

FR 501902



Attention Microfiche User,

The original document from which this microfiche was made was found to contain some imperfection or imperfections that reduce full comprehension of some of the text despite the good technical quality of the microfiche itself. The imperfections may be:

- missing or illegible pages/figures
- wrong pagination
- poor overall printing quality, etc.

We normally refuse to microfiche such a document and request a replacement document (or pages) from the National INIS Centre concerned. However, our experience shows that many months pass before such documents are replaced. Sometimes the Centre is not able to supply a better copy or, in some cases, the pages that were supposed to be missing correspond to a wrong pagination only. We feel that it is better to proceed with distributing the microfiche made of these documents than to withhold them till the imperfections are removed. If the removals are subsequently made then replacement microfiche can be issued. In line with this approach then, our specific practice for microfiching documents with imperfections is as follows:

1. A microfiche of an imperfect document will be marked with a special symbol (black circle) on the left of the title. This symbol will appear on all masters and copies of the document (1st fiche and trailer fiches) even if the imperfection is on one fiche of the report only.
2. If imperfection is not too general the reason will be specified on a sheet such as this, in the space below.
3. The microfiche will be considered as temporary, but sold at the normal price. Replacements, if they can be issued, will be available for purchase at the regular price.
4. A new document will be requested from the supplying Centre.
5. If the Centre can supply the necessary pages/document a new master fiche will be made to permit production of any replacement microfiche that may be requested.

The original document from which this microfiche has been prepared has these imperfections:

- missing ~~pages~~/figures numbered: 8.
- wrong pagination
- poor overall printing quality
- combinations of the above
- other

INIS Clearinghouse
IAEA
P. O. Box 100
A-1400, Vienna, Austria

3. International conference on liquid metal engineering
and technology in energy production
Oxford (UK) 9-13 Apr 1984
CEA-CONF--7650

DRNR / P / N° 289

UTILISATION DE POMPES ELECTROMAGNETIQUES DE GRANDE
TAILLE DANS LES REACTEURS A NEUTRONS RAPIDES

C. DEVERGE - J.P. LEFRERE (NOVATOME)
P. PETURAUD (EDF) - M. SAUVAGE (CEA)

RESUME :

Après une description générale des pompes électromagnétiques annulaires à induction et des méthodes de dimensionnement utilisées, l'adoption de ces composants dans un réacteur intégré à neutrons rapides est envisagée.

Deux voies sont successivement examinées :

- utilisation de PEM refroidies sur le circuit intermédiaire,
- utilisation de PEM immergées, couplées à l'échangeur intermédiaire, pour assurer la fonction pompage primaire ;

des dimensionnements sont présentés, les aspects énergétiques sont discutés et l'impact sur la géométrie de la centrale est abordé.

S O M M A I R E

1. INTRODUCTION
2. PRINCIPE ET DESCRIPTION
3. CARACTERES SPECIFIQUES DES GROSSES POMPES ELECTROMAGNETIQUES
4. METHODES DE DIMENSIONNEMENT DES PEM
 - 4.1. Dimensionnement électromagnétique
 - 4.2. Dimensionnement thermique
 - 4.3. Dimensionnement mécanique
5. ADOPTION DE PEM SUR LE CIRCUIT INTERMEDIAIRE
 - 5.1. Généralités - projet
 - 5.2. Bilan de l'opération
 - 5.3. Actions complémentaires à entreprendre
6. MODULE EI-PEM
 - 6.1. Motivation et cadre de l'étude
 - 6.2. Recherche de configurations de module EI-PEM - Analyse qualitative
 - 6.3. Prédimensionnements fonctionnels du module EI-PEM
 - 6.4. Intégration du composant dans le bloc réacteur
 - 6.5. Actions complémentaires à entreprendre
7. CONCLUSION

Tableau 1 Bilans énergétiques (kw) et incidence sur les surfaces d'échange S

Tableau 2 Caractéristiques générales des modules EI-PEM

Figure 1 Schéma de principe d'une PEM

Figure 2 Lignes de champ dans une PEM

Figure 3 Simulation du fonctionnement d'un cycloconvertisseur

Figure 4 Caractéristiques géométriques du projet

Figure 5 Pompe 8100 m³/h - 2,65 bar : pertes et rendement

Figure 6 Organisation du faisceau d'échange et des circulations sodium

Figure 7 Module EI-PEM : configurations concentriques

Figure 8 Module EI-PEM : configurations PEM en-dessus

Figure 9 Module EI-PEM : Configurations PEM en-dessous

Figure 10 Implantation du module EI-PEM dans la cuve principale du réacteur

1 - INTRODUCTION

De nombreux arguments plaident pour l'adoption, sur les circuits sodium, des pompes électromagnétiques (PEM) à la place des pompes mécaniques : absence de parties tournantes et de surface libre, auxiliaires sodium simplifiés, facilités d'implantation sur une tuyauterie avec des contraintes de NPSH modérées, investissement moindre,... De plus, ces composants ont démontré, depuis de longues années, un fonctionnement satisfaisant (grande fiabilité, entretien réduit) sur des circuits auxiliaires de diverses installations et sur les circuits principaux de réacteurs prototypes (EBR II, BOR 60), et dès les années 1975, l'utilisation de PEM sur le circuit intermédiaire des réacteurs rapides de forte puissance a été envisagée en France.

Cependant, malgré tous ces avantages potentiels, cette voie n'a pas été retenue dans les options de base, même comme solution alternative, des grands projets français à cause :

- du rendement dégradé des PEM, qui se traduit par une pénalisation énergétique sensible
- des diverses incertitudes techniques qui subsistent sur la conception et les caractéristiques d'unités de grande taille.

Cette communication présente les études faites sur l'adoption de PEM annulaires sur un réacteur intégré dont les caractéristiques principales seraient celles du Projet 1500 et tente d'en cerner l'intérêt et les points durs.

Après une description générale du composant et des méthodes de dimensionnement employées, on examine deux voies :

- utilisation de PEM refroidies sur le circuit intermédiaire
- utilisation de PEM immergées, couplées à l'échangeur intermédiaire, pour assurer la fonction pompage primaire dans un concept intégré.

Des dimensionnements sont présentés, les aspects énergétiques sont discutés et l'impact sur la géométrie de la centrale est abordé ; on énumère enfin les actions qu'il conviendrait d'engager pour valider les conceptions retenues.

2 - PRINCIPE ET DESCRIPTION

La figure 1 représente une pompe électromagnétique à induction annulaire qui comprend deux parties essentielles : le conduit et l'inducteur (ou stator).

Le conduit cylindrique est constitué de deux tubes concentriques ménageant un espace annulaire dans lequel circule le sodium, et le stator comporte un circuit magnétique disposé radialement autour du conduit et un bobinage placé dans les encoches du circuit magnétique. Un noyau implanté à l'intérieur du tube interne du conduit permet la fermeture du champ magnétique.

Le bobinage alimenté par un réseau triphasé (courant I_1) crée un champ magnétique radial B et induit dans le sodium des courants I_2 : on génère ainsi des forces F qui propulsent le sodium.

Le conduit décrit ci-dessus est complété par des pièces de révolution qui viennent fermer le noyau et par des diffuseurs qui permettent de raccorder le conduit au circuit sur lequel est installée la pompe.

Pour une pompe de grande taille il est possible de remplacer le noyau par un deuxième stator, ce qui permet d'augmenter la pression motrice délivrée par la pompe tout en minimisant sa longueur.

3 - CARACTERES SPECIFIQUES DES GROSSES POMPES ELECTROMAGNETIQUES

Dans le principe rien ne différencie une grosse pompe à induction annulaire (débit de quelques milliers de m^3/h) d'une petite (débit de quelques dizaines de m^3/h). En pratique l'extrapolation a nécessité la mise au point de méthodes de calculs plus performantes que celles utilisées pour les pompes de faible puissance, pour les raisons spécifiques suivantes :

- les problèmes de refroidissement augmentent avec les dimensions : les puissances dissipées varient comme les volumes, donc plus vite que les surfaces d'évacuation de la chaleur ; l'organisation du refroidissement doit donc interférer avec le dimensionnement électrique de la machine

- avec l'augmentation de la puissance il est normal de rechercher une amélioration du rendement, ce qui suppose une étude plus fine des pertes.

Par ailleurs l'augmentation de taille des machines fait apparaître la nécessité d'utiliser des alimentations à basse fréquence dont il est indispensable d'étudier le fonctionnement couplé avec les pompes, ainsi que les conséquences sur l'ensemble de la chaudière.

4 - METHODES DE DIMENSIONNEMENT DES PEM

4.1. - Dimensionnement électromagnétique

Au milieu des années 1970, les codes de calculs utilisés employaient une méthode de résolution analytique des équations de Maxwell, en géométrie cylindrique, et traitaient la seule partie courante de la pompe. Ces codes de calculs sont toujours utilisés pour des dimensionnements d'avant-projet, en raison de leur souplesse d'emploi et de leur faible coût d'exploitation. Toutefois, pour les raisons exposées au paragraphe 3, un modèle numérique aux éléments finis a été développé en géométrie bidimensionnelle ; il permet de prendre en compte la géométrie réelle de la pompe et en particulier les effets d'extrémités. L'exploitation de ce code est facilitée par l'adjonction de sous-programmes permettant de visualiser les données et les résultats (maillage, ligne de champ, induction, pression, courants, puissance, rendement...); la figure 2 montre un exemple de tracé de ligne de champ à la sortie de la pompe.

Comme il a été mentionné précédemment, l'alimentation des grosses pompes doit se faire à basse fréquence (8 à 15 Hz), et les cycloconvertisseurs, machines statiques utilisant des thyristors de puissance à déclenchement piloté sont retenus pour assurer cette alimentation électrique. Ces convertisseurs sont apparus dans l'industrie vers les années 1975 et des matériels de plusieurs mégawatts ont déjà été réalisés.

Pour l'étude du couplage de ces appareils avec les pompes électromagnétiques, un code de calcul permet de simuler en régime permanent les tensions et intensités en sortie du cycloconvertisseur et détermine le supplément de perte occasionné par les harmoniques. La figure 3 présente l'allure des tensions et courants délivrés par un cycloconvertisseur.

4.2. - Dimensionnement thermique

Des moyens de calculs adaptés à la géométrie des pompes électromagnétiques ont été développés. Fondés sur des méthodes aux différences finies, ces codes traitent en tridimensionnel les fonctionnements permanents et transitoires ; ils permettent de définir les puissances évacuées par la ventilation et déterminent la température maximum du bobinage et le débit de fluide de refroidissement à prévoir.

4.3. Dimensionnement mécanique

Le dimensionnement mécanique du conduit et de la structure de la pompe se fait par les moyens classiques en vigueur actuellement (méthodes aux éléments finis en général).

5 - ADOPTION DE PEM SUR LE CIRCUIT INTERMEDIAIRE

5.1. - Généralités - projet

Le projet présenté est une extrapolation géométrique des pompes de petite taille, et on a conservé la même technologie au niveau du bobinage et du circuit magnétique. Cette technologie, bien maîtrisée pour les petits composants, devrait garantir une très grande fiabilité du matériel.

Le stator unique disposé à l'extérieur du conduit est constitué de peignes magnétiques formés d'empilements de tôles encochées et de bobines de forme simple (galettes) faciles à raccorder entre elles ; la température de service du stator est sensiblement plus élevée que dans un moteur conventionnel mais les matériaux d'isolation modernes permettent de résoudre "facilement" ce problème. Le refroidissement se fait par convection forcée, et la grande inertie thermique du stator autorise des défaillances temporaires du refroidissement.

Le conduit est une pièce chaudronnée de révolution dont les deux seules pièces massives sont (Fig. 4) :

- une bride pour la fixation aux châssis de la pompe
- une bride pour le guidage.

On a retenu, dans cette étude, une configuration de chaudière avec 8 pompes électromagnétiques dont les paramètres thermohydrauliques de chacune sont, au régime nominal de fonctionnement :

Débit :	8100 m ³ /h
Pression différentielle :	2,65 bar
Température de service :	345° C

Les principaux résultats du dimensionnement sont donnés ci-dessous et ils seront utilisés par la suite pour établir le bilan énergétique de la chaudière :

Tension d'alimentation	950 V - 10 Hz
Rendement	0,45
Facteur de puissance	0,5
Puissance active consommée	1,34 MW
Alimentation statique par cycloconvertisseur	
Puissance apparente	2,7 MVA
Tenue en pression	10,5 bar à 345°C
Tenue au vide à froid	
Masse	environ 20 000 kg

La figure 4 donne les cotes essentielles de la machine. et la figure 5 en présente, sous forme de diagramme, un bilan énergétique détaillé, avec identification et répartition des différentes pertes.

5.2. Bilan de l'opération

Dans le cadre de cette étude préliminaire où l'on évalue, pour un réacteur 1500 MWe reprenant les principales caractéristiques du Projet 1500, l'incidence de l'adoption de PEM sur le circuit intermédiaire, on ne recourt pas à une optimisation numérique globale du réacteur équipé de ces composants, mais on détermine essentiellement les conséquences immédiates imputables au remplacement des pompes mécaniques par des PEM.

L'exercice est réalisé en conservant la puissance thermique du cœur, les cycles thermodynamiques du sodium primaire et de l'eau/vapeur et les températures, à la sortie de l'échangeur intermédiaire (EI), et à l'entrée du générateur de vapeur (GV), du sodium intermédiaire ; aucune modification de lignes consécutives à l'implantation de PEM n'est prise en compte.

Deux configurations sont considérées : cycle du sodium intermédiaire conservé à l'EI puis au GV, et pour chacune d'elles, on présente dans le tableau 1, les variations, par rapport à la solution de référence avec pompes mécaniques,

- des puissances de pompage secondaire et eau/vapeur,
- de puissance électrique nette aux bornes de la centrale
- des surfaces d'échange de l'EI et du GV.

On peut constater que les deux approches conduisent aux mêmes conclusions :

- les surfaces d'échange subissent une augmentation peu significative
- les accroissements de puissances de pompage dus aux variations de débit dans les circuits restent très faibles, et la perte de rendement de la centrale ($< 2,5 \%$) est essentiellement due à la surconsommation électrique des PEM dont une fraction seulement est récupérée au groupe turbo-alternateur.

Pour compléter le bilan de l'opération "remplacement des pompes mécaniques par des PEM", il conviendrait également de regarder les conséquences des caractéristiques spécifiques des PEM (rendement et facteur de puissance faibles, absence d'inertie propre) sur la conception de l'alimentation générale des PEM et sur le dimensionnement des sources électriques normales et secourues. Une évaluation économique globale, dans laquelle on essaierait de prendre en compte les facilités d'implantation des PEM sur un circuit, devrait enfin sanctionner l'exercice. Ces diverses actions sont actuellement en cours de réalisation.

5.3. Actions complémentaires à entreprendre

Avant d'aborder le projet définitif, quelques points doivent faire l'objet d'études et de développements approfondis. Ces points sont abordés ci-dessous.

Les moyens de calculs devront être complétés à terme par une simulation de l'écoulement turbulent dans la veine de sodium en utilisant les méthodes de calcul actuellement en développement en mécanique des fluides.

Il est également indispensable d'acquérir une connaissance pratique de la conduite d'une pompe électromagnétique alimentée par un cycloconvertisseur ; ceci est prévu avec une pompe de taille intermédiaire (600 à 800 m³/h).

Des études de conception d'ensemble de la pompe sont à entreprendre, en particulier la recherche du meilleur mode de refroidissement du bobinage, avec comme objectif la recherche de la pompe la plus légère possible.

6 - MODULE EI-PEM

6.1. Motivation et cadre de l'étude

Après avoir envisagé l'adoption de PEM sur le circuit intermédiaire, on s'est demandé si leur utilisation était concevable pour assumer la fonction pompage primaire, en réacteur de type intégré, ce qui impose d'immerger totalement le composant dans la cuve principale.

a) Une première question se pose : comment assurer leur refroidissement ? Contrairement au cas des PEM envisagées sur le circuit intermédiaire, on peut difficilement retenir un refroidissement par circuit auxiliaire (encombrement, nature du fluide et perte d'étanchéité éventuelle...) et l'on admet que le refroidissement de la PEM immergée est réalisé uniquement par le sodium véhiculé (convection) et par le sodium environnant (conduction). Cette hypothèse se traduit par un fonctionnement à haute température des conducteurs et de leurs isolants pour lesquels les recherches actuelles laissent espérer un développement et une mise en œuvre industrielle à moyen terme ; on peut d'ailleurs signaler, pour corroborer ces espoirs, qu'une PEM immergée, de très petite taille il est vrai, fonctionne d'ores et déjà dans de telles conditions thermiques (ambiance sodium à 550° C) sur l'installation d'essais d'ESMERALDA du CEN/Cadarache.

Pour l'étude présentée dans ce document, les dimensionnements de PEM ont été réalisés en admettant une température limite de 620°C sur les bobinages.

b) Ce point acquis, une deuxième question est formulée : quel aménagement interne du bloc réacteur retenir lorsqu'on adopte des PEM. Deux possibilités se dégagent :

- la première consiste à remplacer purement et simplement les pompes mécaniques par des PEM. Cette solution conduit :

- * à nombre de pompes conservé : à une PEM de puissance élevée et d'encombrement important, dont on conçoit mal aujourd'hui le dimensionnement et la réalisation.

* à nombre de pompes augmenté (remplacement de chaque pompe mécanique par 2 PEM) : à une pénalisation excessive sur le diamètre du bloc réacteur ; de plus, cette configuration ne permet pas de tirer pleinement parti des aménagements envisageables pour rendre le système de manutention plus compact, car le diamètre du bloc réacteur est imposé par le chemin critique circonférentiel au niveau de la dalle.

- la deuxième voie profite de l'anatomie de la PEM pour l'associer à l'échangeur intermédiaire et créer un composant unique qui remplit les deux fonctions, le module EI-PEM. Un tel couplage, dont l'idée a déjà été émise par ailleurs, permet de simplifier les structures internes du bloc réacteur, suppression de toute cuve interne ou redan, même si une protection thermique importante de la cuve principale, baignée totalement par le collecteur chaud, doit être prévue. Cette conception réduit en outre le nombre de composants dans le bloc réacteur, et par là même, en rendant radial le chemin critique au niveau de la dalle, elle transpose sur le diamètre de cuve, les améliorations dimensionnelles du système de manutention.

Cette analyse succincte des possibilités d'utilisation de PEM immergées dans le bloc réacteur laisse entrevoir un intérêt plus grand pour la conception "module EI-PEM", et la deuxième partie de cette communication est consacrée aux études préliminaires engagées sur ce concept.

c) Ces études préliminaires ont été articulées autour de quatre thèmes successifs :

- recherche et analyse qualitative de diverses configurations de module EI-PEM
 - prédimensionnements fonctionnels de quelques configurations-types et choix d'une configuration de référence
 - intégration du composant dans le bloc réacteur
 - mise en évidence des points durs, élaboration du programme d'études complémentaires et des actions de R et D à engager pour valider le concept introduit ;
- on en expose les résultats et conclusions principaux dans les paragraphes suivants.

6.2. Recherche de configurations de module EI-PEM - Analyse qualitative

a) Organisation du faisceau d'échange et des circulations sodium

Une première réflexion sur le couplage EI-PEM incite à retenir une organisation qui assure, pour le sodium primaire, une sortie axiale du faisceau ; dans cette optique, quatre configurations, entre autres, ont été identifiées (Fig. 6) :

C1 - faisceau à tubes droits, avec sodium primaire côté calandre et collecteur de sortie primaire

C2 - faisceau à tubes droits, avec sodium primaire à l'intérieur des tubes

C3 - faisceau à tubes en J, avec sodium primaire côté calandre et virole tubulaire intérieure.

C4 - faisceau à tubes en J, avec sodium primaire à l'intérieur des tubes et virole tubulaire extérieure.

Les solutions qui mettent en oeuvre des tubes en J ont été abandonnées car on craint :

- des problèmes de tenue mécanique des piquage des tubes en J
- des difficultés de réalisation des viroles tubulaires et du faisceau ;

de plus, le coût d'un tel EI est, sans aucun doute, beaucoup plus élevé que celui d'un appareil à tubes droits.

L'analyse a été poursuivie avec les deux seules configurations à tubes droits, et deux familles ont été explorées, quant à l'organisation du module :

- EI et PEM concentriques
- EI et PEM superposés.

b) L'organisation EI-PEM concentriques autorise l'utilisation d'une PEM à simple inducteur dont la longueur est masquée par celle du faisceau d'échange (Fig. 7).

La configuration PEM intérieure (Fig. 7-a) impose un EI annulaire de fort encombrement diamétral, avec une alimentation secondaire et une traversée dalle très complexes. En outre, cette disposition se révèle peu propice à un fonctionnement en circulation naturelle et rend la PEM difficile d'accès, et malgré quelques avantages (PEM au point froid, de faible diamètre moyen), elle s'avère peu attrayante et n'a pas fait l'objet d'attention supplémentaire.

La configuration PEM autour de l'EI (Fig. 7-b) apparaît un peu plus "sympathique". Elle présente un stator accessible, conduit à un encombrement diamétral raisonnable et permet de s'affranchir de toute pénalisation axiale en autorisant la remontée du composant dans la dalle (la PEM sert de siphon d'alimentation) ; la prise en compte de ce dernier point nécessite toutefois :

- de résoudre les problèmes de dimensionnement thermique de la PEM, en partie seulement baignée par le sodium
- d'éliminer les risques de mode commun de désamorçage des siphons
- de faire face à de nouveaux problèmes de protection biologique.

Au débit de cette configuration, il faut noter deux caractéristiques qui, les prédimensionnements ultérieurs l'ont montré, se révèlent rédhibitoires : PEM au point chaud, implantée sur un diamètre moyen de veine fluide important (d'où une masse excessive).

c) Organisation EI-PEM superposés, PEM au-dessus (Fig.8)

Cette disposition, qui se conçoit agréablement avec une circulation du primaire à l'intérieur des tubes du faisceau d'échange, place la PEM en point chaud, autour du collecteur de sortie secondaire qui impose l'encombrement diamétral minimal du composant.

On peut envisager d'adopter une PEM à double inducteur alimenté en "déversoir" (Fig. 8-a), mais ce schéma, très favorable à un fonctionnement en circulation naturelle, se traduit par une pénalisation en hauteur importante. On peut réduire fortement cette pénalisation en remontant la PEM, à simple ou double inducteur, dans la traversée de dalle, mais cette configuration qui place le stator externe en "doigt de gant" (Fig. 8-b) , est tributaire, comme la solution PEM autour de l'EI, des problèmes de dimensionnement thermique des bobinages et des risques de désamorçage du siphon d'alimentation créé par le conduit de la PEM.

d) Organisation EI-PEM superposés, PEM au-dessous (Fig.9)

Cet arrangement qui s'accommode aussi bien d'une circulation du sodium primaire à l'intérieur des tubes (Fig.9-a) que côté calandre (Fig. 9-b) est caractérisé par 3 points très favorables :

- la PEM est implantée au point froid, totalement immergée en sodium
- l'encombrement diamétral de la PEM est réduit, et il reste masqué par celui de l'E.I., tout en conservant une épaisseur de veine fluide faible dans l'entrefer
- le module se prête bien à un fonctionnement en circulation naturelle.

Cette disposition est par contre pénalisée par :

- les difficultés d'accessibilité de la pompe
- le fort encombrement vertical sous dalle, en dépit de l'emploi recommandé d'une PEM à double inducteur, encombrement que seules la remontée du module dans la dalle et l'adoption d'une cloche d'alimentation en sodium primaire pourraient limiter.

e) Conclusion partielle

L'analyse qualitative présentée dans les paragraphes précédents n'apporte pas d'éléments de choix décisifs, et même si des tendances se dessinent, il est nécessaire d'affiner les enseignements tirés de cette réflexion en réalisant des dimensionnements préliminaires qui quantifient les caractéristiques générales du module (encombrement - masse - rendement de la PEM).

6.3. Prédimensionnements fonctionnels du module EI-PEM

Ces prédimensionnements ont été réalisés pour trois configurations types :

- PEM autour de l'EI
- PEM en "doigt de gant" au-dessus de l'EI
- PEM au-dessous de l'EI,

dans le cadre d'un bloc réacteur dont les caractéristiques thermohydrauliques générales sont celles du Projet 1500, et sur lequel on implante 8 modules EI-PEM. Les données de calcul pour chaque module sont ainsi :

- | | |
|---|--------------------------------|
| - sodium primaire | débit = 2,7 m ³ /s. |
| | températures : 390 - 550°C |
| - sodium secondaire | débit = 2,25 m ³ /s |
| | températures : 345 - 525°C |
| - perte de charge du circuit primaire : 6 bar ; | |

la perte de charge primaire dans le faisceau d'échange est limitée à 2m de sodium (à 390°C).

Le dimensionnement électromagnétique des PEM immergées a été effectué en exécutant les deux étapes présentées dans le paragraphe 4.1. :

- dégrossissage avec le code analytique
- calcul "fin" avec le code aux éléments finis,

et en respectant les contraintes sur les risques de saturation des matériaux et sur l'échauffement des conducteurs ; ces contraintes ont conduit à adopter :

- une induction moyenne de 20 000 gauss dans les dents des stators
- une densité de courant de 0,7 A/mm² (sodium à 550°C) et 0,8 A/mm² (sodium à 390°C) dans les bobinages.

On est conduit à retenir une pompe à double inducteur, de longueur active l voisine de 3 m, pour les versions superposées, et une pompe à simple inducteur (l = 6,6 m) pour la solution concentrique.

Ces PEM ont été couplées avec des échangeurs intermédiaires courts (longueur du faisceau : 6,6 m) à circulation primaire à l'intérieur des tubes ; la configuration concentrique a également été envisagée avec un faisceau long (9,3 m), avec primaire côté calandre, pour limiter le diamètre d'encombrement du module EI-PEM.

Les caractéristiques principales des modules ainsi définis sont consignés dans le tableau 2 ; la hauteur sous dalle prend en compte une liaison module-tuyauterie d'alimentation du sommier par manchette oscillante, et le calage de niveau du composant assure, en situation de démarrage froid à 180°C, l'immersion d'un pôle de la PEM située au-dessus de l'EI et le noyage de la plaque supérieure de l'EI dans les deux autres configurations. On peut noter que :

- la configuration concentrique permet en fait un encombrement diamétral acceptable, mais elle se traduit par une pompe de masse prohibitive qui condamne la solution
- comparée à la version PEM au-dessous de l'EI, l'implantation de la pompe au-dessus de l'échangeur conduit, à diamètre hors tout voisin, à un encombrement vertical bien plus faible, mais elle s'accompagne pour la pompe d'un rendement inférieur de 8 points et d'une masse supérieure de 50 % ; en outre, son comportement thermique, sans refroidissement auxiliaire, reste problématique.

Finalement, à l'issue de cette phase quantitative, on propose de retenir la disposition PEM à double inducteur placé en point froid sous l'EI, arrangement qui procure le meilleur rendement (près de 50 %), le composant le plus léger, l'encombrement diamétral le plus faible et les sollicitations thermiques les moins contraignantes. Il convient toutefois d'en réduire la pénalisation axiale importante, même avec le primaire côté calandre. Un raccourcissement significatif du faisceau d'échange ou de la partie active de la PEM est irréaliste, et seules la remontée de l'EI dans la traversée de dalle et l'adoption conjointe d'une alimentation primaire par cloche argon fonctionnant en siphon permettent d'atteindre cet objectif ; un surcroît de protection biologique autour de la tête de l'échangeur sera, bien entendu, nécessaire.

6.4. Intégration du composant dans le bloc réacteur

La réflexion sur cette phase a été engagée avec la configuration proposée ci-dessus, mais elle est restée très partielle. Quelques éléments peuvent cependant être versés au dossier :

- la masse importante du module (110 t. hors protection biologique) et sa grande hauteur incitent à le concevoir en deux parties disjointes, ce qui impose un supportage distinct pour chacune de ces 2 parties
- l'implantation de la PEM, appareil lourd, en point bas semble mal s'accommoder d'un supportage par la dalle (tenue au séisme)
- la remontée du sodium primaire dans la traversée de dalle pose de nouveaux problèmes de protection biologique.

Sur la base de ces considérations, une configuration peut, d'ores et déjà, être avancée (Fig. 10). Elle est caractérisée par :

- un module en deux parties, avec étanchéité à la liaison par cloche argon
- un EI supporté par la dalle, avec circulation du primaire côté calandre
- une PEM posée par l'intermédiaire d'une virole support dans laquelle est disposée la "sphère" de refoulement de la pompe ; les fuites collecteur froid - collecteur chaud sont limitées par un labyrinthe, et un obturateur est prévu, solidaire du stator central
- une "casemate biologique" autour de la tête de l'EI ; la protection thermique indispensable pour la cuve principale est envisageable par un calorifuge sodium.

L'analyse de cette configuration doit être poursuivie, et la réflexion générique sur l'implantation du module dans le bloc réacteur mérite d'être développée et éventuellement étendue à d'autres dispositions constructives.

6.5 - Actions complémentaires à entreprendre

Les actions complémentaires pour étayer la viabilité du concept EI-PEM se situent sur deux plans :

- justification préliminaire de l'intérêt technico-économique de la solution
- validation des options fondamentales du projet par la mise en oeuvre d'un programme de R et D important.

La première phase reconduirait une démarche analogue à celle engagée pour l'adoption de PEM refroidies sur le circuit intermédiaire ; elle s'attacherait essentiellement à :

- mieux définir le module et son comportement thermomécanique
- cerner l'impact direct sur la conception et la géométrie du bloc réacteur
- déterminer les conséquences de l'adoption de ce composant sur le fonctionnement général de la centrale en situation normale, incidentelle ou accidentelle
- évaluer économiquement l'ensemble de la solution.

La deuxième phase, de caractère plus fondamental, viserait à :

- qualifier, sous l'aspect fonctionnement/sûreté, l'alimentation de l'EI par cloche argon et le système d'obturation retenu,
- assurer le développement industriel de PEM immergées de grande taille.

Cette action s'appuierait sur le programme de R et D proposé pour les pompes refroidies et en reconduirait les étapes principales ; un aspect spécifique devrait cependant être approfondi : développement des bobinages haute tem-

7 - CONCLUSION

Les études générales détaillées dans cette communication indiquent que l'introduction de PEM sur le circuit intermédiaire d'un réacteur à neutrons rapides n'entraîne qu'une baisse très limitée du rendement de la centrale. Cette perte de rendement due à la surconsommation électrique des PEM devrait être compensée par un coût d'investissement moindre, et compte tenu des autres avantages pressentis pour ce composant, la fiabilité notamment, leur adoption sur le circuit intermédiaire semble raisonnable. Celle-ci est toutefois tributaire de la mise en oeuvre d'un programme de R et D important qui viserait à assurer le développement industriel et la qualification de telles PEM (refroidies et de grande puissance). Ce programme envisage la réalisation et l'expérimentation d'une unité prototype après des études approfondies de conception, de dimensionnement et d'exécution qui intégreront les enseignements tirés d'une phase intermédiaire consacrée à la validation d'une PEM de 600 m³/h ; l'ensemble de cette action pourrait être achevée en 5 - 6 ans.

Les réflexions menées sur l'adoption d'une PEM pour assurer la fonction pompage primaire dans un concept intégré ont conduit à définir le module EI-PEM où la pompe immergée, sans refroidissement auxiliaire est couplée à l'échangeur intermédiaire.

L'analyse effectuée sur différentes configurations envisageables pour le module et les premiers dimensionnements réalisés au cours de l'étude ont fait ressortir la disposition la plus prometteuse à priori : PEM placée en point froid sous un EI dont une alimentation en sodium primaire par cloche argon permet la remontée dans la traversée de dalle. Pour étayer la viabilité de cette solution, des actions complémentaires se révèlent indispensables et se situent sur deux plans :

- justification préliminaire de l'intérêt technico-économique de la solution : définition plus précise du concept, impact sur le bloc réacteur, conséquences sur le fonctionnement général de la centrale
- validation des options fondamentales du projet, démonstration de sa faisabilité, vérification de ses performances.

En tout état de cause, le développement du module EI-PEM passe par la mise au point préalable, et pour application industrielle, de bobinages fiables en fonctionnement à haute température, et il ne peut être espéré avant une dizaine d'années.

TABLEAU I
Bilans énergétiques (kw) et incidences sur
les surfaces d'échange S

Paramètre	Hypothèse	Cycle Na-2 conservé à	
		EI	GV
Surpuissance de pompage			
- eau/vapeur		100	100
- secondaire	(1)	15	50
	(2)	4763	4763
Puissance de ventilation PEM		100	100
Energie électrique récupérée (3)		1623	1638
Défaut net de puissance électrique		3355	3375
$\left(\frac{\Delta S}{S}\right)$ EI (%)		0	2,4
$\left(\frac{\Delta S}{S}\right)$ GV (%)		2,4	1

(1) dues aux variations de débits et de pertes de charge

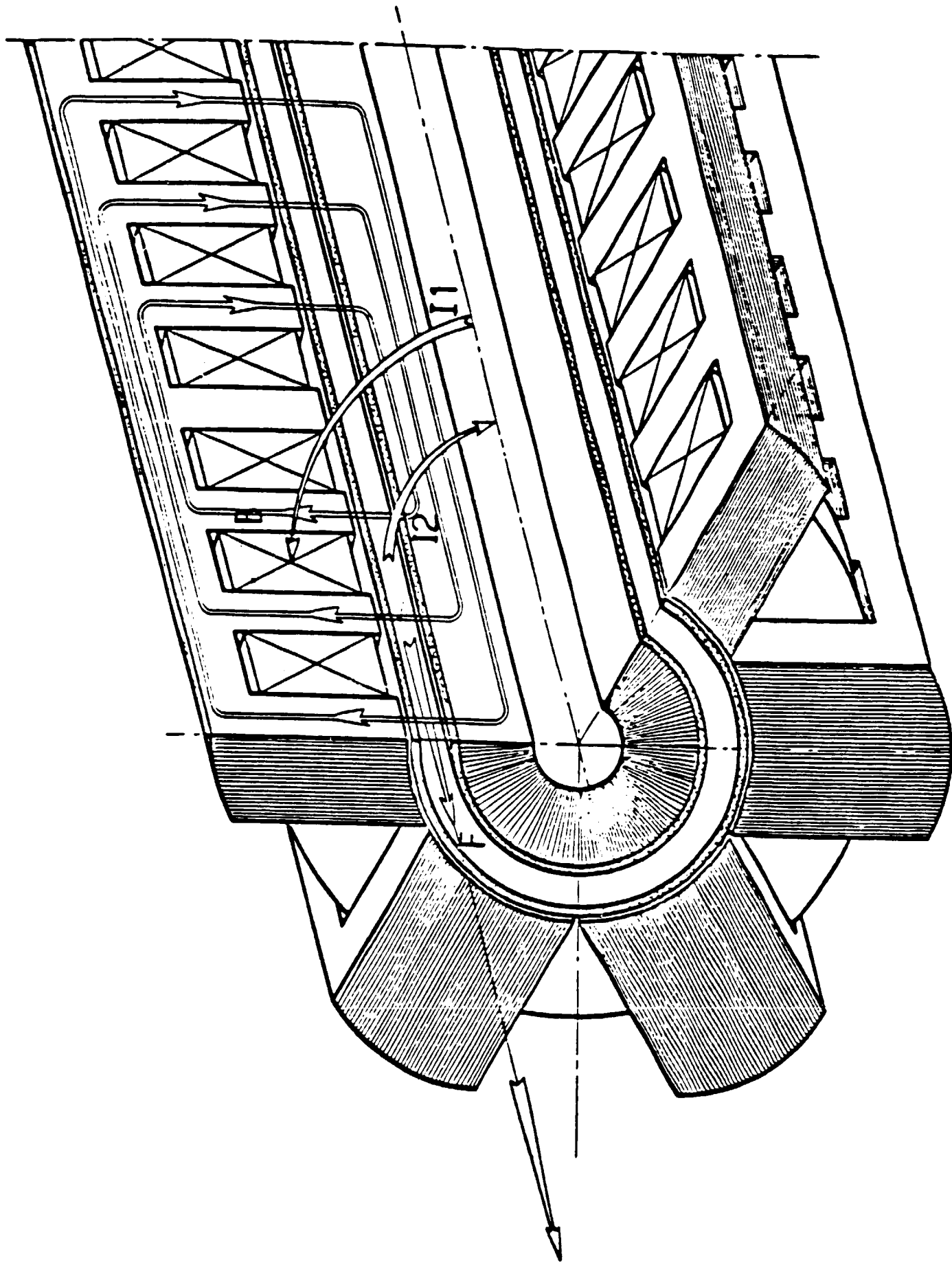
(2) due aux rendement de la PEM (service hydraulique constant)

(3) relative à l'excédent thermique injecté par la PEM

TABEAU 2
Caractéristiques générales des modules EI-PEM

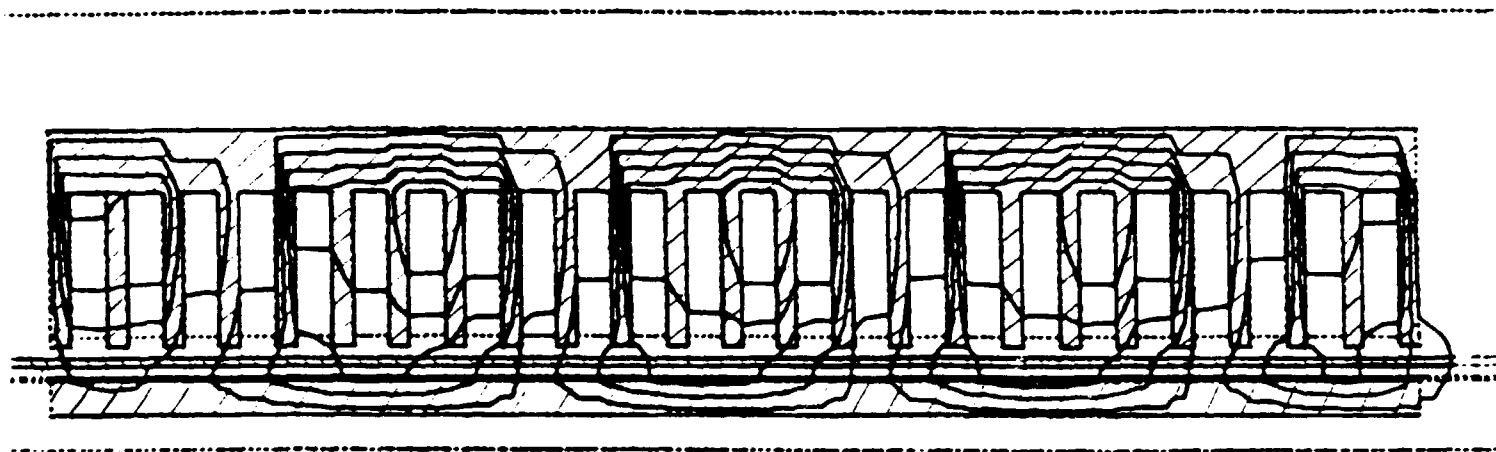
Caractéristique		Configuration		PEM	PEM	PEM
				autour de l'EI (en point chaud)	au-dessus de l'EI (en point chaud)	au-dessous de l'EI (en point froid)
Partie PEM	Nature	Simple inducteur		double inducteur		double inducteur
	Nombre de pôles	13		6		6
	Rendement	0,39		0,39		0,47
	Masse (t)	155	136	87		56
Partie EI	Circulation primaire	int. tube	ext. tube	intérieur tube		intérieur tube
	Ø extérieur faisceau (mm)	2350	1980	2350		2350
	Distance entre plaques (mm)	6600	9300	6600		6600
Module	Hauteur sous dalle (mm) *	14000	16500	14500		18000
	Encombrement diamétral (mm)	3320	2950	2790		2770

* jusqu'à l'axe de refoulement dans le sommier

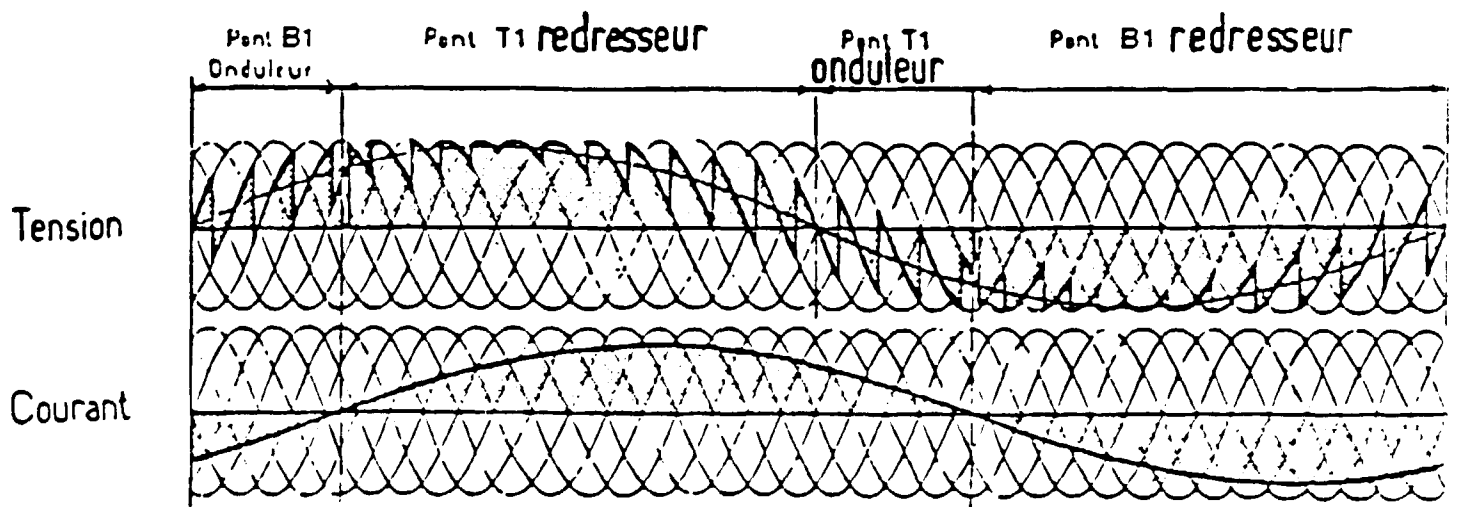


SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE PEM

Figure 1



LIGNES DE CHAMP DANS UNE PEM



SIMULATION DU FONCTIONNEMENT D'UN CYCLOCONVERTISSEUR

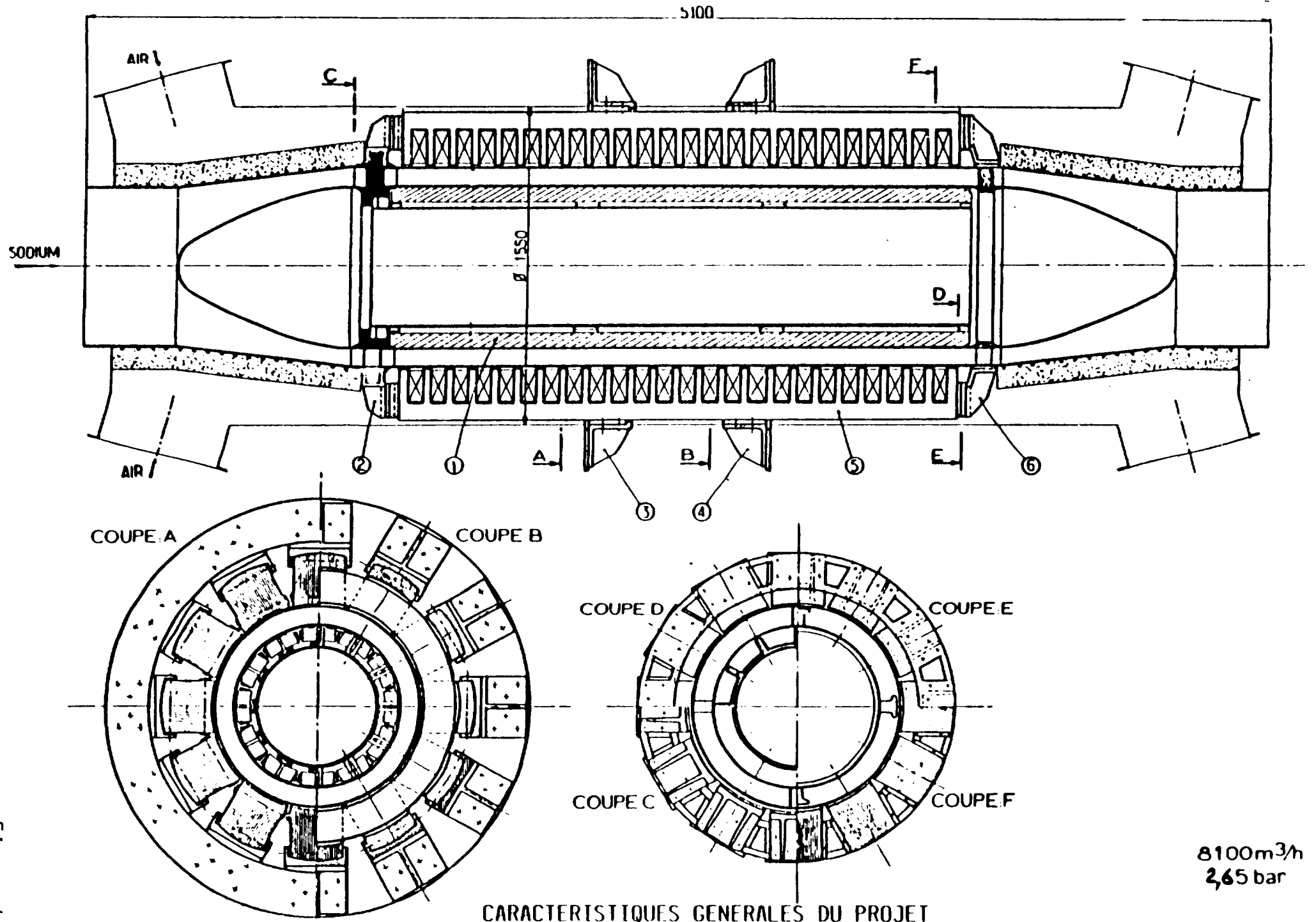


Figure 4

POMPE 8100 m³/h 265bars

PERTES ET RENDEMENTS

PERTES DU CYCLOCONVERTISSEUR
D'ALIMENTATION STATIQUE

4

0,5

PUISSANCE ABSORBEE
PAR LA VENTILATION

8,5

PUISSANCE EVACUEE
PAR LA VENTILATION

PERTES JOULE DANS
LES BOBINAGES ET
PERTES FER

PUISSANCE THERMIQUE
EXTRAITE DU SODIUM
PAR LA VENTILATION

PUISSANCE ABSORBEE

100

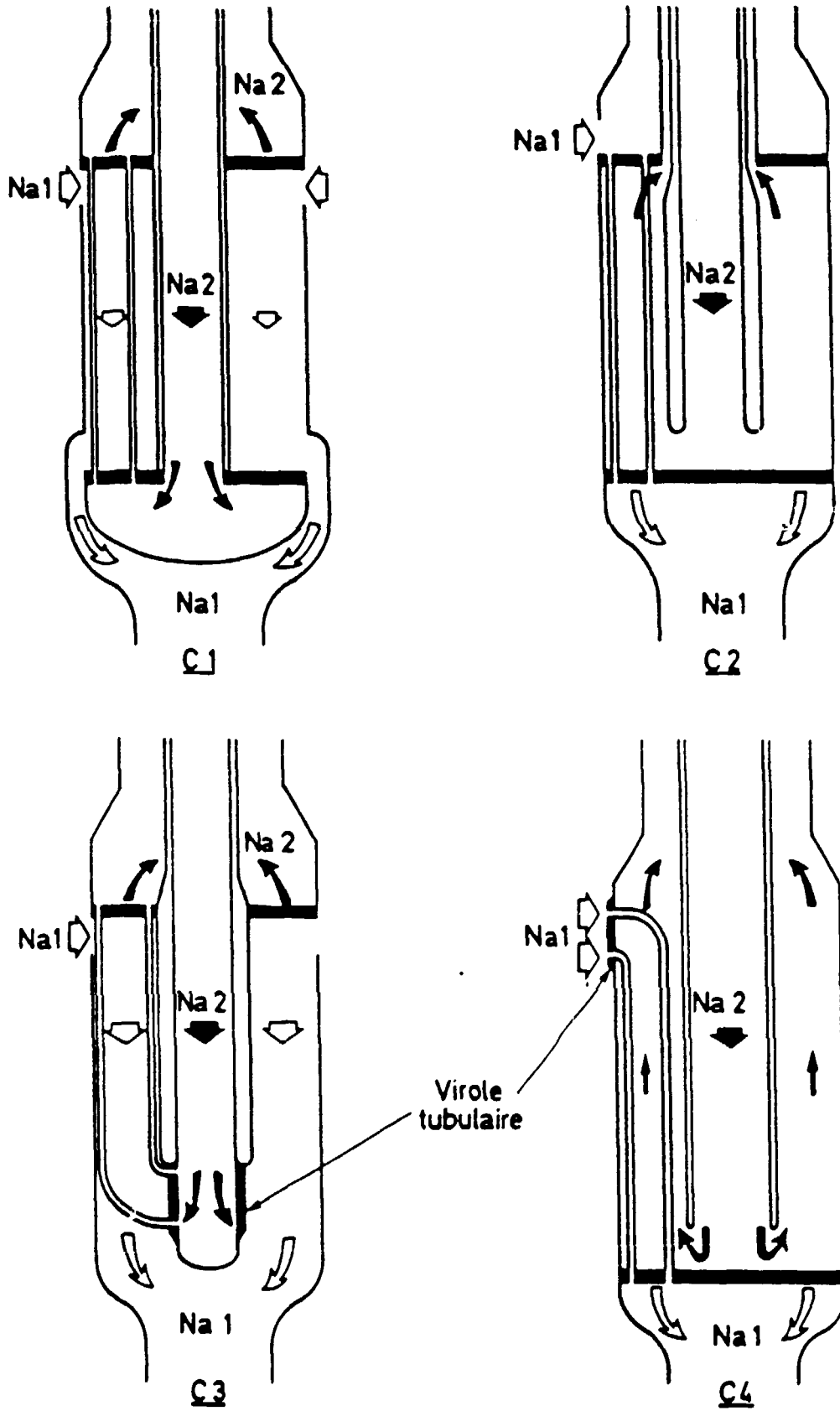
43

PUISSANCE
DE POMPAGE

PUISSANCE THERMIQUE
REINJECTEE A LA CENTRALE

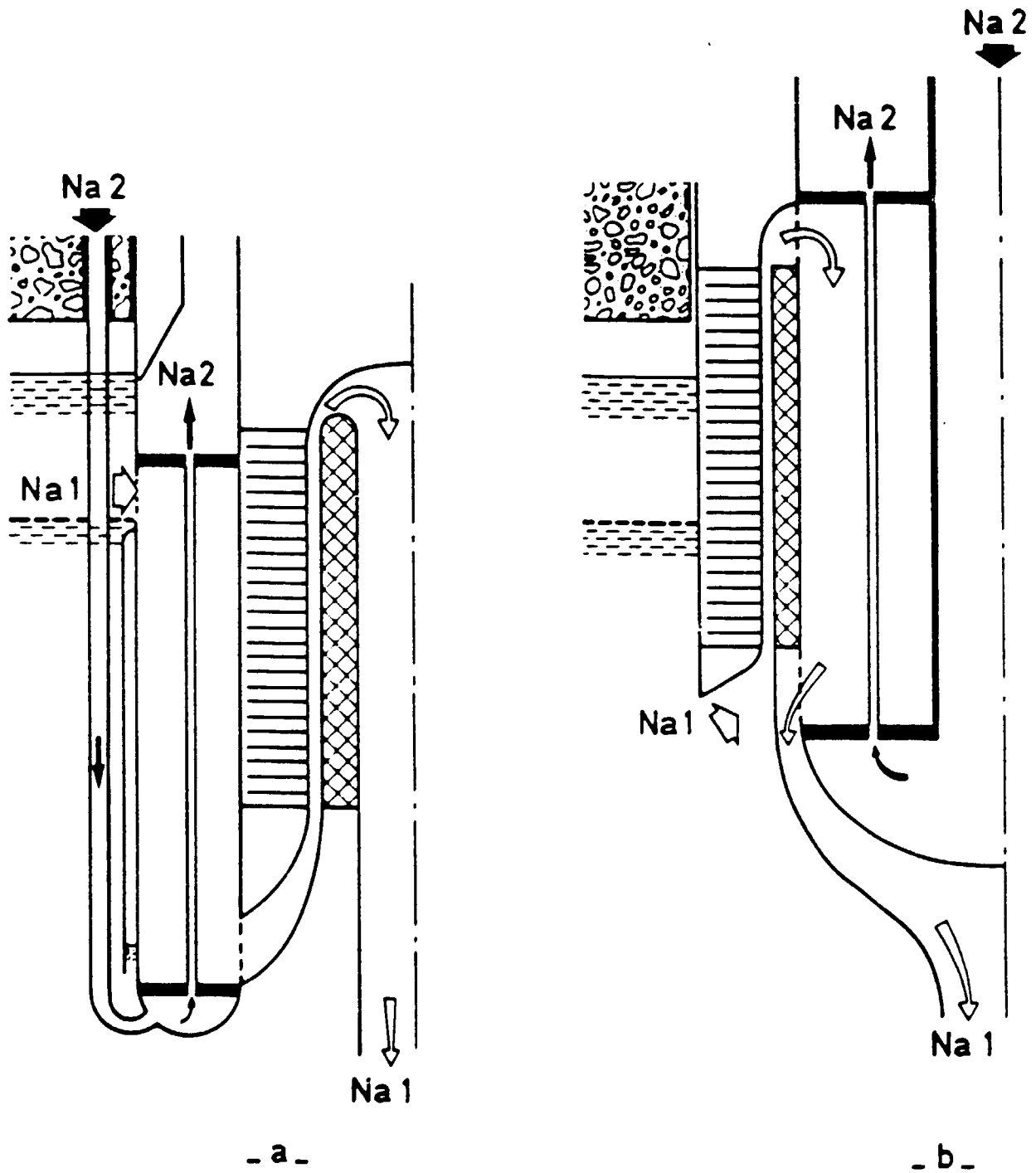
44

PERTES PROVOQUANT UN APPORT
DE CHALEUR AU SODIUM.

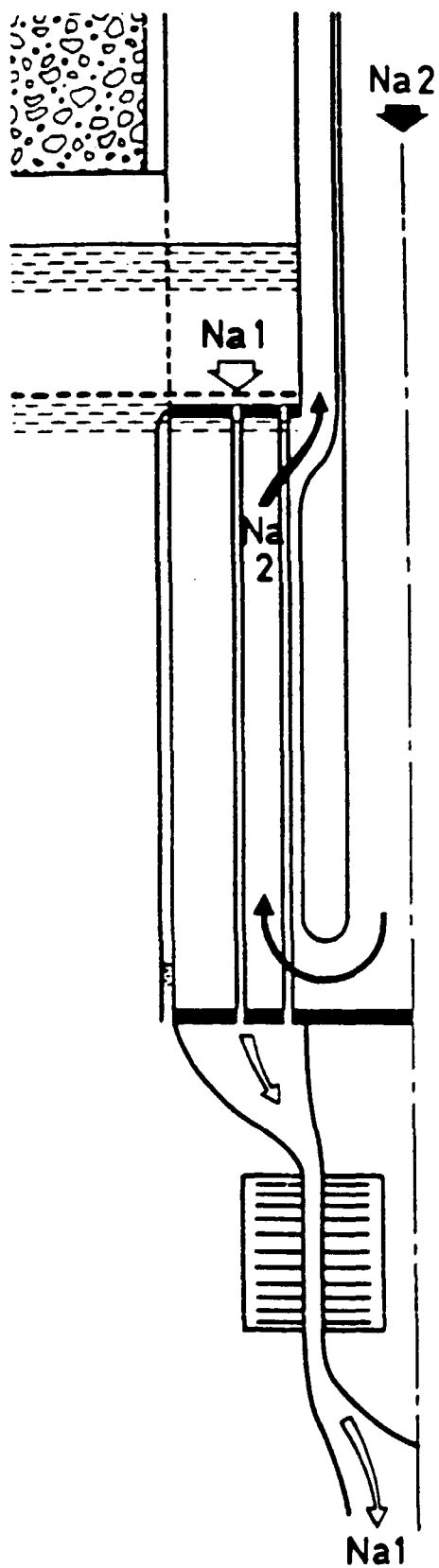


ORGANISATION DU FAISCEAU
D'ÉCHANGE ET DES CIRCULATIONS SODIUM

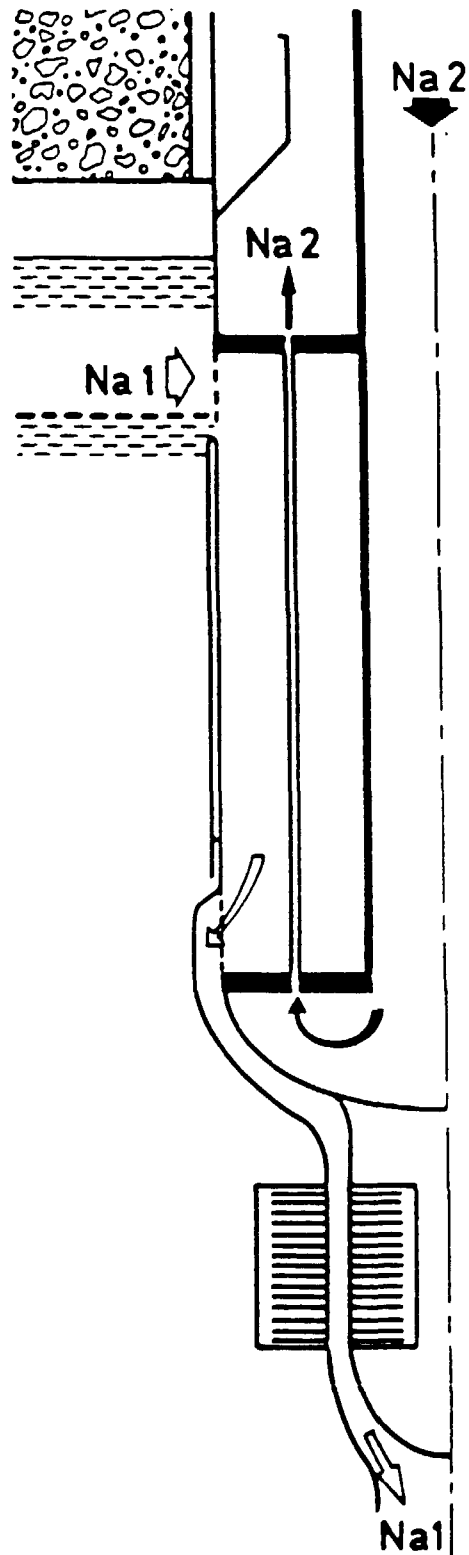
Figure 6



MODULE E1. PEM: CONFIGURATIONS CONCENTRIQUES

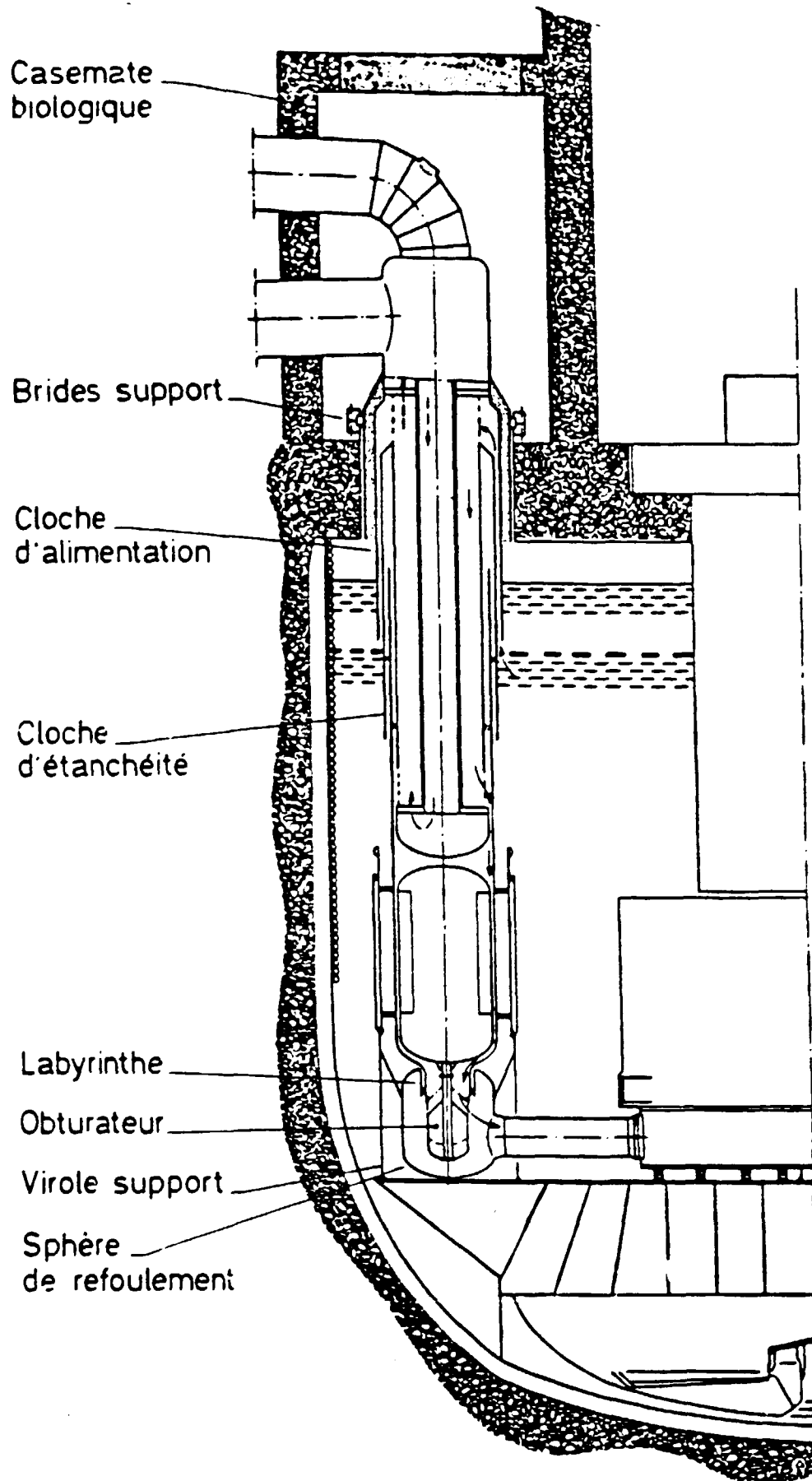


- a -



- b -

MODULE E1 - PEM : CONFIGURATIONS PEM EN DESSOUS Figure 9



IMPLANTATION DU MODULE EI.PEM
 DANS LA CUVE PRINCIPALE DU REACTEUR

Figure 10