte de forme géométrique simple entoure l'ensemble du circuit et non chaque tuyauterie individuellement comme pour les tuyauteries principales de sodium primaire;
- groupement des commandes à distance des vannes (motorisées ou manuelles). Les tiges de commande traversent successivement le plafond de l'armoire et le bouchon de protection qui ferme la cellule B6 à sa partie supérieure et se regroupent au niveau -2,81 m.

L'armoire de purification contient :

- les lignes d'entrée et de sortie des pièges froids qui se croisent dans un échangeur-économiseur ECn 300;

\* Rappelons qu'au cours de son passage dans le réacteur, le sodium s'active pour fournir principalement du  $^{24}\text{Na}$  émetteur  $\beta$  (1,4 MeV maximum) et  $\gamma$  (1,38 et 1,76 MeV) avec une période de 14,8 h.

- les circuits de l'indicateur de bouchage et du "Rhomètre" qui peuvent être alimentés en sodium "non purifié" ou en sodium "purifié";
- la portion de tuyauterie de retour du circuit de trop-plein qui porte la vanne VMna 304 qui dérive, lorsqu'elle est fermée, tout le débit de la pompe électromagnétique vers les pièges froids.

De l'armoire de purification partent 2 tuyauteries vers la cellule B10 où sont situés les pots de prélèvements sodium.

### 5.2.1. Description du circuit

#### a) Echangeur économiseur ECna 300

Son rôle est de limiter le refroidissement du sodium dans le piège froid en effectuant un refroidissement préalable du sodium "à purifier" par le sodium "purifié" qui sort du piège. La perte calorifique nécessaire pour purifier le sodium est ainsi considérablement réduite. De plus, cette disposition permet de limiter la taille du circuit d'azote de réfrigération des pièges froids.

Cet économiseur est constitué d'un faisceau de 19 tubes de  $\varnothing$  12/14 m soudés à 2 plaques tubulaires.

Le corps de l'échangeur est une tuyauterie de  $\varnothing$  100/108 mm formée en épingle, d'une longueur développée de 5,3 m environ. Chacune des branches du faisceau comporte 6 chicanes alternées, fixées par des tirants liés à la plaque tubulaire et donnant un trajet ondulé au sodium circulant à l'extérieur des tubes.

#### Caractéristiques nominales

Acier austénitique inoxydable Z6 CND 18/12	
Tuyauteries de raccordement $\varnothing$ 33/42 mm	
Éléments de calcul : 5 bars - 640°C	
Épreuve hydraulique à 20 bars	
Température du sodium à purifier	entrée 540°C
	sortie 170°C
Température du sodium purifié	entrée 139°C
	sortie 509°C
Débit 4000 kg/h	

b) Indicateur de bouchage

Il est alimenté par le filtre FL na 301. Ces 2 appareils sont identiques à ceux utilisés pour le sodium secondaire (voir § 5.1.)

c) Le circuit "Rhomètre"

Ce circuit comprend :

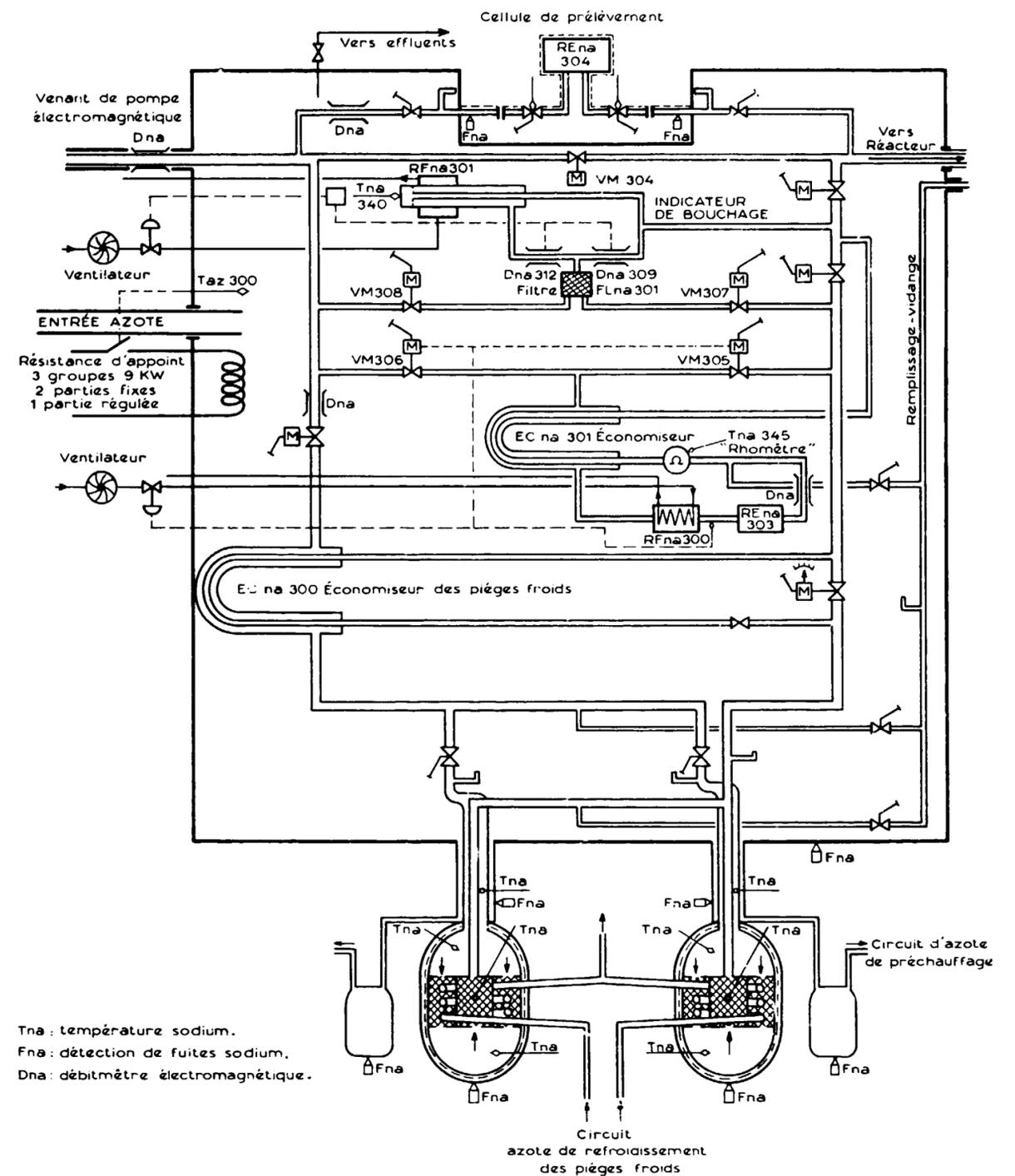
- un échangeur-économiseur EC na 301 constitué d'un faisceau de 7 tubes de  $\varnothing 12/14$  soudés à 2 plaques tubulaires. Le corps de cet échangeur est une tuyauterie de  $\varnothing 60/64$  formée en épingle d'une longueur développée de 4 m environ. Le sodium à refroidir passe à l'intérieur des tubes;

Caractéristiques nominales

Acier austénitique inoxydable Z 6 CND 18/12	
Tuyauteries de raccordement $\varnothing 21/27$	
Éléments de calcul 5 bars - 640°C	
Épreuve à 20 bars	
Sodium à refroidir	entrée 540°C
	sortie 322°C
Sodium à rechauffer	entrée 300°C
	sortie 518°C
Débit 1000 kg/h	

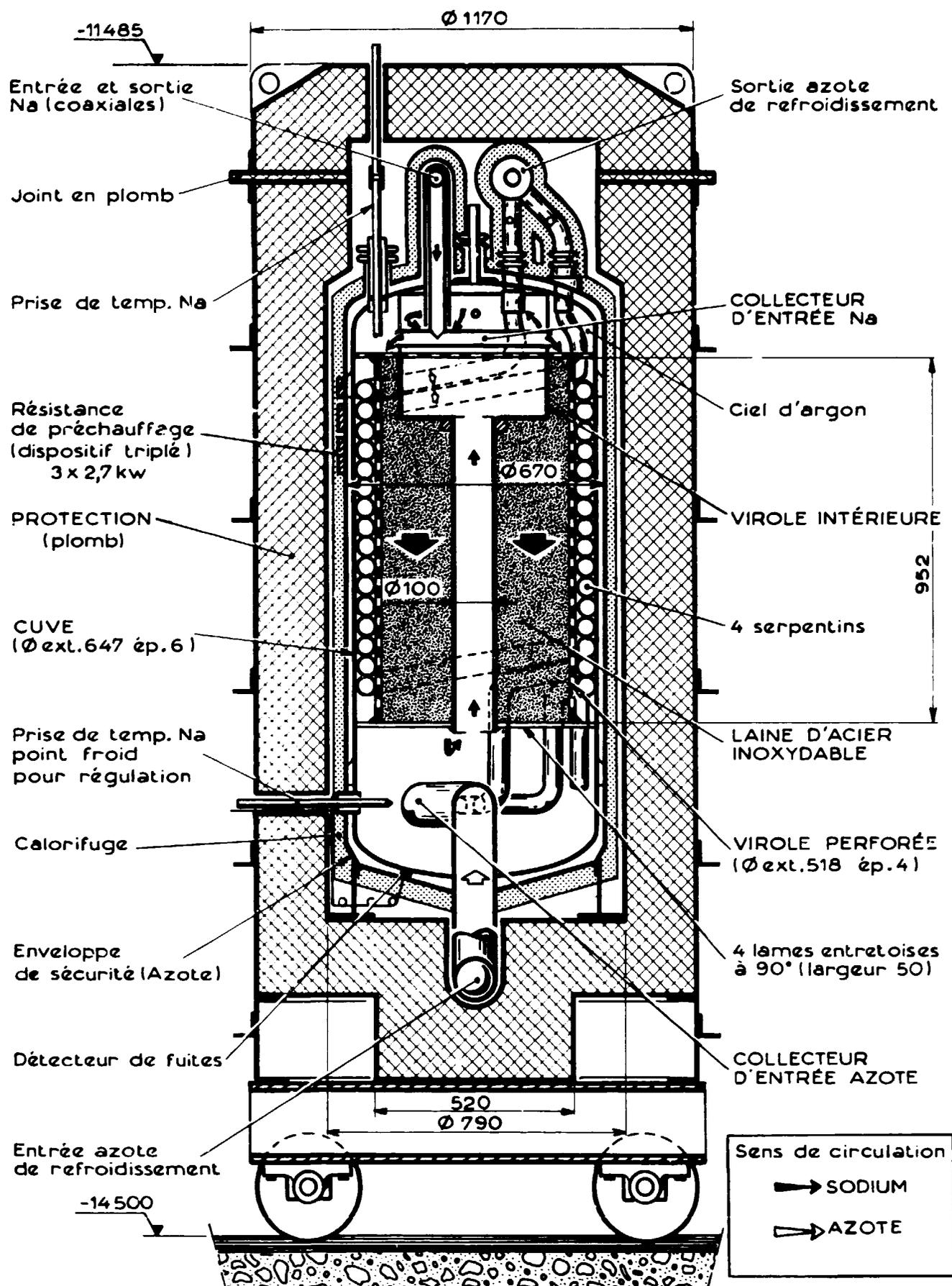
- un refroidisseur RF na 300 constitué d'un tube rectiligne aileté sur une longueur de 1,45 m environ. Le sodium circule à l'intérieur de cette tuyauterie.

L'espace annulaire compris entre l'extérieur de cette tuyauterie et une gaine de  $\varnothing 100/104$  est parcouru méthodiquement par un courant d'azote pris sur l'atmosphère des cellules B.



- Figure 12 - Schéma du circuit de purification primaire et de l'armoire





- Figure 13 - Piège froid primaire

### 5.2.2. Fonctionnement du circuit de purification primaire (Voir figure 14)

Le circuit de purification primaire est incorporé au circuit de régulation de niveau du réacteur.

Une tuyauterie arasée dans la cuve du réacteur au niveau normal - 4450 envoie l'excédent du sodium dans le réservoir de trop plein.

La pompe électromagnétique aspire le sodium du réservoir de trop plein et le restitue au réacteur par la tuyauterie de  $\varnothing 32/42$  mm alimentant l'armoire de purification.

Cette disposition permet de purifier le sodium primaire de façon continue.

Par le jeu des vannes de l'armoire de purification, il est possible d'alimenter séparément :

- les pièges froids (ou les pièges chauds lorsqu'ils seront installés),
- l'indicateur de bouchage,
- le dispositif de mesure de résistivité "Rhomètre".

Ces 2 derniers appareils peuvent être alimentés en sodium à purifier ou purifié par le jeu des vannes VM 308 ou 307 et VM 306 ou 305 permettant ainsi la vérification du fonctionnement des pièges froids.

#### - Indicateur de bouchage

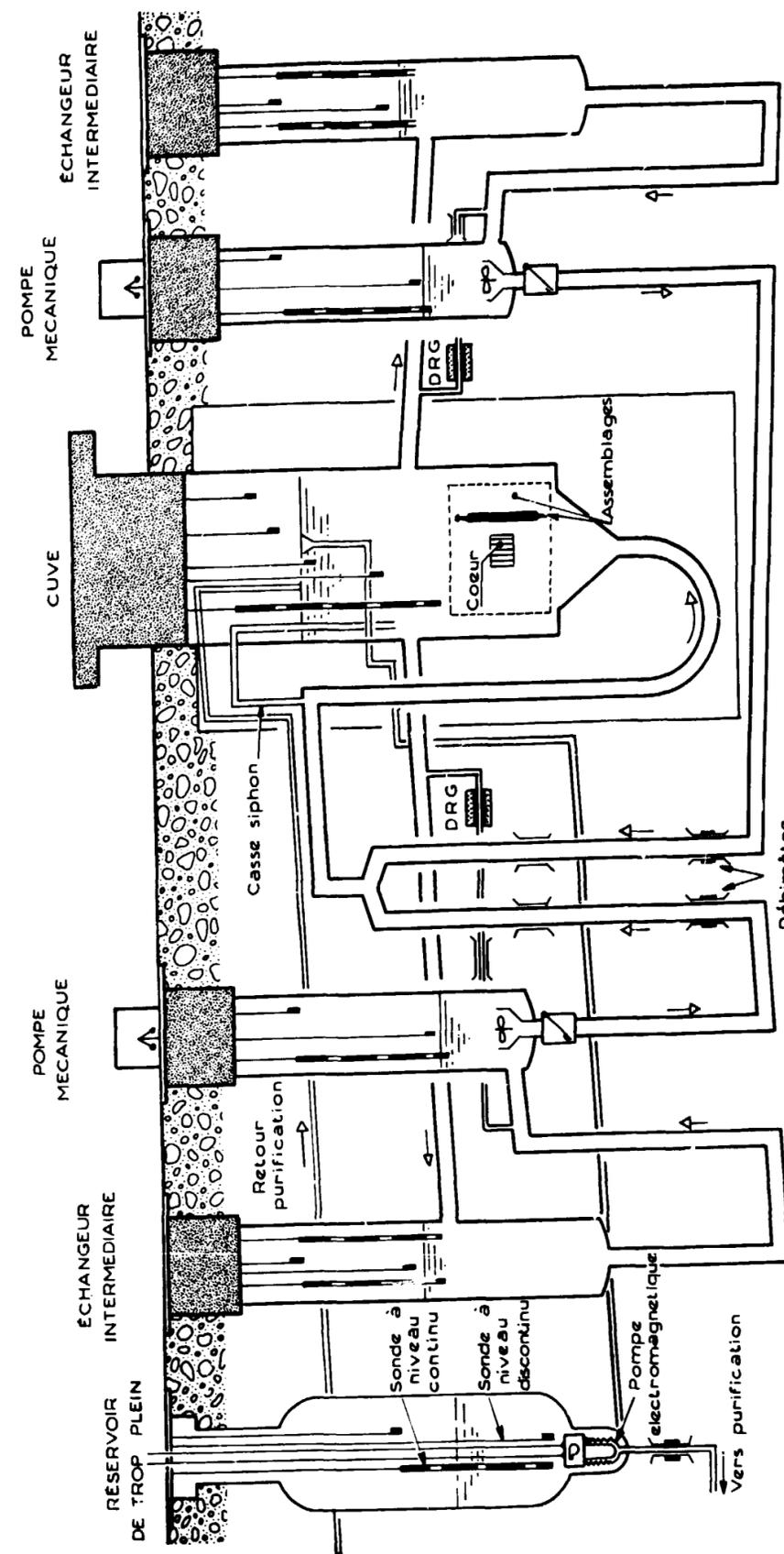
Le débit de refroidissement de RFNa 301 est asservi au rapport des débits de sodium dans l'indicateur (DNA 312) et dans le diaphragme (DNA 309). TNa 340 donne la température de bouchage et permet d'éviter le gel de l'indicateur.

#### - Rhomètre

Le débit de refroidissement de RFNa 300 est asservi à la température du sodium (TNa 346).

Le réservoir-tampon RENA 303 rend plus stable la température du sodium alimentant la cellule de mesure du "Rhomètre".

La cellule de mesure est protégée d'une arrivée de sodium trop chaud par les 2 vannes VM 305 et 306 qui reçoivent un ordre de fermeture si  $T_{Na} 345 > 320^{\circ}\text{C}$ .



- Figure 14 - Sodium primaire

- Préchauffage

L'armoire est remplie d'azote en provenance du circuit de préchauffage, mais elle n'est pas parcourue par l'azote de ce circuit.

Elle est préchauffée électriquement par des cannes chauffantes délivrant une puissance maximale de 27 kw.

Le préchauffage des pièges froids est réalisé électriquement.

Les tuyauteries de sodium reliant l'armoire de purification aux pièges froids sont munies d'un double préchauffage : un préchauffage à l'azote circulant dans leur double gaine, qui est utilisé pour le remplissage, un préchauffage électrique de mise en oeuvre plus souple pour les campagnes de purification. En service normal, ces tuyauteries sont maintenues chaudes par le sodium qui les parcourt.

Notons enfin que toutes les vannes situées dans l'armoire sont équipées d'un préchauffage électrique individuel mis en service de l'intérieur de l'armoire, pour permettre la manoeuvre des vannes lors des opérations d'entretien.

- Détection de fuites

Elle est réalisée globalement par des bougies placées dans le bas de l'armoire, dans les gaines de préchauffage des tuyauteries de sodium des pièges froids et dans les réservoirs d'azote RENA 300 et 400 qui font suite à ces gaines. De plus, chaque vanne possède sa bougie de détection pour contrôle de l'étanchéité du soufflet.

## VI - LES REGULATIONS DES PIEGES FROIDS ET INDICATEURS DE BOUCHAGE

### 6.1. Purification secondaire

#### 6.1.1. Piège froid

La régulation associée à un piège froid permet d'assurer le fonctionnement de cet appareil à une température constante réglable quelles que soient les caractéristiques du sodium (débit et température).

La chaîne de régulation est conforme à la figure 13 et comprend :

- un capteur thermocouple (nickel-chrome nickel allié),
- un amplificateur de mesure : 0 - 10 volts pour 0 - 350°C,
- un régulateur électronique à action proportionnelle, intégrale et dérivée,
- un convertisseur électropneumatique modulant une pression d'air (3 à 15 psi pour 1 à 5 mA),
- une soupape réglant le débit d'air de refroidissement du piège

La réalisation électrique est telle que la soupape de régulation s'ouvre par manque de pression d'air de régulation ou de courant d'alimentation de la chaîne de régulation.

Ainsi, en cas d'incident, le piège froid gèle et on ne risque pas la redissolution des oxydes qu'il contient par le débit du sodium non refroidi qui continue à le parcourir.

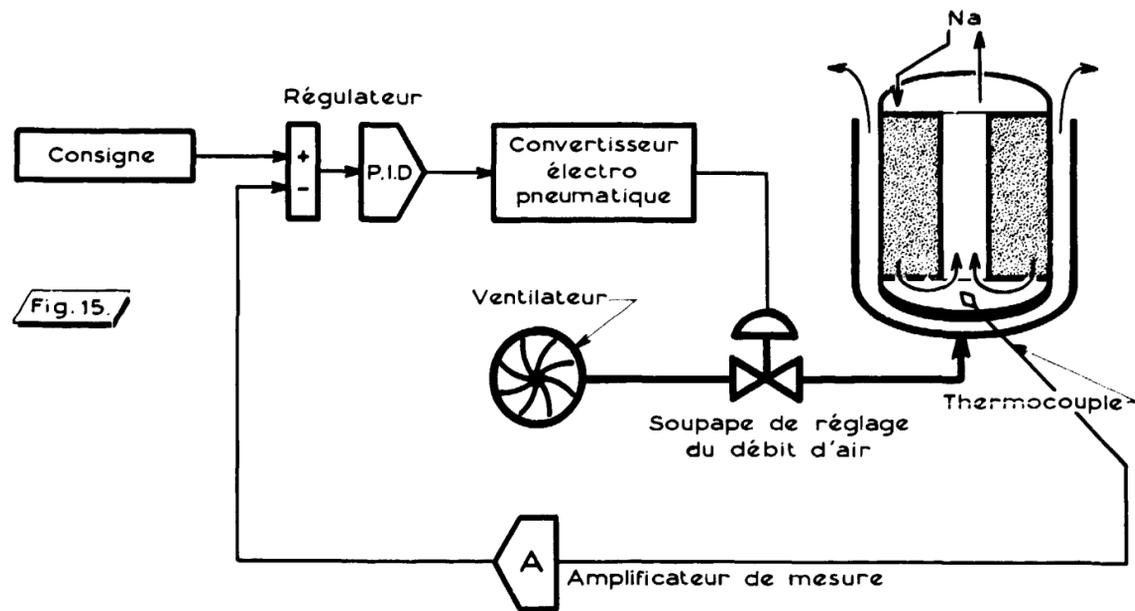


Fig. 15.

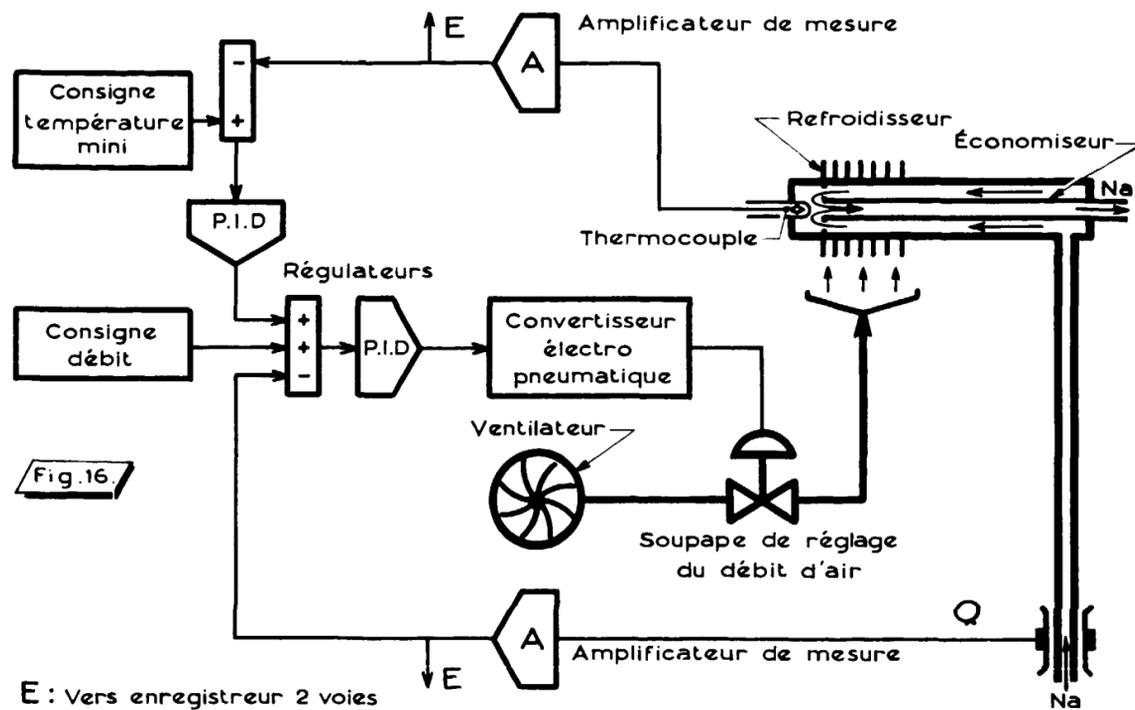


Fig. 16.

E : Vers enregistreur 2 voies

- Figure 15 - Régulation d'un piège froid

- Figure 16 - Régulation de l'indicateur de bouchage secondaire

L'exploitant est averti par alarmes si la température du piège est inférieure à 100°C (gel du piège) ou supérieure à 160°C (risque de redissolution des oxydes).

### 6.1.2. Indicateur de bouchage

La régulation associée à l'indicateur de bouchage permet de faire fonctionner cet appareil à une température telle que les orifices de faible section bouchés partiellement, mais de façon constante (voir principe de l'indicateur de bouchage § III).

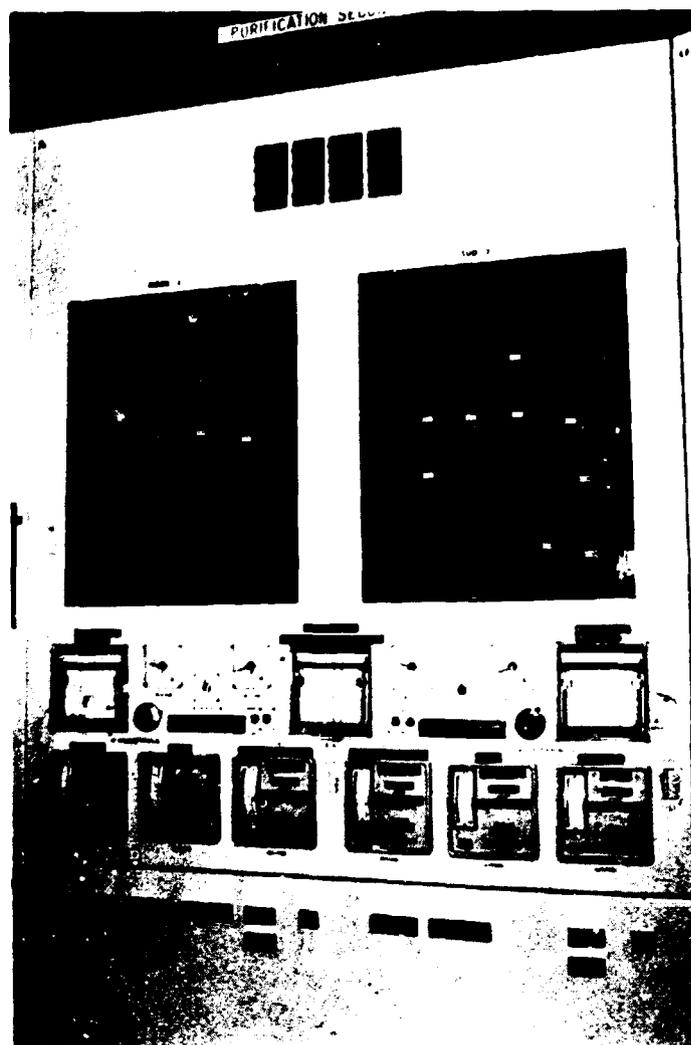
La chaîne de régulation est conforme au schéma de la figure 16 et comprend :

- un capteur : le débitmètre Q,
- un amplificateur de mesure,
- un régulateur à action proportionnelle, intégrale et dérivée,
- un convertisseur électropneumatique modulant une pression d'air,
- une soupape réglant le débit d'air de refroidissement de l'indicateur de bouchage.

A la mise en service de l'indicateur de bouchage, l'opérateur règle le débit de sodium dans l'appareil débouché (température supérieure à 250°C) à une valeur comprise en 200 et 300 l/h. Il affiche une consigne inférieure de 10 % environ au débit dans l'appareil débouché. La régulation agit alors dans le sens d'un refroidissement de l'indicateur. Celui-ci se bouche partiellement. Ainsi, lorsque le transitoire a cessé (bouchage partiel et constant), la température prise près des orifices refroidis est la température de saturation du sodium en oxyde.

Cette régulation du débit, très simple, a été complétée par une sécurité de température évitant le gel de l'indicateur lors du refroidissement initial. Cette sécurité a été traitée comme une régulation classique avec point de consigne réglable. Si la température de l'indicateur devient inférieure à cette consigne, le régulateur de température devient "prioritaire" et limite le refroidissement.

Exploitation de l'appareil :



- Figure 17 - Tableau de commande des purifications secondaires

- Mesure de bouchage manuelle

L'ouverture progressive de la soupape de réglage du débit d'air assure le refroidissement de l'indicateur. Lorsque le débit de sodium commence à décroître, la température indiquée est celle de la saturation.

- Mesure de bouchage automatique

On affiche sur les régulateurs :

- . un point de consigne de débit inférieur de 10 % au débit de l'appareil débouché,
- . une consigne de température minimale de 125°C environ.

Généralement, une valeur correcte de la température de bouchage est obtenue au bout d'une heure.

**6.2. Purification primaire**

6.2.1. Piège froid

La régulation de température d'un piège froid primaire est semblable à celle d'un piège secondaire.

La chaîne de régulation est commutable d'un piège à l'autre puisque l'on exploite les pièges séparément.

6.2.2. Indicateur de bouchage

Sur les circuits secondaires, la régulation de débit des indicateurs de

bouchage est perturbée par toutes variations des caractéristiques des circuits alimentant les indicateurs (variation de débit dans le circuit principal, variation de tension de la pompe électromagnétique).

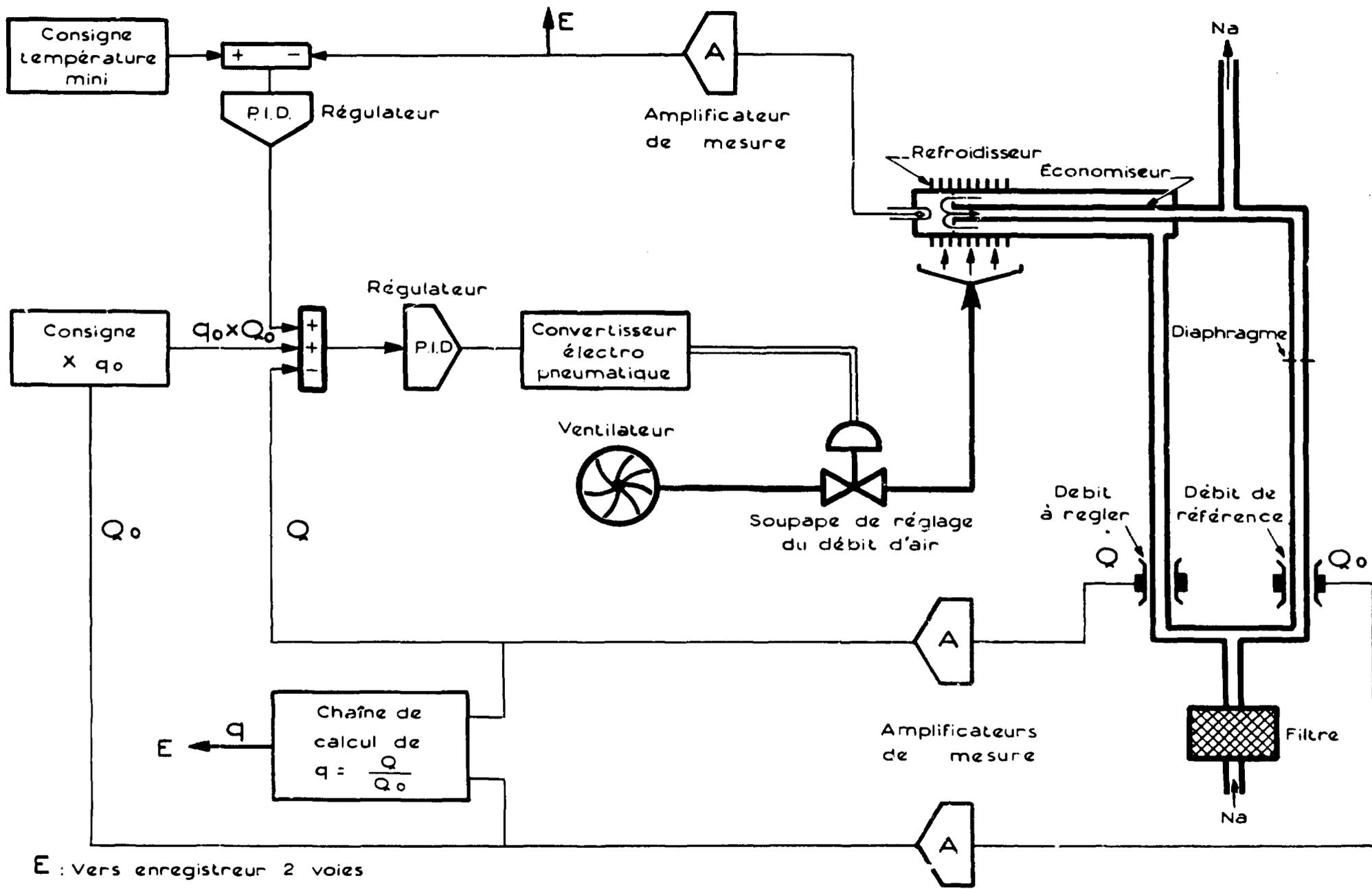
On a désiré éviter ces perturbations pour obtenir des fonctionnements plus stables de l'indicateur de bouchage primaire en raison de l'importance de la pureté du sodium dans ce circuit : températures plus élevées, nombreux orifices de faible section, etc...).

C'est pourquoi le débit de l'indicateur est asservi à un débit de référence. Les perturbations extérieures sont à peu près éliminées car toute variation de débit de la pompe électromagnétique (par variation de sa tension, variations de la circulation du sodium dans l'armoire de purification : vannes, etc...) perturbe proportionnellement le débit de référence et le débit de l'indicateur.

La chaîne de régulation est conforme au schéma de la figure 18 et comprend :

- un débitmètre électromagnétique  $Q$  mesurant le débit de sodium dans l'indicateur,
- un débitmètre électromagnétique  $Q_0$  mesurant le débit de sodium de référence dans le diaphragme,
- un émetteur de point de consigne de débit effectuant le produit de  $Q_0$  par un coefficient  $q_0$ ,
- un régulateur à action proportionnelle intégrale et dérivée,
- un convertisseur électropneumatique,
- une soupape de réglage du débit d'air de refroidissement de l'indicateur.

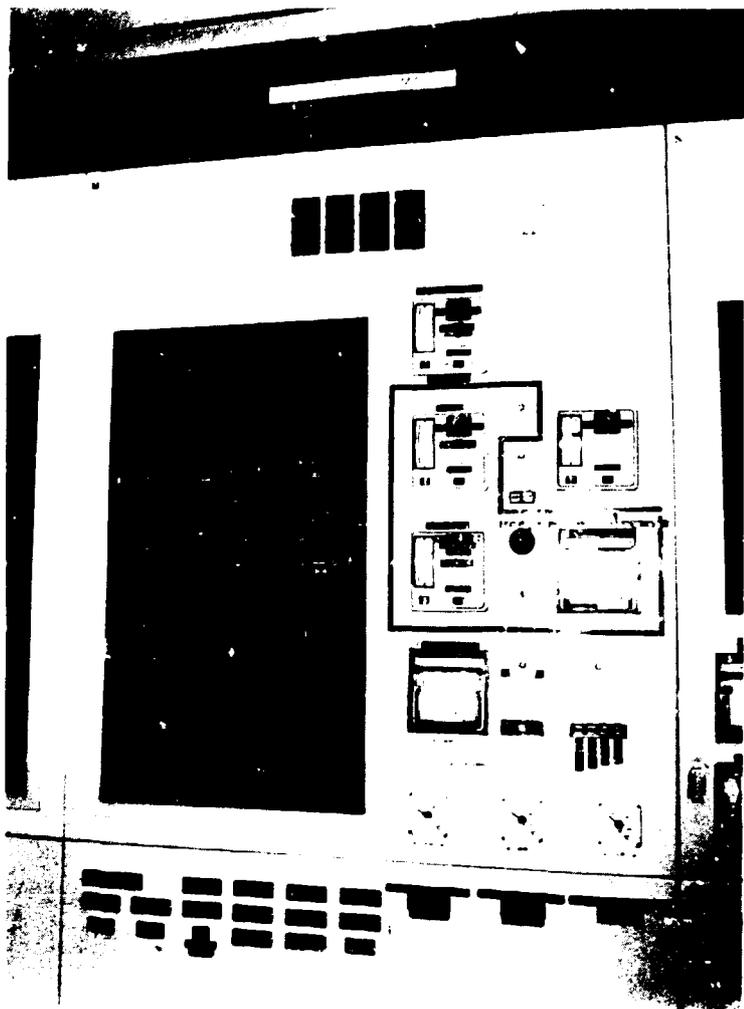
Cette chaîne est complétée par une régulation agissant en sécurité et évitant le gel de l'appareil.



E : Vers enregistreur 2 voies

- Figure 18 - Régulation de l'indicateur de bouchage primaire

Exploitation de l'appareil :



- Figure 19 - Tableau de commande des régulateurs de la purification primaire

Le diaphragme fixant le débit de référence permet d'obtenir un rapport  $\frac{Q \text{ indicateur débouché}}{Q_0} \approx 1$ .

On affiche sur le régulateur une consigne  $q_0 \approx 0,8$ .

On lit la température de bouchage lorsque le rapport  $q = \frac{Q}{Q_0}$  enregistré est égal à la consigne  $q_0$  (bouchage constant).

La conduite de l'appareil est identique à celle des indicateurs secondaires. On constate seulement une meilleure stabilité des mesures dues à l'absence des perturbations de débit.

## VII - EXEMPLES D'ENREGISTREMENTS DE TEMPERATURES DE BOUCHAGE

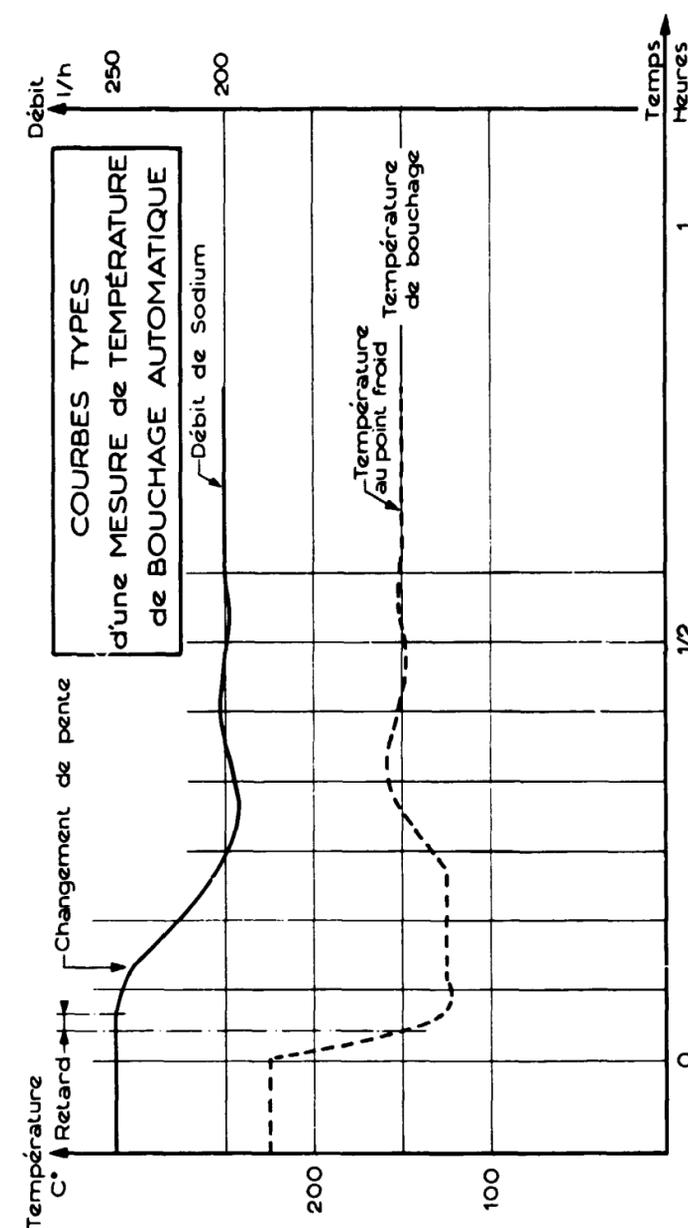
### 7.1. Cas type

La figure 20 donne l'allure type d'une mesure de bouchage automatique dans un cas d'interprétation simple.

Au temps 0, à la mise en service de l'appareil, le régulateur de débit constate un débit mesuré supérieur à la valeur de consigne. Il provoque un refroidissement de l'indicateur jusqu'à une température minimale, fixée à 125°C dans cet exemple, pour le boucher partiellement.

On constate qu'après un certain retard, le débit commence à décroître. Ensuite, après l'amortissement des régimes transitoires de débit et de température, l'appareil trouve un régime d'équilibre pour lequel les orifices de l'indicateur sont partiellement bouchés. La température correspondante est appelée "température de bouchage", elle représente celle de la saturation du sodium en oxydes.

Ce schéma-type très simple montre tout de même des particularités : il y a un changement de pente dans la réduction du débit de sodium au début du refroidissement. Ce phénomène apparaît sur les 3 indicateurs de bouchage exploités à RAPSODIE. Ceux-ci étant identiques, on ne sait pas encore si ce phénomène provient de l'appareil lui-même (influence de l'économiseur par exemple) ou du sodium (présence de plusieurs impuretés ayant des vitesses de précipitation différentes ?).



- Figure 20 - Mesure de bouchage automatique; cas simple

## 7.2. Dépouillement d'un cas réel

Les cas réels d'enregistrements des températures et débits d'un indicateur de bouchage sont souvent d'une interprétation délicate par la variété des aspects que ces enregistrements peuvent présenter.

Toutefois, lorsque le sodium a été purifié pendant de longues périodes, l'exploitation des appareils reste simple et toute anomalie dans les valeurs enregistrées doit alors être interprétée comme une pollution probable par l'oxygène.

L'exemple d'enregistrement donné ci-contre résulte des mesures faites le 24/7/67 sur le circuit secondaire Sud de RAPSODIE immédiatement après le remplissage en sodium. Durant l'arrêt du réacteur, ce circuit avait été vidangé pour permettre la réalisation de divers travaux nécessitant l'ouverture du circuit et la soudure de tuyauteries nouvelles. On pouvait donc s'attendre à une pollution du sodium par l'air ayant pu s'introduire dans le circuit à l'occasion de son ouverture.

Description de l'enregistrement joint : Voir figure 21 ab

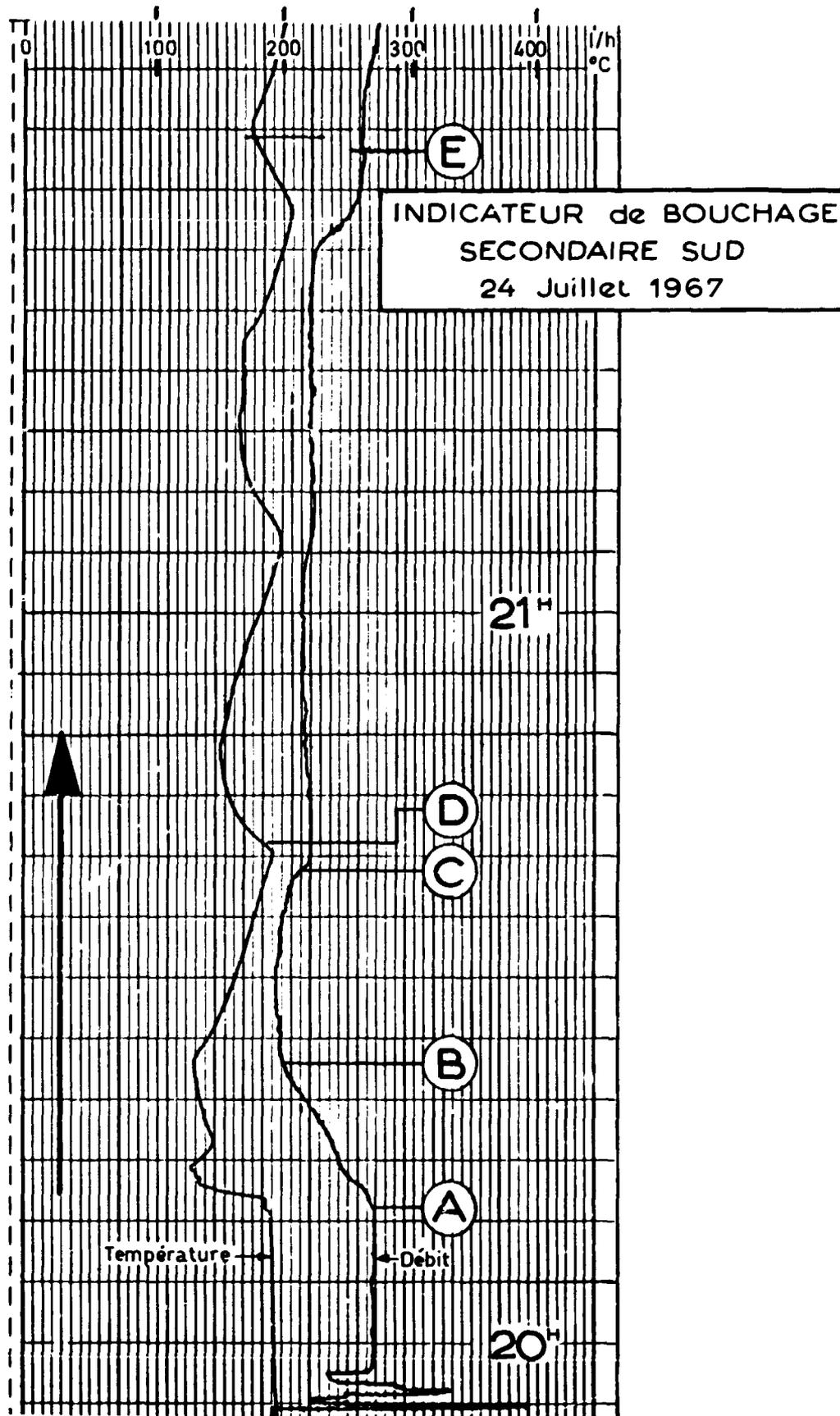
<u>Repère</u>	<u>Heure</u>	<u>Observations</u>
A	20h10	Mise en service de l'indicateur de bouchage en automatique. Débit débouché : 265 l/h Débit de consigne : 215 l/h Le refroidissement provoque le bouchage.
B		Le débit est devenu inférieur à la consigne. Le régulateur provoque le réchauffage de l'appareil pour le déboucher. On constate que les oxydes déposés ne se redissolvent pas immédiatement. On interprète ainsi ce phénomène par la présence de 2 impuretés principales dans le sodium (oxydes, carbonates, hydrures, soude?) ayant des caractéristiques de solubilité différentes et des vitesses de précipitation et dissolution différentes. Les oxydes étant les plus solubles et avec une vitesse de précipitation plus grande. Ainsi la phase A - B correspondrait-elle au dépôt d'oxydes et à partir de B l'influence d'une 2 <sup>e</sup> impureté deviendrait plus sensible.
C		Ce débouchage est subitement rapide. On pense que la dissolution des produits déposés (oxydes, carbonates, hydrures..) se produit avec un certain retard ou présente un phénomène de seuil.
D à E		La régulation de débit tente de trouver un point d'équilibre entre les 2 températures de bouchage correspondant aux 2 impuretés principales probables.

E	Réchauffage de l'indicateur pour débouchage total.
F	Remise en marche automatique. Refroidissement.
G	Bouchage progressif. On remarque nettement le changement de pente dans l'évolution du débit.
H & I	Perturbations dues à la 2 <sup>e</sup> impureté.
au-delà de I	Le débit reste constant, le bouchage partiel est stabilisé.
J	Réchauffage volontaire de l'appareil pour débouchage total. On remarque la rapidité du débouchage mais son retard important par rapport au début du réchauffage (10 mn - 40°C au-dessus de la température de bouchage).
K	Remise en marche automatique. Bouchage très lent malgré une température de 117°C. La pureté du sodium est alors excellente.

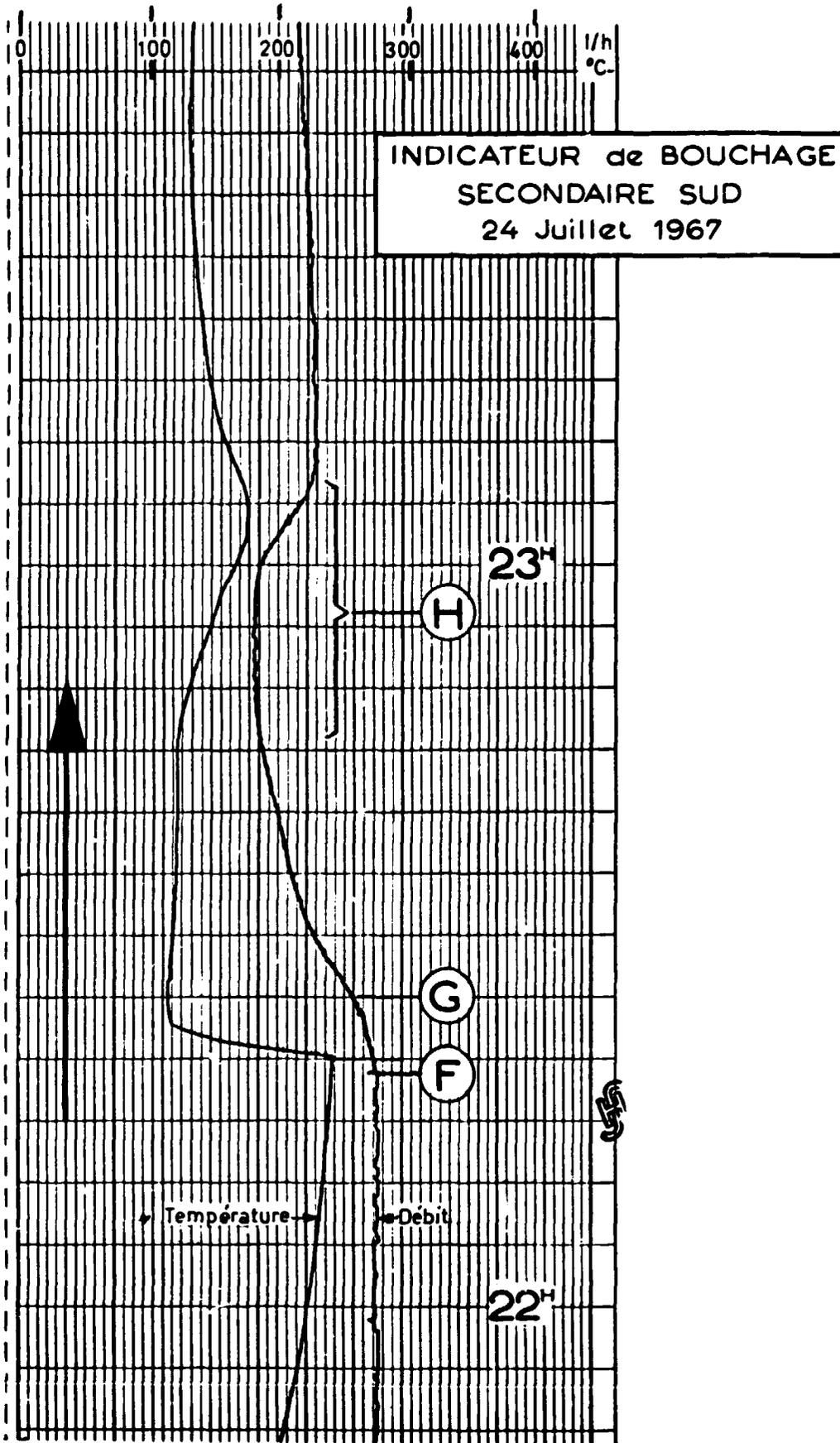
Cet exemple montre que l'interprétation d'un tel enregistrement est délicate.

Dans l'exploitation normale du circuit, les mesures ne sont pas tout à fait reproductibles car la purification du sodium est continue.

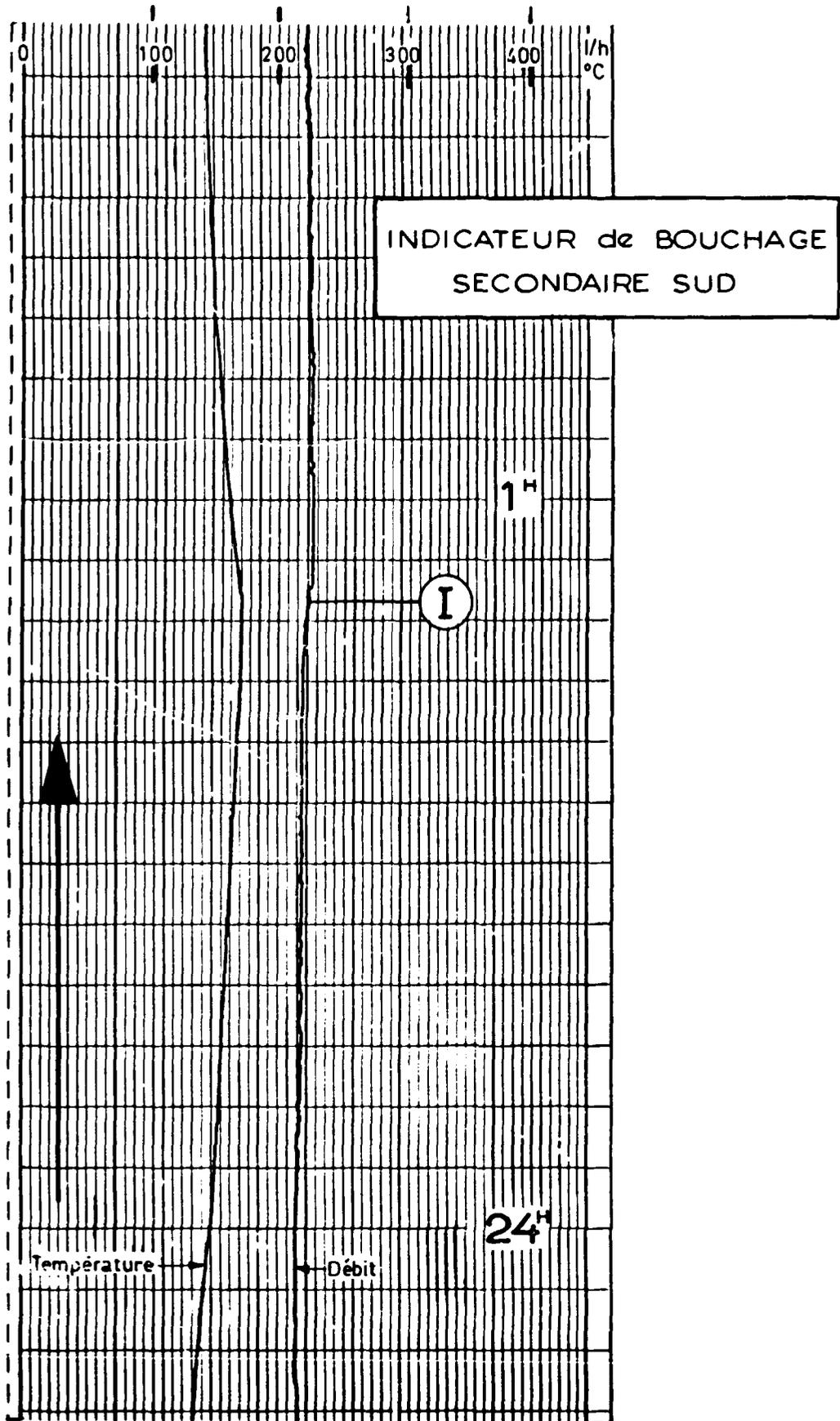
Pour cet exemple, il est évident qu'entre 20 h et 5 h, le piège froid a réussi à purifier l'ensemble du circuit. Il n'y a qu'à comparer le début de l'enregistrement et sa fin : points A et K.



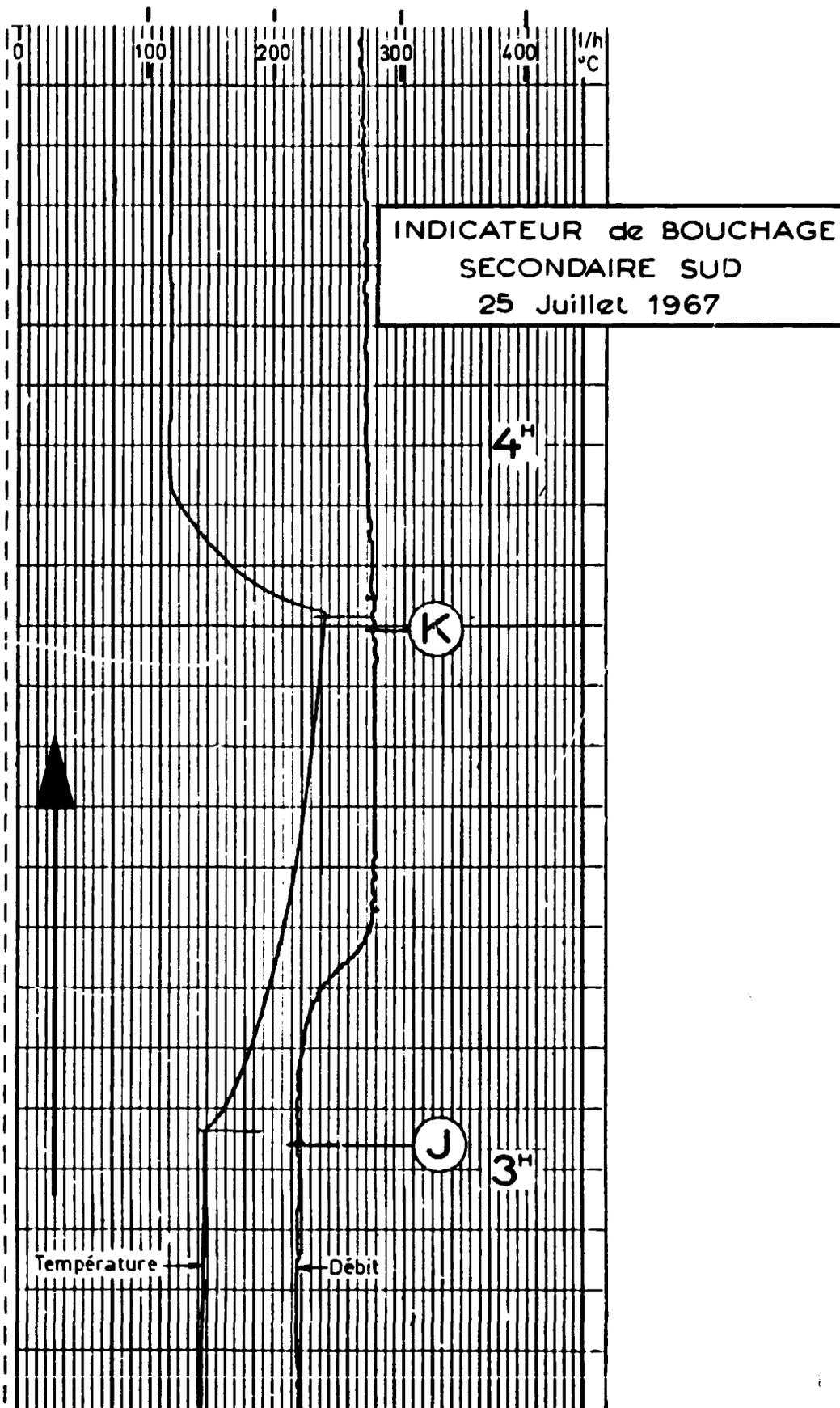
- Figure 21.a - Enregistrement de température de bouchage -  
Circuit Secondaire Sud



- Figure 21.b - Enregistrement de température de bouchage -  
Circuit Secondaire Sud



- Figure 21.3 - Enregistrement de température de bouchage -  
Circuit Secondaire Sud



- Figure 21.3 - Enregistrement de température de bouchage -  
Circuit Secondaire Sud

## VIII - EXPERIENCE DE LA PURIFICATION DU SODIUM A RAPSODIE

Il y a lieu de séparer les périodes de purification du sodium tout au début de l'exploitation des circuits et les problèmes actuels de purification.

### 8.1. Premières campagnes de purification des circuits

Le premier remplissage en sodium d'un circuit est effectué après mise sous vide et remplissage en argon.

Cependant, l'oxygène contenu dans les oxydes formés à la surface des tuyauteries et appareils mouillés par le sodium ne peut être éliminé. Ainsi après le 1er remplissage effectué à 130°C environ, la montée en température de l'ensemble doit être très lente pour que la vitesse de dépôt des oxydes de sodium dans le piège froid soit égale ou supérieure à celle de leur formation par décapage des tuyauteries. S'il n'en est pas ainsi, le sodium sera rapidement saturé. On court le risque d'un précipité d'oxyde dans un point plus froid du circuit et éventuellement le bouchage des petites tuyauteries.

En pratique, une montée en température à la vitesse moyenne de 5°C/h permet de maintenir une température de bouchage inférieure à 180°C (teneur de 20 ppm en oxygène). Cependant, on observe une brusque remontée de la température de bouchage obligeant à stabiliser la température du sodium quelques dizaines d'heures aux environs de 320°C. On explique ce phénomène par une décomposition probable de la soude à ces températures (?).

Lorsque la température de bouchage est revenue à 180°C, on peut reprendre la montée en température des circuits.

### 8.2. Qualité courante de la purification des circuits

L'exploitation du réacteur à des températures variées (de 150°C isotherme pour la manutention à 425°C isotherme pour divergence) conduit couramment à des refroidissements ou chauffages des circuits.

L'allure normale imposée par des problèmes de dilatations de tuyauteries a été fixée à 25°C/h et n'a pratiquement jamais dû être réduite à cause de la purification du sodium.

Lors des marches isothermes à 425°C ou du fonctionnement du réacteur (425°C - 510°C dans le coeur), on conserve aisément le sodium primaire à une pureté de 10 ppm d'oxygène (température de bouchage inférieure à 140°C) tout en réduisant le débit purifié à 2 m<sup>3</sup>/h (volume du circuit : 40 m<sup>3</sup>).

La valeur des températures de bouchage données par l'indicateur du circuit primaire ont été vérifiées par des analyses chimiques d'échantillons de sodium prélevés du 15 au 20 Mai 1967. Les résultats sont en parfait accord :

( Température sodium dans les circuits au moment du	
( prélèvement .....	345°C
(	
( Température de bouchage obtenu par mesure auto-	
( matique .....	< 130°C
(	
( Teneur moyenne en oxygène .....	8,5 ppm

(teneur calculée à partir de 11 mesures effectuées par 2 laboratoires différents).

Une surveillance particulière de la température de bouchage est effectuée lors de la première montée en température suivant une intervention sur le circuit sodium.

Au cours du premier semestre 1967, de nombreuses interventions ont nécessité l'ouverture du circuit primaire (démontage de pompes - début du chargement du coeur manuellement - examens du coeur par télévision - mise en place de dispositifs expérimentaux - soudures de doigts de gants supplémentaires - etc.). Chaque fois, ces interventions ont été réalisées avec une très légère surpression d'argon maintenue dans le circuit (1 à 5 millibars) s'opposant ainsi à toute entrée d'air : pratiquement, aucune difficulté due à la pureté du sodium n'est apparue.

### 8.3. Modifications apportées aux régulations des indicateurs de bouchage

En raison de la pureté satisfaisante du sodium, les indicateurs de bouchage ne parviennent pratiquement pas à se boucher. Par ailleurs, aucune alarme n'avait été prévue pour signaler aux opérateurs une évolution de la température de bouchage.

Les modifications apportées sont donc les suivantes :

- dès que le bouchage ne parvient plus à se produire, l'indicateur est exploité en régulation de température comme un piège froid. La consigne de température est fixée à 125°C;
- l'appareil étant exploité dans ces conditions, si le débit dans l'indicateur diminue, c'est qu'il se bouche, donc que la pureté du sodium diminue. Une alarme prévient alors l'opérateur;
- on évite le bouchage total de l'appareil ou son refroidissement excessif (gel) en provoquant automatiquement l'arrêt du ventilateur si le débit est inférieur à 100 l/h ou si la température est inférieure à 120°C.

### 8.4. Dispositions des circuits de purification

#### 8.4.1. Circuits secondaires

La simplicité et l'accessibilité de ces circuits est satisfaisante.

Seul le remplissage du circuit provoque des difficultés. Ce circuit constitue un point haut où se maintient l'argon. La pompe électromagnétique reste en argon également. Il est donc difficile de l'amorcer. On y parvient par compression et dépression successives de l'argon de couverture du circuit (de 200 à 1100 mbars).

Il serait souhaitable de prévoir un évent d'argon au point haut du circuit (indicateur de bouchage) relié à l'atmosphère de couverture des niveaux libres de la pompe principale et du réservoir d'expansion.

#### 8.4.2. Circuit primaire

L'ensemble du circuit de purification primaire est contenu dans une ar-

moire (voir description § 5.2.). Le préchauffage global qui en résulte exclut certaines opérations d'entretien. En particulier, une légère fuite s'étant produite sur une vanne, il a fallu maintenir toute l'armoire froide (30°C) pour provoquer le gel du tronçon de tuyauterie où se trouvait la fuite. Dans les autres tuyauteries, le sodium circulait en permanence, mais l'interruption momentanée du débit (par arrêt de la pompe électromagnétique) pouvait conduire au gel de ces tuyauteries et à l'arrêt total de la purification (situation que l'on n'admet pas pendant une campagne de manutention où les risques d'entrée d'air dans le réacteur sont accrus). La réparation de la vanne a dû être réalisée sans vidanger le reste des circuits car il était impossible de préchauffer séparément les tuyauteries et vannes de vidange.

Ainsi, une disposition constructive dictée par la sûreté (rassembler dans une seule enceinte tous les appareils de purification du circuit primaire pour contenir une fuite à cet endroit) conduit-elle à des difficultés d'intervention parce qu'on a voulu lui faire jouer également un rôle de préchauffage global.

On doit aussi remarquer que le prélèvement de sodium primaire pour purification est effectué au sommet du réacteur (par sa tuyauterie de trop plein). Cette disposition nous prive totalement du rôle de filtre que pourrait jouer un piège froid pour les corps étrangers véhiculés par le sodium (grains d'oxyde, gouttes de soudure, etc...). Un piquage dans un coude du circuit principal aurait été à cet égard plus satisfaisant. Cette remarque vaut aussi pour les circuits secondaires, bien que l'introduction de corps étrangers dans ces circuits soit moins à craindre (pas de manutention ni de dispositifs expérimentaux).

## IX - CONCLUSION

Pour conclure cet exposé, nous retiendrons que grâce aux nombreux essais et à l'expérience acquise sur des circuits expérimentaux (Halls d'Essais construits dès 1958 à CADARACHE), la mise en sodium des circuits de RAPSODIE s'est effectuée sans aucun problème majeur de purification.

La mise au point des régulations des indicateurs de bouchage et des pièges froids a été acquise dans les quelques semaines ayant suivi le premier remplissage des circuits et nous utilisons aujourd'hui ces appareils avec leurs réglages initiaux.

Seule l'exploitation permanente de circuits propres nous oblige à revoir légèrement le mode d'utilisation routinière de ces appareils.

Dans l'état actuel des températures du sodium à RAPSODIE (510°C moyenne sortie coeur, 560°C au maximum à la sortie des assemblages les plus chargés), le maintien d'une teneur en oxygène de l'ordre de 10 ppm est obtenu aisément et il est possible de réduire notablement les débits de purification continue.

L'expérience acquise à RAPSODIE peut donc être appliquée à d'autres installations de taille supérieure sans difficulté particulière.

*Manuscrit reçu le 3 octobre 1967*

## BIBLIOGRAPHIE

- Rapport de sûreté de RAPSODIE et notices d'exploitation des circuits (diffusion restreinte).
- Cours de GENIE ATOMIQUE  
Bibliothèque des Sciences et Techniques Nucléaires - CEA Centre de SACLAY.
- LIQUID METALS HANDBOOK - Sodium - Nak supplément - AEC.

## LISTE DES FIGURES

		CHAPITRES	Pages
<u>Fig. 1</u>	Plan de situation du Centre d'Etudes Nucléaires de CADARACHE (BDR)	I	3
<u>Fig. 2</u>	Schéma des assemblages fissiles et fertiles	I	5
<u>Fig. 3</u>	Plan du coeur	I	6
<u>Fig. 4</u>	Coupe du bloc pile	I	8
<u>Fig. 5</u>	Implantation des Bâtiments	I	12
<u>Fig. 6</u>	Teneur du sodium saturé en oxyde	II	14
<u>Fig. 7</u>	Résistance à la corrosion par le sodium de différents métaux et alliages	II	15
<u>Fig. 8</u>	Schéma du circuit de purification secondaire	V	21
<u>Fig. 9</u>	Coupe d'un piège froid secondaire	V	23
<u>Fig. 10</u>	Indicateur de bouchage	V	26
<u>Fig. 11</u>	Vue du circuit de purification secondaire	V	27
<u>Fig. 12</u>	Schéma du circuit de purification primaire	V	31
<u>Fig. 13</u>	Piège froid primaire	V	33
<u>Fig. 14</u>	Schéma circuit sodium primaire	V	35
<u>Fig. 15</u>	Régulation d'un piège froid	VI	38
<u>Fig. 16</u>	Régulation de l'indicateur de bouchage secondaire	VI	38
<u>Fig. 17</u>	Régulateurs secondaires	VI	40
<u>Fig. 18</u>	Régulation de l'indicateur de bouchage primaire	VI	42
<u>Fig. 19</u>	Vue tableau de commande des régulateurs de la purification primaire	VI	43
<u>Fig. 20</u>	Mesure de bouchage automatique : cas simple	VII	45
<u>Fig. 21</u>	a - b - c et d	VII	48 à 51

## LISTE DES TABLEAUX

		CHAPITRES	Pages
<u>Tableau 1</u>	Caractéristiques principales de fonctionnement du réacteur	I	11
<u>Tableau 2</u>	Composition de l'acier Z 6 CND 18/12	II	16
<u>Tableau 3</u>	Composition du sodium "pureté nucléaire"	II	16