

EUR 4042 f

LIBRARY

COMMUNAUTE EUROPEENNE DE L'ENERGIE ATOMIQUE - EURATOM

MECANISMES DE CONTROLE DE LA
REACTIVITE D'UN
REACTEUR ORGEL DE 250 MWe

par

J. NOAILLY et H. SCHEURER

1968



Projet ORGEL

Centre Commun de Recherche Nucléaire
Etablissement d'Ispra - Italie

AVERTISSEMENT

Le présent document a été élaboré sous les auspices de la Commission des Communautés Européennes.

Il est précisé que la Commission des Communautés Européennes, ses contractants, ou toute autre personne agissant en leur nom :

ne garantissent pas l'exactitude ou le caractère complet des informations contenues dans ce document, ni que l'utilisation d'une information, d'un équipement, d'une méthode ou d'un procédé quelconque décrits dans le présent document ne porte pas atteinte à des droits privatifs;

n'assument aucune responsabilité pour les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation d'informations, d'équipements, de méthodes ou procédés décrits dans le présent document.

Ce rapport est vendu dans les bureaux de vente indiqués en 4^e page de couverture

au prix de FF 8,50

FB 85,—

DM 6,80

Lit. 1 060

Fl. 6,20

Prière de mentionner, lors de toute commande, le numéro EUR et le titre qui figurent sur la couverture de chaque rapport.

Imprimé par Guyot, s.a.
Bruxelles, juillet 1968

Le présent document a été reproduit à partir de la meilleure copie disponible.

EUR 4042 f

COMMUNAUTE EUROPEENNE DE L'ENERGIE ATOMIQUE - EURATOM

MECANISMES DE CONTROLE DE LA
REACTIVITE D'UN
REACTEUR ORGEL DE 250 MWe

par

J. NOAILLY et H. SCHEURER

1968



Projet ORGEL

Centre Commun de Recherche Nucléaire
Etablissement d'Ispra - Italie

RESUME

Ce rapport est une synthèse des différentes études, entreprises dans le cadre du Programme ORGEL, se rapportant aux moyens de contrôle d'un réacteur de 250 MWe bien défini. Le pilotage du réacteur est assuré par un système de barres mécaniques ou gazeuses (barres à hélium), son arrêt d'urgence par un système de barres liquides (dont deux versions ont été étudiées) ou gazeuses également, la compensation de ses variations de réactivité les plus grandes et les plus lentes par un système d'empoisonnement du modérateur (par le sulfate de cadmium). On décrit le fonctionnement et l'on donne les spécifications de ces différents systèmes de contrôle. D'autres solutions que celles rapportées dans ce rapport pourraient être envisagées mais, plus que des exemples de calcul, cette étude présente une méthode et peut ainsi servir de base pour tout choix et dimensionnement éventuels des systèmes de contrôle d'un réacteur de type ORGEL.

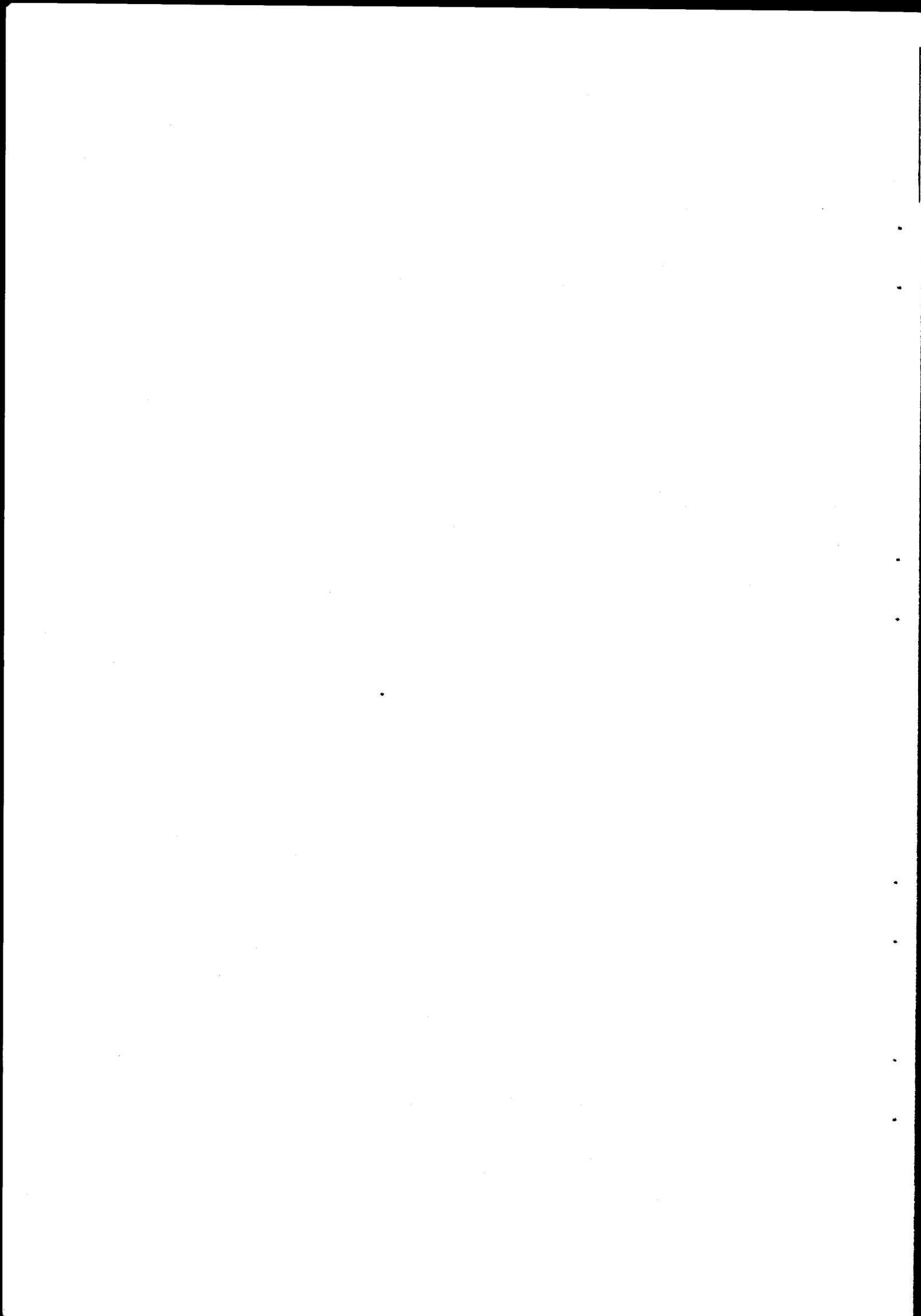
MOTS-CLES

ORGEL REACTOR
CONTROL ELEMENTS
SHIM RODS
SHUTDOWN
RODS
GASES

LIQUIDS
HELIUM
REACTIVITY
MODERATORS
POISONING
CADMIUM SULFATES

Table des matières

1.	Avant-propos	5
2.	Introduction	5
3.	Caractéristiques du réacteur considéré	7
4.	Hypothèses de marche de la centrale	9
5.	Système de barres de régulation	11
	5.1. Fonction	11
	5.2. Bases pour les spécifications des barres	18
	5.3. Bases pour les spécifications des chaînes de régulation	21
6.	Système d'empoisonnement	22
	6.1. Fonction	22
	6.2. Bases pour ses spécifications	24
7.	Système de barres de sécurité	26
	7.1. Fonction	26
	7.2. Bases pour ses spécifications	27
8.	Solutions étudiées	28
	8.1. Systèmes de barres de régulation	28
	8.2. Système d'empoisonnement du modérateur	36
	8.3. Systèmes de barres de sécurité	41
9.	Remarques	49



MECANISMES DE CONTROLE DE LA REACTIVITE
D'UN REACTEUR ORGEL DE 250 MWe⁽⁺⁾

1. Avant-propos

Ce rapport est une synthèse des différentes études, entreprises dans le cadre du Programme ORGEL, se rapportant aux moyens de contrôle d'un réacteur de 250 MWe. Ces études se réfèrent à une variante de réacteur bien spécifique, cependant, plus qu'un exemple de calcul, elles présentent une méthode, et peuvent ainsi servir de base pour tout choix et dimensionnement éventuels des systèmes de contrôle d'un réacteur ORGEL.

2. Introduction

Les mécanismes de contrôle de la réactivité doivent assurer trois types de fonctions :

- une fonction de régulation chargée du maintien de la puissance du réacteur autour de sa valeur de consigne ou de sa variation lente et contrôlée
- une fonction de compensation des variations de réactivité les plus amples et les plus lentes entraînées par l'exploitation de la centrale
- une fonction de sécurité en marche et à l'arrêt de la centrale.

Dans chacun de ces cas les variations de réactivité à contrebalancer diffèrent par leur amplitude, leur vitesse et leur

⁽⁺⁾ Manuscrit reçu le 6 mai 1968.

fréquence, en gros et de façon très schématique, de la manière décrite dans le tableau suivant :

Définition des variations de réactivité à contrôler	amplitude	vitesse	fréquence
Fonction de régulation	faible	très rapide	très rapide
Fonction de compensation	grande	faible	très grande
Fonction de sécurité	très grande	très rapide	très faible et aléatoire

Pour répondre à des exigences aussi diversifiées trois types de mécanismes de contrôle bien spécifiques ont été choisis :

- un système de barres de régulation
- un système d'empoisonnement du modérateur
- un système de barres de sécurité

En réalité, le plus souvent, ils présenteront des fonctions communes ou combinées.

3. Caractéristiques du réacteur considéré :

Les études faites se rapportent à un réacteur ORGEL de 250 MWe dont nous rappelons ci-après les caractéristiques nécessaires à la bonne compréhension de ce rapport :

Puissance thermique extraite par le réfrigérant :	763 MW
Axe :	vertical
Circulation du réfrigérant :	descendante
Hauteur du coeur (+ réflecteurs) :	460 cm
Diamètre du coeur (+ réflecteurs) :	442 cm
Nombre de canaux :	156
Nombre de grappes par canal :	5
Nombre de crayons par grappe :	19
Diamètre du crayon combustible (UC) :	1,45 cm
Section combustible :	31 cm ²
Section réfrigérant (Terphényle OM2) :	22 cm ²
Section gainage (SAP) :	12 cm ²
Rapport en volume du modérateur au combustible :	15,6
Température d'entrée du réfrigérant :	246 °C
Température de sortie du réfrigérant :	370 °C
Puissance thermique transmise à l'eau lourde :	43 MW
Température d'entrée du modérateur :	50 °C
Température de sortie du modérateur :	80 °C
Coeur initial :	
Coefficient de température du réfrigérant :	- 0,25 p.c.m/°C
Coefficient de température du combustible :	- 1,5 p.c.m/°C
Coefficient de température du modérateur :	- 4 p.c.m/°C
Coefficient de puissance :	- 8 p.c.m/%

Coeur d'équilibre :

Coefficient de température du réfrigérant : + 5 p.c.m/°C
Coefficient de température du combustible : - 0,45 p.c.m/°C
Coefficient de température du modérateur : + 3,3 p.c.m/°C
Coefficient de puissance : + 0,25 p.c.m/%

Coefficient de vide maximum
(vidange complète du réfrigérant) : - 3600 p.c.m.

Durée de vie des neutrons : $l = 5,4 \cdot 10^{-4}$ s

Rendement moyen total des neutrons retardés : $\beta = 395,5$ p.c.m.

Constante de déclin pour un groupe
moyenné de neutrons retardés : $\lambda = 0,073$ s⁻¹

Machine de chargement :

Position : au dessus du
coeur

Mouvement du combustible : bidirectionnel
avec chargement
et déchargement
du combustible
en 2x5 séquences

Vitesse de manutention de la grappe : 10 cm/s

Ce réacteur ne présente pas d'oscillations xénon, un système de compensation réparti sur le coeur n'est donc pas à prévoir mais le problème pourrait se poser pour un réacteur de plus grande taille [1].

4. Hypothèses de marche de la centrale :

Ces hypothèses sont fondamentales pour la détermination des variations et des gradients de réactivité dus aux effets de température ; elles définissent la zone de fonctionnement normal objet des études de dynamique de l'installation de puissance.

4.1. Zone de fonctionnement normal : 100-75 % de la puissance :

Ce réacteur est employé uniquement à la production d'électricité : le premier signal contrôlant l'installation de puissance est la demande de puissance électrique du réseau ; il s'agit cependant d'une centrale de base fonctionnant normalement à pleine puissance et seulement pendant de courtes périodes à puissance réduite jusqu'à 75 % environ de sa puissance nominale ; ces variations de puissance sont programmées par avance et se font à vitesse lente dont la valeur maximale a été préfixée à 5 %/mn^(x).

(x) Cette valeur s'est révélée par la suite trop forte, les études de dynamique [2] et [3] ont montré que la variation de puissance devait être inférieure à 2 %/mn pour ne pas dépasser un gradient en température de 3 °C/mn pour la vapeur à l'entrée de la turbine.

4.2. Conditions après un arrêt prolongé :

Les conditions normales de la centrale après un arrêt prolongé (supérieur à deux jours) sont les suivantes :

- la température du réfrigérant primaire est maintenue à 200 °C par un circuit de refroidissement de secours
- la température du modérateur est à 20°C
- l'empoisonnement xénon est nul
- l'antiréactivité à l'arrêt est de 4 % (supérieure au coefficient de vide maximum).

4.3. Conditions de montée en puissance :

- De la criticité à 5 % de la puissance

Les opérations de montée en puissance se font en tenant compte du fait que le gradient de température de l'organique ne doit pas excéder 2 °C/mn ce qui nécessite, suivant le programme de marche de la centrale, 40 minutes (cf. fig. 1).

- Vers 5 % de la puissance

Cette zone de fonctionnement (qui pourrait être étendue jusqu'à 20 %) constitue un palier d'attente de la montée en puissance : la vapeur produite sert alors à préchauffer la turbine mise en rotation (l'excès étant rejeté à l'atmosphère ou stocké).

- De 5 à 100 % de la puissance

La montée en puissance se fait à raison de 5 % mn. Le programme de marche est à température moyenne constante à partir de 75 %. Vers 30 % les chaînes de contrôle du démarrage de la centrale (qui n'ont pas été étudiées) commutent avec celles du fonctionnement normal.

5. Système de barres de régulation :

5.1. Fonction :

5.1.1. Régulation de puissance :

Les chaînes de régulation doivent permettre d'assurer :

- la stabilisation de la puissance à tout niveau de consigne
- la variation lente et contrôlée de la puissance suivant un programme de marche de la centrale déterminé.

Les études de dynamique $\overline{[2]}$ et $\overline{[3]}$ ont permis de déterminer la nature et la constitution de ces chaînes de régulation.

a) Stabilisation de la puissance :

Le système de régulation doit stabiliser la puissance du réacteur à tout niveau en s'opposant aux effets des perturbations rapides de réactivité dues :

- au bruit de fond du réacteur provenant des variations statistiques du flux (de l'ordre de 1/10.000 pour ce type de réacteur), de variations faibles et de haute fréquence du débit. Les barres doivent être rendues insensibles au bruit de fond par leur seuil de précision de l'ordre du p.c.m.
- à la manutention du combustible nécessaire pour compenser son usure ; ces variations dépendant essentiellement du type de cycle de combustible choisi, les gradients sont fonction de la vitesse des éléments. Dans le cas étudié il s'agit d'un cycle axial bidirectionnel, avec une seule machine de chargement, la vitesse des éléments étant de 10 cm/s : à chaque manutention un canal se trouve entièrement vidé de son combustible (alors que deux canaux se trouveraient vides dans le même temps en

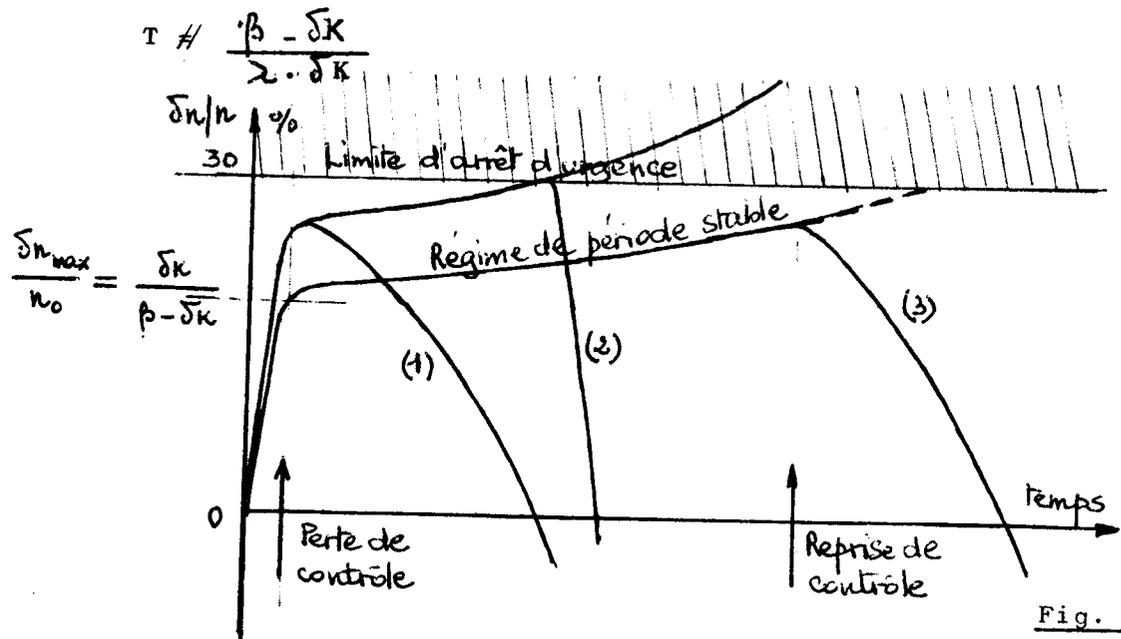
cas de shuffling radial), le déchargement total du canal central entraîne ainsi une variation d'antiréactivité de - 110 p.c.m. au taux maximum de - 5 p.c.m/s, le chargement de ce même canal d'une grappe neuve et de quatre grappes irradiées apporte alors une variation maximale de + 140 p.c.m. au taux maximal de + 5 p.c.m/s, la réactivité gagnée par cette manutention est donc de + 30 p.c.m.

- à certains accidents de réactivité qui ne doivent pas entraîner l'arrêt d'urgence du réacteur.

Supposons en effet qu'il y ait arrêt d'urgence automatique lorsque la puissance atteint 130 % de sa valeur nominale ; pour une variation en échelon de réactivité δK (avec $\delta K < \beta$: rendement moyenné total des neutrons retardés) ce niveau est atteint lors du transitoire initial de puissance pour :

$$\delta K = \frac{\beta \cdot \delta n/n_0}{1 + \delta n/n_0}$$

où $\delta n/n_0$ est la variation relative de puissance, soit pour $\delta K = 90$ p.c.m ; si contrairement à notre hypothèse, il n'y avait pas arrêt d'urgence la puissance croîtrait suivant une loi exponentielle à période stable relativement grande de l'ordre de 40 égale à :



Si l'échelon de réactivité est inférieur à 90 p.c.m. le système de contrôle rattrape la variation de puissance sensiblement au niveau ^(x) donné par $\frac{\delta n}{n_0} = \frac{\delta k}{\beta - \delta k}$ (courbe (1) de la fig. 5.1.) ; si le système de contrôle ne réagit pas il y aura arrêt d'urgence à 130 % de la puissance (courbe (2) de la fig. 5.1.) ; si le système de contrôle ne marche pas, par panne d'électronique par exemple, mais que le doublement de l'appareillage soit prévu et que la commutation ait lieu même après plusieurs secondes le système de contrôle pourra rattraper la dérivation de la puissance (courbe (3) de la fig 5.1.) si, bien entendu, l'amplitude de l'échelon est suffisamment inférieure à la limite de 90 p.c.m.

On voit donc que ces accidents concernent des échelons de réactivité inférieurs environ à 100 p.c.m, ce sont par exemple (xx) :

- la chute d'une grappe combustible dans le canal lors de la manutention du combustible (50 p.c.m. en échelon)
- une augmentation intempestive de la température d'entrée du réfrigérant fixée arbitrairement à 10 °C (due par exemple à un manque de débit d'eau dans le circuit secondaire), le coefficient de température du réfrigérant étant positif (+ 5 p.c.m/°C).

(x) De même si l'on tient compte de l'influence des coefficients de température, la constante de temps du pic initial étant petite devant la constante de temps d'échauffement du barreau combustible.

(xx) Exemples de calcul retenus lors de l'étude dynamique de la centrale.

b) Changements de puissance dans la zone de fonctionnement nominal de 100 à 75 % (5%/mn).

Les variations de réactivité demandées au système de régulation sont dues aux effets suivants :

- Effets de température :

Les changements de réactivité dépendent directement du type de programme de marche choisi pour la centrale. Pour le programme à température moyenne constante on obtient les valeurs suivantes :

	Variation de réactivité	Taux maximum
Coeur initial	+ 35 p.c.m.	+ 7 p.c.m/mn
Coeur d'équilibre	+ 40 p.c.m.	+ 8 p.c.m/mn

- Effets xénon :

Pour un changement de puissance de 100 à 75 % à raison de 5 %/mn le transitoire xénon entraîne une variation d'anti-réactivité de - 650 p.c.m. au taux maximum de - 20 p.c.m/mn (fig. 2) l'équilibre sera atteint au bout de 30 heures (+ 50 p.c.m). Le système de régulation a ici un rôle de compensation. Ce rôle sera repris en tout ou en partie par le système d'empoisonnement.

5.1.2. Arrêt et démarrage de la centrale :

- L'enfoncement des barres à leur vitesse maximale permet l'arrêt le plus rapide du réacteur en cas d'urgence (en dehors de l'utilisation des barres de sécurité). Par exemple l'enfoncement des barres de 300 p.c.m. à raison de 15 p.c.m/s fait chuter la puissance de 50 % en 10 s environ, ces 300 p.c.m. d'antiréactivité injectés en revanche en échelon font chuter la puissance quasi instantanément de $-\delta n/n_0 = \frac{\delta K}{\beta - \delta K} = 43 \%$ (il faudrait - 3600 p.c.m. pour la faire chuter instantanément de 90 %).

Le démarrage du réacteur est une opération en revanche beaucoup moins triviale ; avant chaque démarrage les conditions initiales sont très mal connues car elles dépendent à chaque fois du passé du réacteur, ce sont :

- Le flux neutronique résiduel provenant de différentes sources : neutrons retardés, fissions spontanées de l'uranium (seule source lors du premier démarrage avec combustible neuf; très faible, elle est de l'ordre du mW), photoréactions sur le deutérium source très supérieure à la précédente et qui dépend de façon complexe de la vie du réacteur
- La marge d'antiréactivité rendant le réacteur sous-critique, par suite de l'empoisonnement xénon résiduel, de l'imprécision du système d'injection de poison, ...

Cependant on pourra toujours insérer dans le réacteur une source artificielle de neutrons (à puissance de l'ordre de 100 W par exemple) et c'est la multiplication de son flux qui sera observée au cours de la période de démarrage par les instruments de détection (au moins pour le premier démarrage)..

D'autre part la puissance à la divergence ne dépend pas de l'antiréactivité initiale, elle ne dépend que de la vitesse de retrait de cette antiréactivité, elle sera d'autant plus grande que cette vitesse sera plus faible.

Le passage du réacteur à la criticalité (par observation de la puissance à la divergence) se fera donc par retrait du poison, avec la marge d'antiréactivité d'arrêt choisie et la vitesse de retrait du poison possible (voir 8.2.3) cette opération demande au minimum $\frac{1}{2}$ heure et la puissance à la divergence est alors environ $50^{(x)}$ fois la puissance résiduelle neutronique. Une difficulté est due à la non-linéarité du système de dépoisonnement : les barres de régulation devront jouer un rôle de réglage dans ce cas. Le passage ensuite du réacteur de la criticalité à la pleine puissance, suivant une période stable d'une minute demande théoriquement $\frac{1}{4}$ d'heure (6 décades à couvrir environ) et 60 p.c.m. de réactivité aux barres, en réalité il s'agit d'une installation de puissance et ce ne sont plus des considérations neutroniques mais des problèmes d'échange de chaleur qui gouverneront la rapidité de cette montée en puissance (voir chapitre 4) et la réduiront.

(*) Ce rapport est donné par $\rho_0 \sqrt{\frac{\kappa}{2\alpha\beta}}$ où ρ_0 est l'antiréactivité initiale, α la vitesse de retrait de cette antiréactivité, $\bar{\lambda}$ la vie moyenne virtuelle des neutrons
 $\bar{\lambda} \approx 1 + \sum \beta_i / \lambda_i$ ($5,5 \cdot 10^{-2}$ s. dans notre cas) [4]

5.1.3. Régulation fine de l'antiréactivité fournie par le système d'empoisonnement.

L'empoisonnement du modérateur est asservi à la position des barres de manière à ce que celles-ci reviennent toujours à leur position d'équilibre nominale : ainsi lorsque la barre initialement à sa position d'équilibre se retire du coeur d'une quantité $+\Delta\rho_1$ par suite d'une variation d'antiréactivité interne au réacteur $-\Delta\rho_1$ le système d'épuration doit entrer automatiquement en fonctionnement pour ramener la barre à sa position d'équilibre, de même l'enfoncement de la barre de la quantité $-\Delta\rho_2$ doit commander le démarrage du système d'injection de poison ; la quantité $(\Delta\rho_1 + \Delta\rho_2)$ définit ainsi une largeur de bande de variations de réactivité, autour de la position d'équilibre des barres, à l'intérieur de laquelle le système de compensation n'est pas sensible ; l'exploitation de la centrale permettra de définir un optimum pour cette bande.

Lorsque les deux systèmes sont en fonctionnement le système de barres doit soulager le système d'empoisonnement aux caractéristiques dynamiques pauvres lorsqu'il s'agit :

- de rattraper les variations trop rapides, en particulier d'antiréactivité (cf. fig. 11)
- de compenser les irrégularités dans l'injection du poison (chapitre 8.2.2.) (cf. fig. 15).

5.2. Bases pour les spécifications des barres de régulation :

Les spécifications du système de barres doivent se fonder sur les bases et les observations suivantes :

- a) Les gammes de réactivité à contrôler définies précédemment et réunies fig. 3 ; toutefois pour éviter de trop fortes dépressions du flux et par là des pénalisations sur les facteurs de forme du coeur la plage de réactivité du système de barres doit être la plus faible possible. C'est pourquoi il serait préférable de contrebalancer le transitoire xenon entre 100 et 75 % de la puissance par le système d'empoisonnement, cependant nous verrons que l'utilisation de barres gazeuses très nombreuses et dont la répartition sur le coeur ne pose pas de problèmes d'encombrement pourrait remédier en partie à ces défauts, mais elles présentent aussi certains inconvénients (problèmes de coûts notamment).

- b) Une règle de sécurité voudrait que la marge de réactivité des barres soit inférieure à $\beta \simeq 400$ p.c.m. pour éviter que le réacteur ne devienne critique prompt au cas où toutes les barres seraient retirées du coeur, cette règle prend d'autant plus d'importance que le réacteur est instable et que l'effet Doppler ne tempère pas suffisamment les variations intempestives de puissance. Dans cette optique une limite supérieure de la marge de réactivité serait donnée par la quantité de réactivité qui conduit le réacteur à une période stable de croissance de la puissance inférieure environ à 10 s, cette quantité est égale à 150 p.c.m. soit inférieure à $\sim \beta/2$.

Egalement pour des raisons de sécurité la vitesse d'insertion de la réactivité en régime de fonctionnement normal devrait être limitée dans certains cas : elle doit cependant être supérieure à la vitesse d'apparition de l'antiréactivité lors du chargement en combustible du canal central (-5 p.c.m/s) (*)

- c) Les variations accidentelles de réactivité contrôlables par le système de régulation sont fonction du niveau de puissance fixé pour l'arrêt d'urgence $\delta n_s/n_o$, elles sont voisines de la quantité

$$\delta K = \frac{\beta \delta n_s/n_o}{1 + \delta n_s/n_o}$$

- d) Les critères d'optimisation (cf. [2] et [3] des réponses de la chaîne proportionnelle de régulation conduisent à lier l'instabilité du réacteur à la plage d'antiréactivité des barres et à leur vitesse. La fig. 4 rappelle les résultats obtenus lors de l'étude analogique de la dynamique du réacteur. Ce graphique est important et mérite quelques commentaires :

- la limite de stabilité intrinsèque du réacteur partage le plan des coefficients de température du réacteur en deux zones : une zone stable, une zone instable : les coefficients de température calculés pour le coeur à l'équilibre placent le réacteur dans la zone instable (point A)
- le système de contrôle permet alors de partager la zone instable en deux parties ; une partie contrôlable, une partie incontrôlable, la limite entre ces deux zones dépendant de l'objectif que l'on a fixé plus ou moins arbitrairement au système de contrôle : par exemple un objectif sera de rendre le réacteur capable de rattraper un échelon de réactivité de 100 p.c.m. (limite constituée par la courbe 1), si l'objectif visé est moins grand, par

(*) Une limitation asymétrique de la vitesse des barres n'a pas été prise en considération lors des études de dynamique, la vitesse d'antiréactivité des barres étant relativement faible : 15 p.c.m/s. Elle pourrait être envisagée.

exemple s'il doit suffire à rendre le réacteur capable de rattraper un step de réactivité de 50 p.c.m. seulement la partie contrôlable est plus vaste (limite constituée par la courbe 2)

- le point A dont la position est imposée doit être situé dans la partie contrôlable :
 - . Comme la limite entre parties contrôlable et incontrôlable est arbitraire il suffirait d'adapter l'objectif au système de contrôle et au réacteur, mais les performances du système de contrôle risquent d'être insuffisantes.
 - . Si l'objectif est alors fixé (critère c) par exemple) il faut disposer d'un système de contrôle meilleur, soit en augmentant la vitesse des barres (s'il n'existe pas encore de limite mécanique pour la vitesse de ces barres, ou alors il faut multiplier leur nombre et les grouper en bancs : par exemple si la vitesse est doublée la limite 1 est sensiblement repoussée en 2) soit dans une certaine mesure en augmentant leur plage d'antiréactivité.
- de plus dans la partie contrôlable le point A doit se situer à distance suffisamment grande de la limite d'incontrôlabilité pour les raisons suivantes :
 1. l'objectif fixé doit être atteint dans de bonnes conditions c.à.d. que le rattrapage de l'échelon doit se faire suivant certains critères de tenue en transitoire

2. l'incertitude sur la position réelle du point A c'est-à-dire sur la valeur des coefficients de température est encore très grande et n'a pas pu être évaluée jusqu'alors ; ce point est très contraignant.
3. comme dans tout ensemble électronique il faut tenir compte de chutes de gains possibles qui réduiraient les performances du système de contrôle et prévoir donc des marges de sécurité suffisantes.

Les spécifications du système de barres ne peuvent donc que résulter d'un compromis dans une certaine mesure arbitraire.

Dans le cas précis étudié une vitesse de 15 p.c.m/s avait été retenue, elle était réalisée par le mouvement de 8 barres mécaniques en inox situées à la périphérie du coeur (voir 8.1.1.) et se déplaçant à la vitesse maximale de 15 cm/s (qui est une valeur classique pour ce genre de barres). Il est bien évident qu'une vitesse plus grande : 50 p.c.m/s par exemple serait bien préférable, mais cette vitesse implique alors un design de barres tout différent. L'antiréactivité des barres était de - 300 p.c.m.

Si le réacteur est stable : point B par exemple (réalisable en principe) la situation est évidemment bien moins contraignante.

5.3. Bases pour les spécifications des chaînes de régulation :

Les fonctions de transfert du servomécanisme des barres de régulation ont été définies lors des études de dynamique de la centrale. Nous renvoyons donc aux références [2] et [3].

6. Système d'empoisonnement du modérateur :

6.1. Fonction :

La fonction de compensation concerne les variations de réactivité dues aux changements des caractéristiques de marche du réacteur.

Une caractéristique essentielle du système d'empoisonnement est son asymétrie due au fait qu'injecter le poison est plus facile que le retirer et le retirer est d'autant plus difficile que le taux injecté est faible. C'est ce qui explique que l'on a dissocié les deux transitoires xénon dus aux variations de puissance entre 100 et 75 %. La loi d'épuration de l'eau lourde est en effet exponentielle : $M = M_0 e^{-t/\tau}$ (voir 8.2.3.)

où M_0 est le niveau d'empoisonnement initial
 M est le niveau d'empoisonnement au temps t
 τ la constante de temps du système

6.1.1. Effets xénon :

- Dans la zone de fonctionnement normal de 75 à 100 % de la puissance (5 %/mn).

Le transitoire xénon entraîne une variation de réactivité de + 500 p.c.m. au taux maximum de 20 p.c.m./mn (Fig.2). L'équilibre est atteint au bout de 30 heures (-50 p.c.m.).

- Lors des opérations de démarrage et d'arrêt

De 0 à 100 % de la puissance (Fig. 5) la variation d'anti-réactivité à l'équilibre (après 50 heures) est de l'ordre de - 3000 p.c.m. (taux maximum : \sim - 4 p.c.m./mn).

En cas d'arrêt normal ou d'urgence le transitoire d'antiréactivité est de l'ordre de - 10.000 p.c.m. (Fig.6) après environ 10 heures le gradient initial étant supérieur à - 50 p.c.m./mn. A 100 % de la puissance le modérateur est empoisonné de 650 p.c.m. seulement (marge pour le passage à 75 %), cette réactivité potentielle permettrait de compenser l'effet xénon encore 13 mn environ après l'arrêt (ce qui est très peu en pratique) et de redémarrer le réacteur, au delà de ce temps il faudrait attendre 35 heures pour tenter l'opération avec succès. Cette compensation n'est évidemment possible que si le circuit d'épuration est dimensionné pour permettre un gradient supérieur à 50p.c.m./mn; il risque alors de devenir très volumineux et ceci pour un objectif qui présente peu d'intérêt pratique.

6.1.2. Effets de température :

Les variations de réactivité induites par ces effets de températures sont mal connues par suite de l'incertitude sur la valeur des coefficients de température en fonction de la puissance du réacteur.

- Effets dus au passage des conditions de l'arrêt prolongé à 5 % de la puissance (en 40 mn)

	Variation de réactivité (p.c.m.)	Taux maximum (p.c.m./mn)
Coeur initial	- 430	- 10
Coeur d'équilibre	+ 450	+ 10

- Effets dus au passage de 5 à 100 % de la puissance

(19 mn)

	Variation de réactivité (p.c.m.)	Taux maximum (p.c.m/mn)
Coeur initial	- 450	- 25
Coeur d'équilibre	- 20	- 1,5

6.1.3. Marge d'antiréactivité à l'arrêt :

Le système d'empoisonnement doit assurer une sous-criticalité suffisante (- 4000 p.c.m) au réacteur lors de ses arrêts prolongés. Il a ici une fonction de sécurité. Cette marge d'antiréactivité doit être supérieure au coefficient de vide maximal du coeur (constitué par la vidange totale du réfrigérant).

6.1.4. Passage du coeur initial au coeur d'équilibre :

Il faut prévoir un certain empoisonnement (- 1100 p.c.m.) pour compenser les variations de réactivité dues à l'irradiation de la première charge. Ce cas est particulier à la variante étudiée où l'enrichissement du coeur initial a été ajusté de façon à obtenir un facteur de forme radial identique pour les deux coeurs.

6.2. Bases pour ses spécifications :

Elles doivent permettre en liaison avec le système de régulation, de dimensionner le système d'empoisonnement.

6.2.1. Antiréactivité maximale du système d'empoisonnement :

Elle est donnée par le bilan suivant dans le cas du coeur initial :

Marge d'antiréactivité à l'arrêt	- 4000	p.c.m.
Usure de la première charge	- 1000	p.c.m.
Effets de température (0 → 100 %)	- 900	p.c.m.
Effets xénon		
passage 0 → 100 %	- 3000	p.c.m.
passage 100 → 75 %	<u>- 650</u>	p.c.m.
Total :	- 9650	p.c.m.

Elle est donc de l'ordre de 10.000 p.c.m.

6.2.2. Gradient maximal d'épuration :

Nous ne prendrons pas en considération les gradients induits par les effets de température :

- l'incertitude sur leurs valeurs est très grande
- les gradients sont du même ordre de grandeur que ceux des effets xénon
- ces gradients peuvent être réduits par une montée en puissance plus lente (5 %/mn est certainement une valeur trop forte), ce qui n'est pratiquement pas le cas pour les effets xénon
- d'autre part ils interviennent à un niveau d'empoisonnement relativement haut.

Le gradient maximal retenu sera celui dû à l'effet xénon en cas de baisse de puissance entre 100 et 75 %, il est de + 20 p.c.m/mn et intervient à un niveau d'empoisonnement de l'ordre de 1000 p.c.m. donc très bas (cf. fig. 7).

6.2.3. Gradient maximal d'empoisonnement :

Il est beaucoup moins spécifique du système. Il est dû à l'effet xénon en cas d'augmentation de puissance entre 75 et 100 % de la puissance. Sa valeur est de - 20 p.c.m/mn.

6.2.4. Constante de temps du système d'épuration :

Elle est déterminée par les valeurs de l'antiréactivité maximale et du gradient maximal de dépoisonnement :

$\tau = - \frac{M}{\frac{dM}{dt}}$ (voir 8.2.3.), elle est de l'ordre de l'heure. C'est la grandeur la plus importante pour le dimensionnement du système d'empoisonnement.

7. Système de barres de sécurité :

7.1. Fonction :

Dans tous les cas où il y a une excursion de réactivité qui ne peut être contrebalancée par les systèmes de régulation ou d'empoisonnement, soit parce qu'elle dépasse leur capacité en gradient ou en amplitude, soit que ces systèmes sont hors fonction, il convient d'arrêter la génération de puissance dans le réacteur le plus vite possible.

De même on doit arrêter le réacteur au cas où un accident dans la partie secondaire empêche la réfrigération de l'organique. Dans ces conditions, pour éteindre le réacteur on injecte une quantité d'antiréactivité qui le rend instantanément sous critique. Cette injection doit pouvoir se faire dans un délai maximal et avec une vitesse minimale imposée par l'accident le plus grave imaginable, appelé dans la suite le MCA (Maximum Credible Accident).

7.2. Bases pour ses spécifications :

Comme MCA on a défini pour ORGEL la rupture franche du collecteur d'entrée qui aurait les conséquences suivantes :

- dépressurisation complète du circuit
- ébullition de l'organique dans le coeur
- arrêt et inversion du sens de circulation puis vidange du réfrigérant du coeur
- burn-out et fusion des éléments combustibles (ou au moins d'un certain nombre)

La méthode de calcul de la dynamique de cet accident est donnée en [5] ; son application au cas du réacteur de 250 MWe conduit aux spécifications du système de sécurité, aux termes desquelles l'antiréactivité injectée dans le coeur doit satisfaire à l'équation

$$\Delta\rho \gg 2500 (t-0,14)$$

avec $\Delta\rho$ = l'antiréactivité (en p.c.m.)

t = le temps (en secondes) après l'accident.

En forme graphique, la courbe d'injection de l'antiréactivité doit se trouver dans la partie hachurée du graphique de la fig. 7.1 . D'autre part

l'antiréactivité du système de sécurité devrait être au moins égale à la réactivité potentielle du coeur (soit 10.000 pcm.)

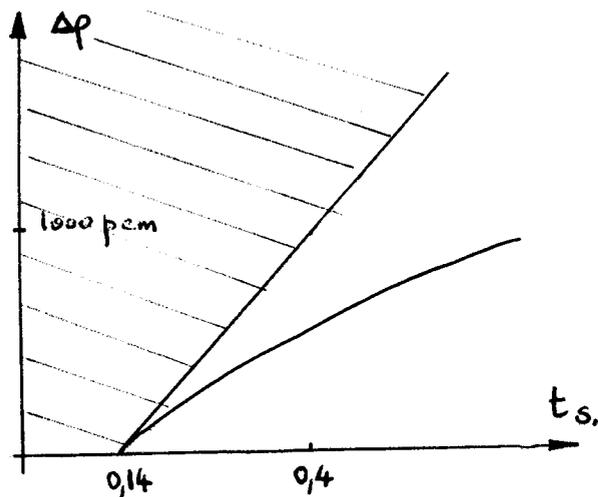


Fig. 7.1.

8. Solutions étudiées

8.1. Systèmes de barres de régulation :

On a étudié plusieurs systèmes de barres, mécaniques ou gazeuses, couplés avec un système d'empoisonnement du modérateur, et différant par le nombre, l'épaisseur et le positionnement des barres. Dans ce qui suit on décrira le fonctionnement de ces systèmes, leur dimensionnement et les performances obtenues.

8.1.1. Huit barres mécaniques périphériques :

Ces barres mécaniques ont été conçues en acier inox, sans addition d'un élément fortement absorbant comme le Cd ou le B. Leur diamètre est celui du tube de force du canal, c'est pourquoi elles sont placées dans des tubes de calandre vides, ce qui comporte certains avantages concernant la fabrication et le montage, mais aussi des inconvénients, en particulier leur encombrement oblige de les mettre à la périphérie du coeur, c'est-à-dire à l'interface modérateur-réfecteur. Leurs positions sont reportées fig. 8. Les caractéristiques les plus importantes de ces barres figurent au tableau I.

Le fonctionnement de ces barres se fait en combinaison avec le système d'empoisonnement du modérateur. Les figures 9, 10 et 11 donnent des exemples de cette régulation combinée.

8.1.2. Douzes barres mécaniques périphériques :

Les premières dispositions du réacteur prévoyaient une plage de fonctionnement des barres de régulation de 1000 p.c.m. environ (nécessaires en particulier pour la compensation du transitoire xénon entre 100 et 75 % de la puissance). Sous ces conditions les 8 barres précédentes n'étaient pas suffisantes, et on conçut une autre version avec 12 barres, qui étaient également placées à l'interface coeur-modérateur. Leur construction était identique à celle de la version précédente : en acier inox, creuses, verticales, enfoncées dans le coeur par la face inférieure.

Elles fonctionnaient également en combinaison avec le système d'empoisonnement du modérateur, les exemples donnés aux figures 9, 10 et 11 sont également valables pour ce cas.

8.1.3. Douzes barres gazeuses à la périphérie :

Les problèmes d'encombrement, de dynamique et de facteur de forme axial ainsi que la complexité mécanique et le besoin de refroidir les barres mécaniques nous a amené à considérer, comme alternative aux barres mécaniques, un système de barres gazeuses. Pour les premières évaluations on a gardé le positionnement de la dernière version de barres mécaniques : 12 à la périphérie du coeur actif. Les calculs ont été faits pour deux diamètres 92 et 25 mm, le gaz était 1^3He ; dans les deux cas les performances sont satisfaisantes.

8.1.3.1. Principe des barres gazeuses :

Un système de barres travaillant avec un gaz absorbant à pression variable a été étudié pour le réacteur EL4 [6]. Les résultats de ces études sont également valables pour un réacteur ORGEL. La fig. 12 présente la solution proposée pour EL4 : un réservoir à haute pression (HD) et un deuxième à basse pression (ND) contiennent le gaz, la pression basse est contrôlée et maintenue par une pompe à vide P. La pression dans les barres, c'est-à-dire le niveau d'antiréactivité, est réglée par un système de vannes et de diaphragmes. Une circulation dans les barres est effectuée par le système de purification R. La fig. 13 présente une variation de ce système où la circulation dans les barres se fait par les variations de pression du gaz.

8.1.3.2. Choix du gaz :

Le nombre de gaz envisageables est limité.

gaz	\sum_a (cm ⁻¹)	Remarques
Kr	8,27.10 ⁻⁴	\sum_a trop bas
Xe	9,5.10 ⁻⁴	
He	1,9.10 ⁻⁷	
³ He	0,12	
BF ₃	0,018	Hydrolyse en HBO ₂ + HF, produits d'hydrolyse très corrosifs
¹⁰ BF ₃	0,096	

On pourrait penser à d'autres composés de B ou - mieux mais plus cher - de ¹⁰B, mais tous ont le même inconvénient de réagir avec la moindre trace d'humidité en formant des produits agressifs.

Le choix s'est en définitive porté sur l' ^3He pour les raisons suivantes :

- étant inerte, il ne pose aucun problème de compatibilité,
- sa température de liquéfaction est loin du régime normal,
- sa section de capture est la plus élevée de tous les gaz pris en considération,

sans méconnaître ses désavantages sérieux :

- son prix est élevé : 1100 \$/g [7],
- son approvisionnement est encore incertain,
- sous rayonnement il produit du tritium (^3H) qui est toxique et radioactif,
- enfin il pose des problèmes d'étanchéité délicats.

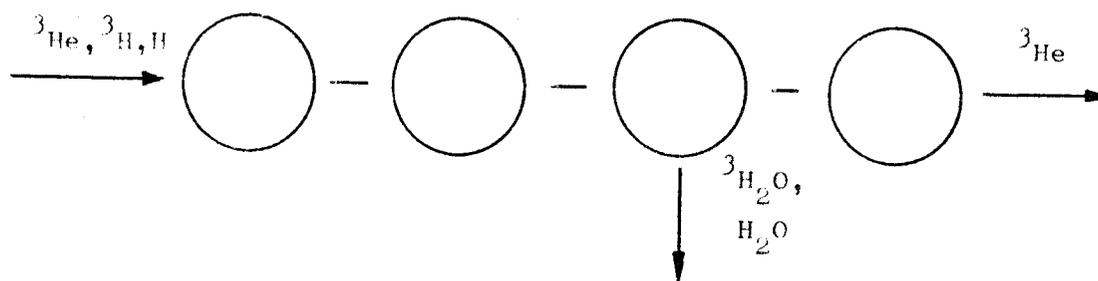
8.1.3.3. Comportement du gaz sous rayonnement :

S'agissant de barres de régulation, une partie du gaz se trouve continuellement sous rayonnement ; sa réaction aux neutrons est :



La section d'absorption du tritium étant pratiquement nulle, cette réaction se traduit par une diminution permanente de l'efficacité des barres. Pour cette raison on est forcé de renouveler le gaz continuellement : ce qui est une opération délicate à cause de la toxicité du tritium.

Le procédé d'épuration même est assez simple ; en Réf. [6] on indique pour EL4 la chaîne suivante de purification :



Le ${}^3\text{H}_2\text{O}$, qui se forme, devrait être un produit très précieux si l'on arrive à l'obtenir sous une forme assez concentrée. Il existe quelques références de prix pour cette eau (T_2O) qui ne sont pas directement comparables car on en ignore la concentration ; toutefois ces prix sont instructifs [8]

1500 \$/Curie	(USA)
150 "	(USA)
140 "	(USA)
39 "	(France)
7 "	(Angleterre)

8.1.3.4. Consommation et coûts de ^3He :

La consommation de gaz due à l'absorption de neutrons a été calculée suivant la formule

$$\frac{d\text{Ne}}{dt} = I.f.F. \quad [\text{atomes/sec}]$$

avec I = flux neutronique entrant dans la barre

f = facteur de forme axial

F = surface totale des barres

Les résultats pour les deux diamètres de barres sont donnés dans le tableau suivant et fig. 14.

$P_{\text{He}} \quad [\text{kg/cm}^2]$	$\phi = 25 \text{ mm}$		$\phi = 92 \text{ mm}$	
	$\Delta p \quad [\text{pcm}]$	consommation $[\text{g/an}]$	Δp	consommation
0,01	-	-	57	3,6
0,3	-	-	732	62,9
0,5	-	-	877	75,0
1	293	24,1	1025	88,4
5	561	46,8	1144	99,1
10	607	50,9	-	-
15	624	52,2	1152	100,4

Le flux a été calculé à l'aide du code EXTERMINATOR.

Fig. 14 on voit que la consommation est indépendante de l'épaisseur des barres, si elles se trouvent aux mêmes positions.

Pour un enfoncement moyen de 150 p.c.m. on a une consommation de 13 g/an.

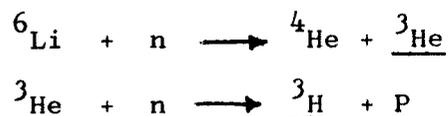
Le prix de ^3He étant de 150 \$/l (ou 1100 \$/g) les coûts annuels sont donc de 14300 \$/an, compte non tenu des fuites certainement inévitables, mais qui ne peuvent être estimées. Calculé sur le prix de l'énergie, on obtient la valeur relativement élevée de $6,5 \cdot 10^{-3}$ mills/kWh.

8.1.3.5. Quantité nécessaire de gaz, approvisionnement :

12 barres de 25 mm de diamètre ont un volume de 24 litres. Le volume des tuyauteries, réservoirs, chaîne d'épuration étant du même ordre le volume total est donc de 50 litres environ.

En supposant que la pression d'équilibre soit de 1 kg/cm^2 et que le stockage couvre la consommation normale de trois mois : 3 g soit 20 litres, le volume de gaz immobilisé sur le site du réacteur est donc de 70 litres ce qui représente 10.500 \$.

En ce qui concerne son approvisionnement, l' ^3He pose actuellement des problèmes sérieux car il s'agit d'un produit "stratégique" :



^3He et ^3H servant à la fabrication des bombes thermonucléaires.

On ne connaît que la capacité de production de Savannah River qui est de 200 g/an (1500/an) à comparer aux 13 g/an correspondant à la consommation d'un ORGEL de 250 MWe mentionnée plus haut.

8.1.4. Douze barres gazeuses au centre :

La position des barres, soient-elles mécaniques ou gazeuses, à la périphérie du coeur actif, entraînant un abaissement très sensible du facteur de forme du réacteur en question (voir tableau I), on a calculé des barres au centre du coeur.

Ce déplacement est positif à deux points de vue différents.

On gagne :

- sur le facteur de forme (0,84 au lieu de 0,79)
- sur la consommation d'³He (5 au lieu de 13 g/an)

L'impact sur le facteur de forme est très lié à la conception du réacteur et surtout du cycle du combustible. Pour un cycle différent on pourrait au contraire avoir intérêt à laisser les barres à la périphérie du réacteur.

D'autre part la consommation de matériau absorbant dans les barres dépend linéairement du flux, tandis que leur efficacité augmente avec le carré du flux. On gagnera donc toujours sur la consommation en plaçant les barres dans les zones du flux le plus élevé. Les consommations calculées sont reportées fig. 14. On notera qu'il n'y a rien de fondamentalement différent par rapport au cas des barres gazeuses périphériques à part que le diamètre des barres est maintenant de 25 mm uniquement. Des barres plus épaisses mécaniques aussi bien que gazeuses ne peuvent être placées dans le coeur sans qu'on leur sacrifie des sites de canaux.

Remarque : On pourrait penser placer un nombre plus élevé de barres gazeuses au centre du coeur. Mais étant donné que déjà avec 12 barres centrales on obtient un facteur de forme radial élevé égal à celui du coeur sans barres (0,84), aller au delà est théoriquement possible mais probablement sans intérêt.

8.2. Système d'empoisonnement du modérateur

8.2.1. Considérations chimiques :

Comme poison pour le système de compensation on a choisi le CdSO_4 . Ce choix représente un compromis entre les quatre matériaux possibles pris en considération, ce sont : Li_2SO_4 , H_3BO_3 , $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ et CdSO_4 , auxquels on impose les exigences suivantes :

- le produit doit être facilement et en grandes quantités soluble dans l'eau (CdSO_4 : 760 g/l H_2O à température ambiante)
- il ne doit pas précipiter dans tout le régime de concentrations et de températures couvert, en dehors ou sous rayonnement, et aucun des matériaux de structure du réacteur ne doit être un catalyseur pour une telle précipitation.
- il ne doit pas former de dépôts sur les surfaces de structure
- le modérateur ne doit être rendu agressif, ni par le poison, ni par les produits radiolytiques
- le poison et ses dérivés doivent être facilement séparables du modérateur
- le poison ne doit pas être trop cher
- son approvisionnement ne doit pas poser de problèmes.

8.2.2. Dynamique de l'empoisonnement

Le délai entre le signal et l'atteinte du niveau de poison désiré dans tout le coeur est de l'ordre de 3 minutes. Il dépend surtout de la vitesse du modérateur dans la cuve, tandis que la distance entre le point d'injection dans le circuit et l'entrée de la cuve est d'une moindre importance.

Ce fait est dû aux vitesses très différentes de l'eau lourde dans la cuve (2 - 3 cm/s) et dans les tuyaux (5 - 8 m/s). La pompe d'injection doit travailler pendant tout le temps qui est nécessaire au "front" de poison qui se forme au début de l'injection, pour traverser non seulement le réacteur, mais aussi le réflecteur supérieur, le collecteur de sortie et les échangeurs de chaleur. Ces périodes de travail de la pompe d'injection sont de l'ordre de 4 minutes. En raison de l'existence de tels "fronts" de poison, une augmentation uniforme de l'empoisonnement dans la cuve n'est pas possible, on a toujours une période où la concentration en poison augmente (pendant laquelle le front est à l'intérieur de la cuve) et une période pendant laquelle elle reste constante (quand le front se trouve en dehors de la cuve). Cela est représenté fig. 15, où l'on a figuré en outre les mouvements complémentaires des barres pour rendre constante la croissance de l'antiréactivité dans le coeur. La vitesse maximale d'injection du poison est déterminée précisément par la vitesse maximale des barres lorsqu'elles agissent en compensant les susdites discontinuités de l'injection du poison.

8.2.3. Le système de purification

L'extraction du CdSO_4 dissous est faite par échange d'ions. La ligne de purification est branchée en dérivation entre les échangeurs de chaleur et l'entrée de la cuve. Elle consiste en deux colonnes d'échangeurs d'ions, chacune dimensionnée pour un débit de 12 l/s environ.

Les deux colonnes branchées en parallèle sont capables d'une vitesse de purification de 20 pcm/mn à un niveau de 1000 pcm, calculée suivant

$$M = M_0 \cdot e^{\frac{-f \cdot t}{v}}$$

où M est le niveau d'empoisonnement (en pcm ou g/l)

M_0 " " " initial
f " " débit dans la colonne
t " " temps
v " " volume total du circuit D_2O

Les vitesses de purification pour alternativement une ou deux des colonnes en marche sont montrées fig. 16.

Comme on exige un haut degré d'épuration, il faut recourir à la technique des "lits mixtes" normalement constitués par 1/3 en poids de résine cationique acide forte et 2/3 de résine anionique base forte. (*)

(*) Comme résine cationique on $\overline{\text{10}}$ recommande :
- l'Amberlite IR 120 (Room et Haas),
- le Lewatit S100 (Bayer)
- le Lewatit S115 "

Comme résines anioniques sont mentionnées :
- l'Amberlite IRA 410 (Room et Haas),
- le Lewatit M 500 (Bayer)

Les résines Lewatit ont l'avantage de résister à des températures plus élevées que les Amberlites, dont la température limite est de 40 °C seulement ; il faut noter que la référence $\overline{\text{10}}$ est déjà ancienne et que les dernières années ont apporté des progrès en performance et en température admissible pour les matériaux des résines.

Le principe de fonctionnement des échangeurs d'ions est conventionnel, sauf quelques particularités spéciales à l'application nucléaire :

- l'exigence d'une pureté extrême dans la fabrication des échangeurs
- le risque d'un rayonnement ionisant de flux appréciable,
- l'exigence d'une étanchéité absolue.

8.2.4. Le dimensionnement du système d'épuration

Il est déterminé d'un côté par les exigences de la dynamique du réacteur, spécifiée au chapitre 5.2., de l'autre côté par les intervalles de manutention, c'est-à-dire de régénération des résines.

Bien qu'il ne soit pas en principe prévu d'empoisonner le modérateur du réacteur ESSOR et que de ce fait son circuit d'épuration soit peu puissant, c'est à partir de ses caractéristiques extrapolées que nous avons dimensionné le circuit d'ORGEL 250.

Débits : ESSOR 300 l/h

ORGEL 250 : 12 l/s = 43 m³/h (par colonne)

Investissement D₂O : ESSOR a deux colonnes d'échangeurs en parallèle avec une troisième en réserve. Chaque colonne contient 20 l de D₂O + 10 % pour la tuyauterie, ce qui fait un total de 66 litres.

ORGEL : Bases de calcul :

Estimation des quantités annuelles de poison à extraire :

2 x arrêt prolongé	= 20.000 pcm
50 x variation de puissance entre 100 et 75 %	= 50 x 600 pcm
supplément de 10 % pour les circuits	50.000 pcm 5.000 pcm
	<hr/> 55.000 pcm

Hypothèse : régénération de résine tous les trois mois,
donc la capacité d'une colonne doit être de 15.000 pcm = 19,5 kg
de CdSO_4 .

Capacité de résine sèche, lit mixte (XE 150) ; 1,7 meq

$$1 \text{ meq Cd}^{++} = \frac{112}{2} \cdot 10^{-3} \text{ g} = 56 \text{ mg Cd}$$

$$1,7 \text{ meq Cd}^{++} = 1,7 \cdot 56 = 95 \text{ mg Cd/g résine}$$

$$19,5 \text{ kg CdSO}_4 \text{ contiennent } 19,5 \cdot \frac{112,4}{208,5} = 10,5 \text{ kg Cd}$$

$$\text{Quantité de résine donc } R = \frac{10,5 \cdot 10^3}{95} = 110 \text{ kg}$$

$$\text{Rendement} = 80 \% \text{ donc } R = \frac{110}{0,8} = 127,5 \text{ kg résine}$$

En supposant la même relation entre poids D_2O /poids résine mixte
comme dans ESSOR (1/1) en résultent 130 kg de D_2O (on ignore
le poids spécifique de XE 150, on l'a supposé identique à ce-
lui du mélange M 500 - S100, employé dans ESSOR).

En conséquence investissement pour ORGEL : au moins 3 colonnes
(2 en marche, 1 en réserve) :

3 x 130 kg =	390 kg	=	350 l
+ 10 % pour tuyauterie			35 l
+ solution empoisonnée en stock			50 l
			<hr/> 435 l
			<hr/> <u>TOTAL</u>

Consommation D₂O

Dans ESSOR le procédé de régénération est prévu comme suit :
Étant achevée la saturation des résines, on décroche l'échangeur du circuit et on le dédeutérise. A cet effet, il est très lentement rempli du côté inférieur d'eau légère. Ainsi il n'y a qu'une mince couche où H₂O et D₂O se mélangent. Ce mélange est reconcentré par distillation répétée. L'échangeur est régénéré par des acides normaux, puis deutérisé de la même manière. De cette façon on espère éviter toute perte d'eau lourde. Mais cet espoir n'a pas encore été vérifié.

8.3. Système de barres d'arrêt rapide

Les spécifications des barres d'arrêt rapide données dans chap. 7.2. étaient :

- entrée dans le coeur 0,14 second au plus tard après l'accident
- vitesse d'insertion au moins 2500 pcm/s.

Ces spécifications étant assez sévères, on s'est focalisé très tôt sur un principe, celui des barres liquides : plusieurs systèmes ont été examinés profondément (programme EULER) en théorie (code NIAGARA) et par des essais sur maquette en vraie grandeur. A côté de ce programme on s'est contenté d'évaluer brièvement les possibilités d'un système de barres gazeuses. On a éliminé toutes les solutions à barres mécaniques ou à vidange rapide du modérateur dont la technique est connue mais dont les performances ne suffiront pas pour atteindre les spécifications (*).

(*) : Rapporto di attività del progetto di sistemi di arresto rapido a barre liquide.

8.3.1. Vingt-quatre barres de sécurité liquides

Outre les considérations déjà citées, les barres liquides offrent certains avantages vis-à-vis des barres mécaniques :

- l'emcombrement est plus faible
- l'installation dans le coeur est plus souple
- le mécanisme de propulsion est situé loin de la cuve, pour éviter l'effet du rayonnement et de la température, il y est accessible à tout moment
- l'encombrement du mécanisme de propulsion pose beaucoup moins de problèmes qu'en cas de barres mécaniques.

8.3.1.1. Système de barres liquides

En détail on a examiné deux systèmes de barres liquides : à "tube de barbotage" et à "pression et gravité". De chacun de ces deux systèmes on donne le principe de fonctionnement fig. 17.

Système à tube de barbotage (TB) : il consiste en un réservoir de gaz à haute pression qui par une vanne d'ouverture rapide est lié à un réservoir contenant un liquide empoisonné. Ce réservoir est connecté à un collecteur et à un groupe de 3 à 5 barres, qui consistent en de simples tubes traversant le coeur.

En position d'attente le niveau du liquide est à l'intérieur de l'écran axial, environ 50 cm au dessous du coeur actif. Au moment de l'arrêt d'urgence la vanne est ouverte et le gaz pénètre dans le réservoir de poison. Il pousse le liquide vers le bas, à travers le collecteur et dans les barres. Lorsque la colonne liquide a traversé le coeur, le niveau dans le réservoir de poison est abaissé à un point où l'extrémité inférieure d'un tube dit "de barbotage" n'est plus immergée dans la solution. Par l'intermédiaire de ce tube, qui est branché entre le réservoir de poison et le collecteur supérieur des barres, la pression d'équilibre et la propulsion de la colonne de liquide s'arrête. La barre est maintenue dans cette position par la pression du gaz dans le réservoir de poison, le tube de barbotage étant de nouveau sous le niveau du liquide ; pour des arrêts prolongés on ferme la vanne, située entre le collecteur et le réservoir de poison. Un schéma du système TB avec tous ses accessoires est montré fig. 18.

Système à pression et gravité (PG) : Le réservoir de poison est placé plus haut que dans le cas précédent, de façon qu'à leur position d'équilibre les barres soient remplies. En position d'attente il y a une surpression dans les barres qui tient le niveau du liquide en dessous du coeur.

Au moment de l'arrêt d'urgence une vanne située entre le collecteur supérieur et le réservoir de poison est ouverte, et les pressions s'équilibrent. Par gravité, le liquide descend du réservoir et monte dans les barres.

En outre, le signal d'arrêt d'urgence ouvre une autre vanne entre le réservoir de poison et un réservoir de gaz à haute pression qui accélère l'équilibrage des pressions, c'est-à-dire l'insertion des barres.

Un schéma du système PG avec tous ses accessoires est montré fig. 19.

Comparaison des deux systèmes : Au point de vue dynamique, il y a un très léger avantage pour le système TB, dont la masse de liquide à accélérer est un peu plus petite. D'autre part, le système PG est "fail-safe" : au cas où le gaz propulseur, pour une raison quelconque n'agit pas, on a cependant insertion des barres par gravité, mais alors, bien-sûr, les performances dynamiques ne satisfont pas aux spécifications demandées par le MCA, la durée d'insertion étant alors d'environ 2 secondes ; notons en passant que pour la plupart des arrêts rapides ces deux secondes suffisent largement. En outre le système PG est, pendant un arrêt du réacteur, dans un équilibre stable, tandis que le système TB doit être maintenu dans sa position d'arrêt du réacteur par une pression différentielle de gaz ou par fermeture de vannes.

C'est donc le système PG que l'on retient comme référence.

8.3.1.2. Dynamique des barres liquides

En cas de MCA, l'onde de dépressurisation arrive après 0,01 s. au moniteur de pression et déclenche le signal d'arrêt d'urgence. Bien entendu il y a encore un grand nombre d'autres possibilités qui entraînent les mêmes conséquences, mais, une fois le signal déclenché, le mécanisme d'arrêt est toujours le même. Les séquences successives du processus sont :

- l'ouverture de la vanne d'arrêt d'urgence
- le temps d'ouverture de la vanne d'arrêt d'urgence doit être le plus court possible. Les vannes les plus rapides qu'on ait trouvées à ce jour ont un délai d'ouverture de l'ordre de 15 ms.

- le liquide commence à monter et traverse une partie de l'écran axial et le réflecteur axial en 80 ms environ.
- les barres entrent alors dans le coeur actif. Pour l'insertion de 1000 pcm, elles demandent un temps de 90 ms environ, ce qui correspond à une vitesse de 11000 pcm/s. (On introduit cette valeur intermédiaire, parce que pour le MCA, les premiers 1000 pcm correspondent à la période la plus critique de l'accident ; ensuite, la croissance de la réactivité due à la vidange est déjà beaucoup moins rapide).
- les barres traversent le reste du coeur en 310 ms environ leur antiréactivité totale est de 8000 pcm.

Les chiffres donnés ici résultent de calculs faits à l'aide du code NIAGARA pour les dimensions du réacteur ORGEL 500 MWe. Mais comme la dynamique du MCA de ce réacteur et de l'ORGEL 250 sont pratiquement les mêmes, voir fig. 20, on peut considérer ces valeurs comme également applicables au réacteur ORGEL 250 MWe.

Les calculs sur la dynamique des barres ont été vérifiés sur une maquette à l'échelle 1 : 1, et on y a trouvé un complet accord entre la théorie et l'expérience. Voir aussi [9].

8.3.1.3. Considérations chimiques

Le poison utilisé dans les barres de sécurité doit satisfaire aux conditions suivantes :

- il doit avoir une section de capture de neutrons thermiques élevée, si possible déjà dans sa composition isotopique naturelle,
- il doit avoir une haute solubilité dans l'eau dans toute la gamme possible de températures, c'est-à-dire entre 10°C et la température d'ébullition. Eventuellement cette marge

- pourrait être restreinte en fixant la limite inférieure à 50 °C, mais cela nécessiterait une régulation de température du réservoir de poison et du réservoir de stockage.
- il ne doit pas stimuler la décomposition radiolytique de l'eau
 - il doit être chimiquement stable sous l'irradiation γ et n ainsi que pour de longues durées sans irradiation
 - il ne doit pas produire des dépôts insolubles
 - il doit être rapidement soluble, ce qui est important en vue du lavage interne des tubes à son contact.
 - il ne doit pas être chimiquement agressif envers les matériaux des circuits
 - ses produits de fission ne doivent pas être dangereux.
- S'il ne sont pas stables, leur période devrait être la plus courte possible.

Après l'examen de quelques composés de B, Cd, Gd ; par exemple H_3BO_3 , $Na_2B_4O_7$, $CdSO_4$, $Gd_2(SO_4)_3$, le choix, confirmé par des expériences concluantes, s'est porté sur un mélange de H_3BO_3 et KBO_2 avec l'eau légère comme liquide de support. Les concentrations actuellement prévues sont 150 g/l KBO_2 et 40 g/l H_3BO_3 .

Les arguments principaux pour ce choix sont :

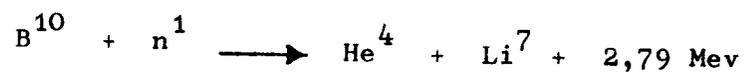
- la section élevée de capture du B, qui avec la concentration précédente et pour des barres de 3 cm de diamètre est de $\Sigma = 1 \text{ cm}^{-1}$
- les solubilités élevées du KBO_2 et du H_3BO_3 , qui se présentent comme suit :

Température	20	40	60	80	100	°C
KBO_2	425	445	470	490	510	g/1000 g
H_3BO_3	46,5	81,7	129,6	190,6	275,3	g/1000 g

On notera que les quantités dissoutes sont bien en dessous des valeurs de saturation, même à des températures basses.

Le B a une section de capture de 755 barns dans sa composition naturelle. Cette valeur est due surtout à l'isotope B¹⁰ (4010 barns).

La réaction neutronique est :



He et Li sont stables tous deux .

Les problèmes de sûreté de fonctionnement, de dynamique et de compatibilité chimique ont été traités dans le cadre du programme EULER par M. Galli di Paratesi et ses collaborateurs ; l'état actuel de leurs travaux fait l'objet d'un document interne (*), l'ensemble du programme sera rapporté ultérieurement.

8.3.2. Barres de sécurité gazeuses

Fig. 21 on montre le principe de fonctionnement de barres de sécurité gazeuses. Le gaz se trouve dans un réservoir (HP) sous une pression élevée, environ 10-15 kg/cm². Le collecteur et les barres sont, en marche normale, maintenus sans gaz par une pompe à vide (P).

(*) Rapporto di attività del progetto di sistemi di arresto rapido a barre liquide.

Le signal d'arrêt d'urgence actionne une vanne rapide (V), pendant que la pompe continue à fonctionner en assurant une circulation. Mentionnons pour mémoire les auxiliaires comme une chaîne de purification pour l'extraction du tritium, des détecteurs de fuites (pour air et D_2O) et, pour des raisons de sécurité, la division en groupes des barres.

Les performances dynamiques d'un tel système peuvent être nettement supérieures à celles des barres liquides, c'est ce que mettent en évidence des calculs basés sur l' 3He .

Le grand inconvénient de ces barres est leur coût élevé : pour 24 barres de 3 cm de diamètre ayant une pression d'équilibre de 6 kg/cm^2 l'investissement pour le gaz seul est de 320.000 \$ environ, compte non tenu des pertes inévitables et du stockage nécessaire.

Cette solution de barres de sécurité n'ayant pas fait de notre part l'objet d'études approfondies, nous nous contenterons de présenter un bilan qualitatif succinct :

Avantages :

- temps de réponse très court
- vitesse d'insertion suffisamment élevée
- installation très simple
- aucun risque de corrosion ou de non-compatibilité
- refroidissement pas nécessaire

Inconvénients :

- en marche normale une grande partie du système doit être vide, ce qui signifie une certaine délicatesse
- les exigences concernant l'étanchéité de la partie en surpression du système sont très sévères
- la rupture d'un seul tube met hors de fonction un groupe complet de barres, ce qui nécessite un grand nombre de petits groupes
- 3He est un gaz extrêmement cher. Son approvisionnement est incertain.

9. Remarques finales :

Il est évident que pour contrôler la réactivité du réacteur on pourrait envisager bien d'autres solutions que celles rapportées dans cette étude. Citons par exemple :

- des barres seules sans système de compensation (système primaire et coûteux car les barres seraient certainement gazeuses)
- des barres horizontales (ce qui nécessiterait le percement des écrans et de la cuve pour le passage des barres).

Il semble cependant qu'il faille leur préférer des solutions qui permettent de limiter le rôle des barres absorbantes. De telles barres sont inévitablement cause de dissymétries de flux, sources de mauvaise utilisation neutronique et de points chauds, il faudrait donc ne les affecter strictement qu'aux opérations pour lesquelles leurs avantages de rapidité, précision, sûreté et souplesse d'utilisation sont primordiaux, c'est-à-dire pour le démarrage et l'arrêt du réacteur, la régulation de sa puissance, et explorer, par les autres fonctions, des principes où l'absorbant n'est pas étroitement localisé - par exemple - :

- empoisonnement du gaz d'isolement du canal
- variation du niveau du modérateur
- variation de la température du modérateur
- ébullition du modérateur

nous ne les avons pas envisagés car ils présentent soit des difficultés technologiques de réalisation, soit des caractéristiques inadaptées au réacteur que nous avons étudié.

Tableau I

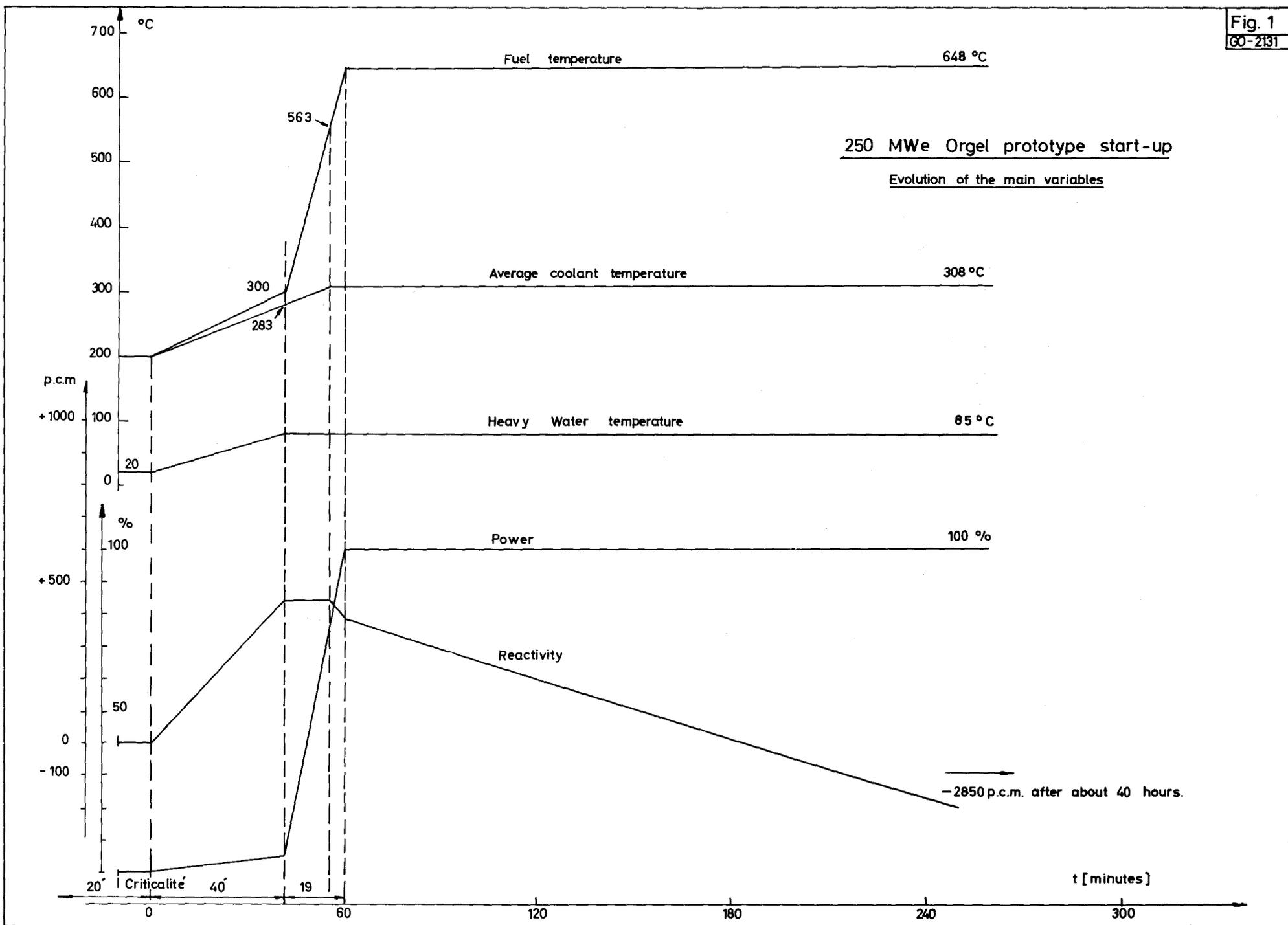
Caractéristiques des barres de régulation.

Type barres	Actionnement	Matériel absorbant	Diamètre extérieur mm	Diamètre intérieur mm	Longueur dans coeur actif m	Gradient de réactivité pcm/s	Facteur de forme de puissance ra- dial	Antiréactivité maximale pcm
Coeur sans barres							0,84	
8 barres mécaniques à la périphérie	Insertion du côté inférieur	Acier inox	92	62 - 82	0 - 3	15	0,79	500
12 barres mécaniques à la périphérie	"	"	92	62 - 82	0 - 3	15	0,79	1150
12 barres gazeuses à la périphérie	Variation de la pression du gaz	^3He	92	-	4	à définir	0,79	selon pression
12 barres gazeuses à la périphérie	"	^3He	25	-	4	"	0,79	"
12 barres gazeuses au centre	"	^3He	25	-	4	"	0,84	"
24 barres gazeuses au centre	"	^3He	25	-	4	"	0,84	"

Références :

- [1] A. Decressin : Spatial Xenon Instabilities in an Orgel Reactor of 500 MWe. (Rapport Interne) - non disponible.
- [2] Bona, D'Hoop, Lafontaine, Noailly : Conventional Dynamics of a 250 MWe Orgel Prototype (Rapport Interne) - non disponible.
- [3] D'Hoop, Noailly : Essais dynamiques complémentaires du réacteur Orgel instable. Etude dynamique du réacteur Orgel stable (Rapport Interne) - non disponible.
- [4] Bibliothèque des Sciences et Techniques Nucléaires, Génie Atomique Tome I, Chap. XX.
- [5] R. Simon : Analysis of a Complete Rupture in the Inlet Header of a 500 MWe Orgel Reactor. (Rapport Interne) - non disponible.
- [6] Lagrange et al. : Gas absorbant pour le contrôle de réactivité... de : Physics and Material Problems of Reactor Control Rods.
IAEA, Vienna 1964
- [7] Reference Design du Candu BLW 500 MW.
Rapport interne AECL, 1965 - non disponible.
- [8] International Directory of Radioisotopes, vol. II
Ed. Karntner Ring, Vienna 1959.
- [9] A. Agazzi et al. : Liquid Rod Shut-down System. Present Status and Future Development. (Communication EUR.) - non disponible.
- [10] Dirian, Vignet, Dollé : Quelques aspects chimiques de l'utilisation de l'eau lourde dans les réacteurs nucléaires. Compte-rendu du Colloque de Eau Lourde, Madrid 1962.

Fig. 1
GO-2131



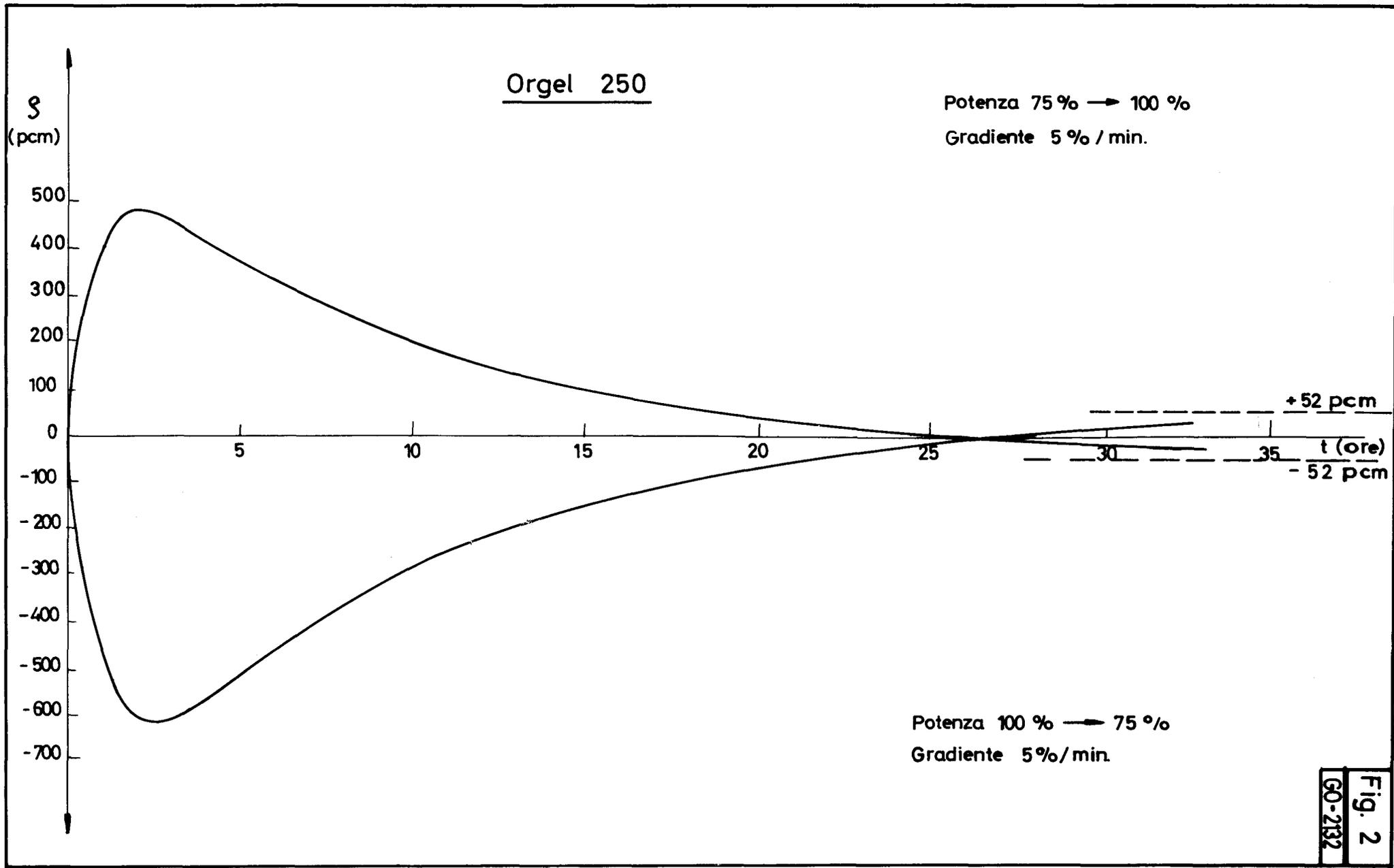


Fig. 3
GO-2133

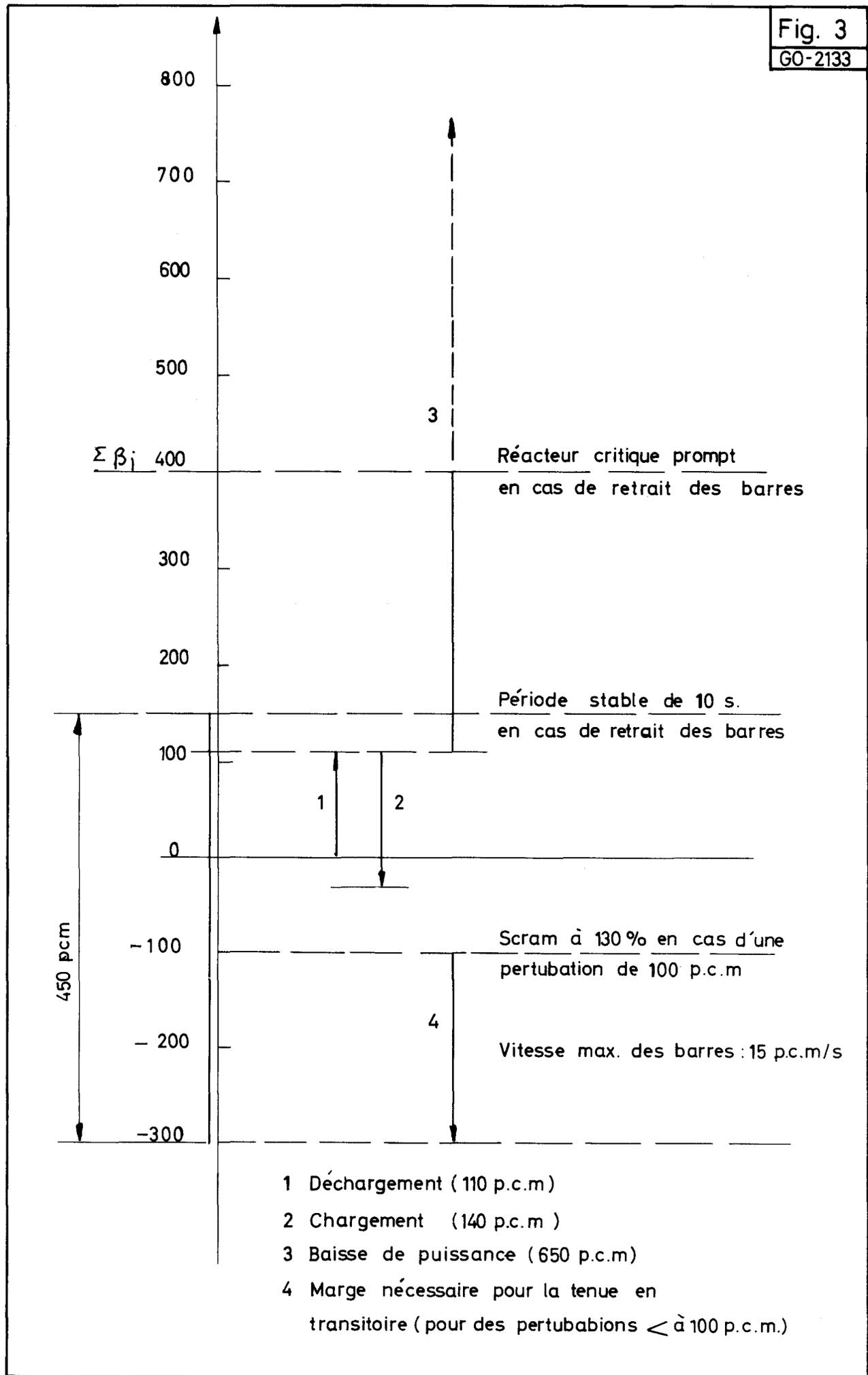


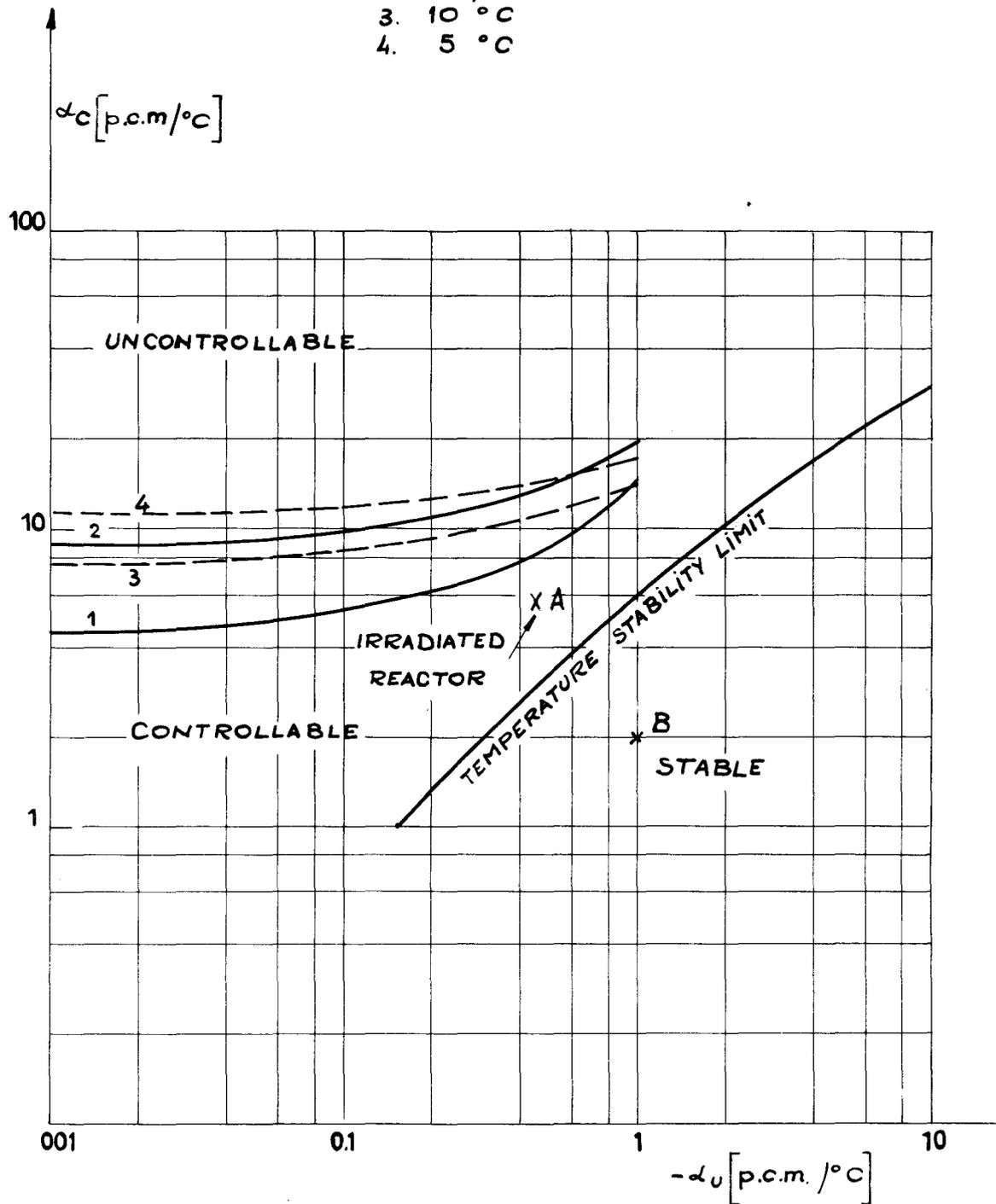
Fig. 4
GO-1820

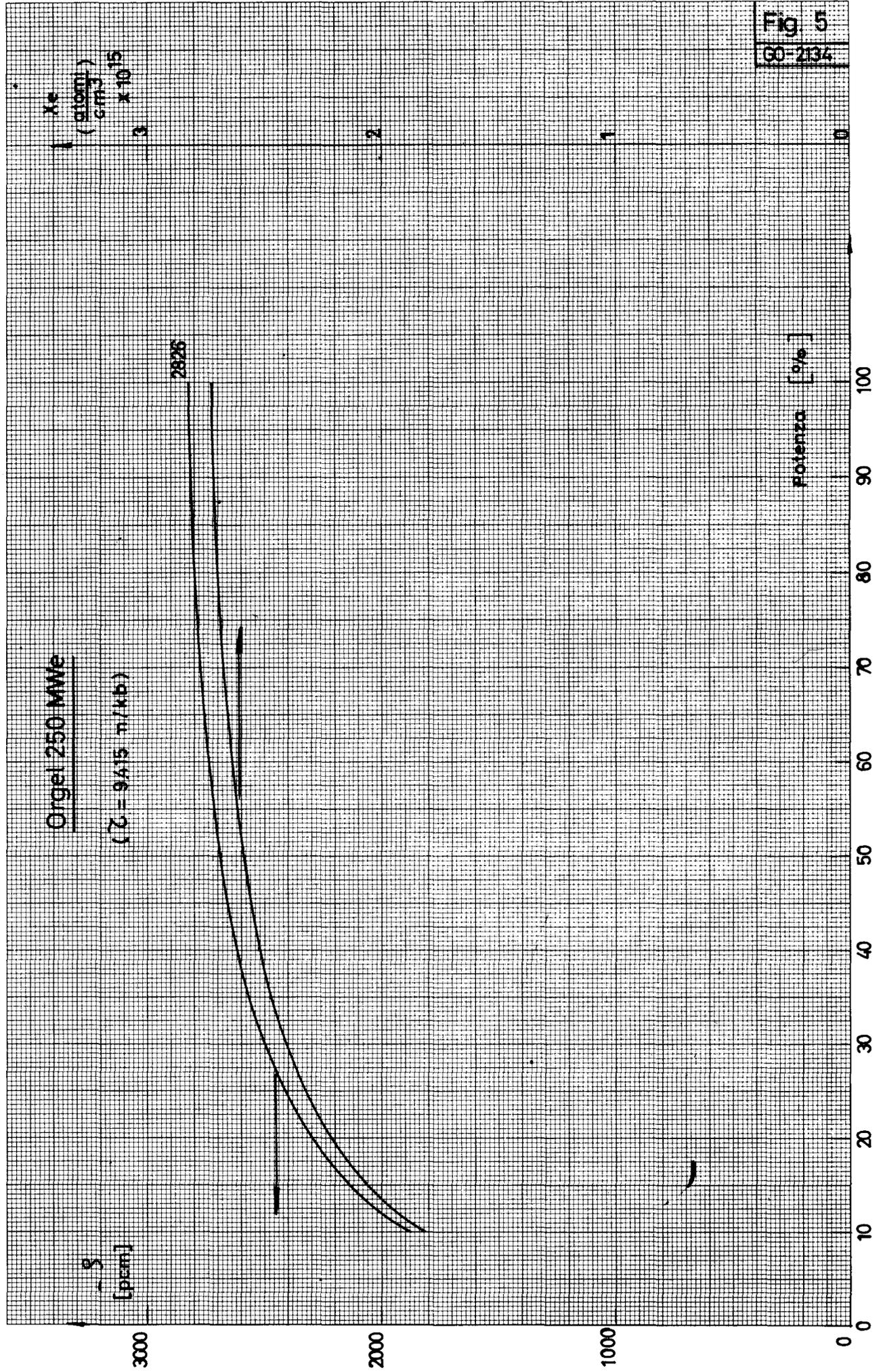
INERTIA 1 sec.

MAX. ROD SPEED 15 pcm/sec

ROD REACTIVITY SPAN +200 pcm, - 300 pcm

- 1. 100 p.c.m.
- 2. 50 p.c.m.
- 3. 10 °C
- 4. 5 °C





XENON REACTIVITY VARIATIONS DUE TO "SCRAM"
(POWER CHANGE 100% → 5%)

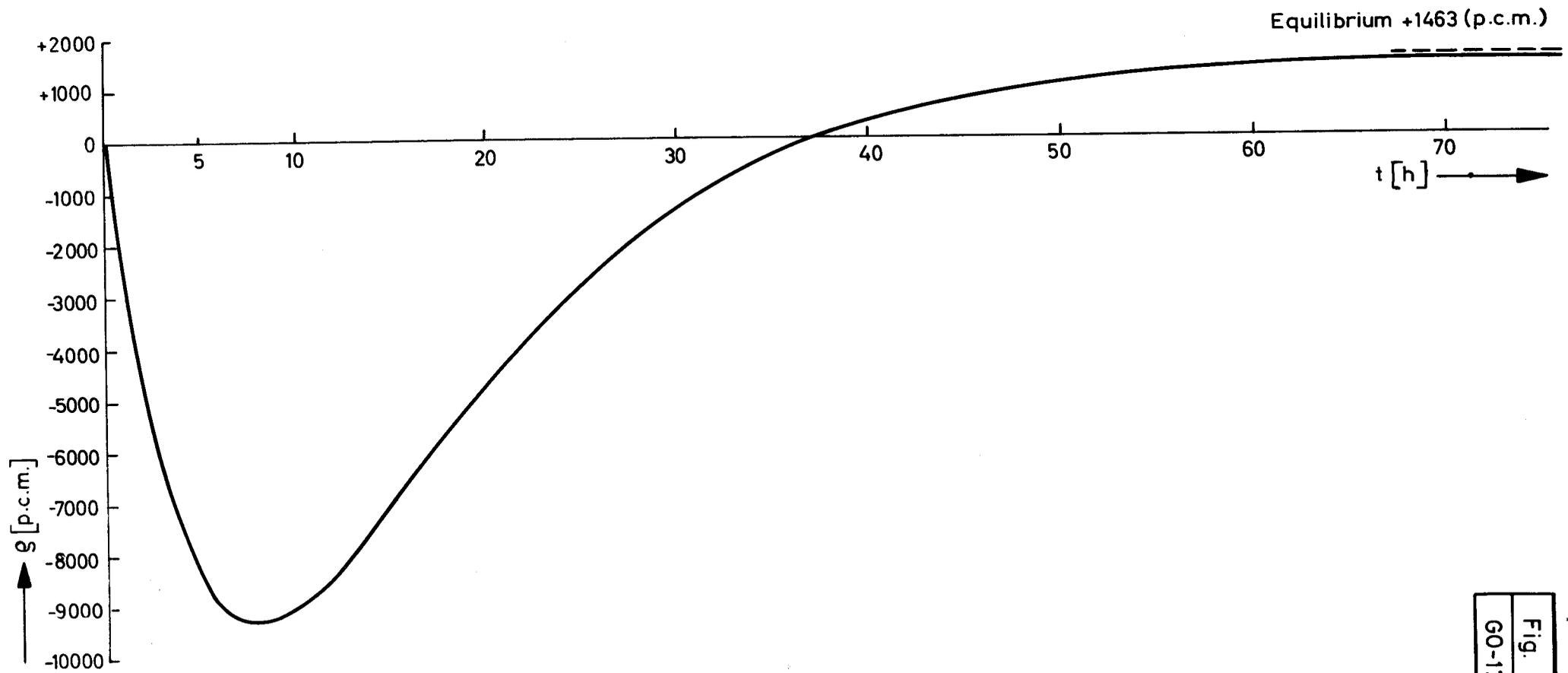
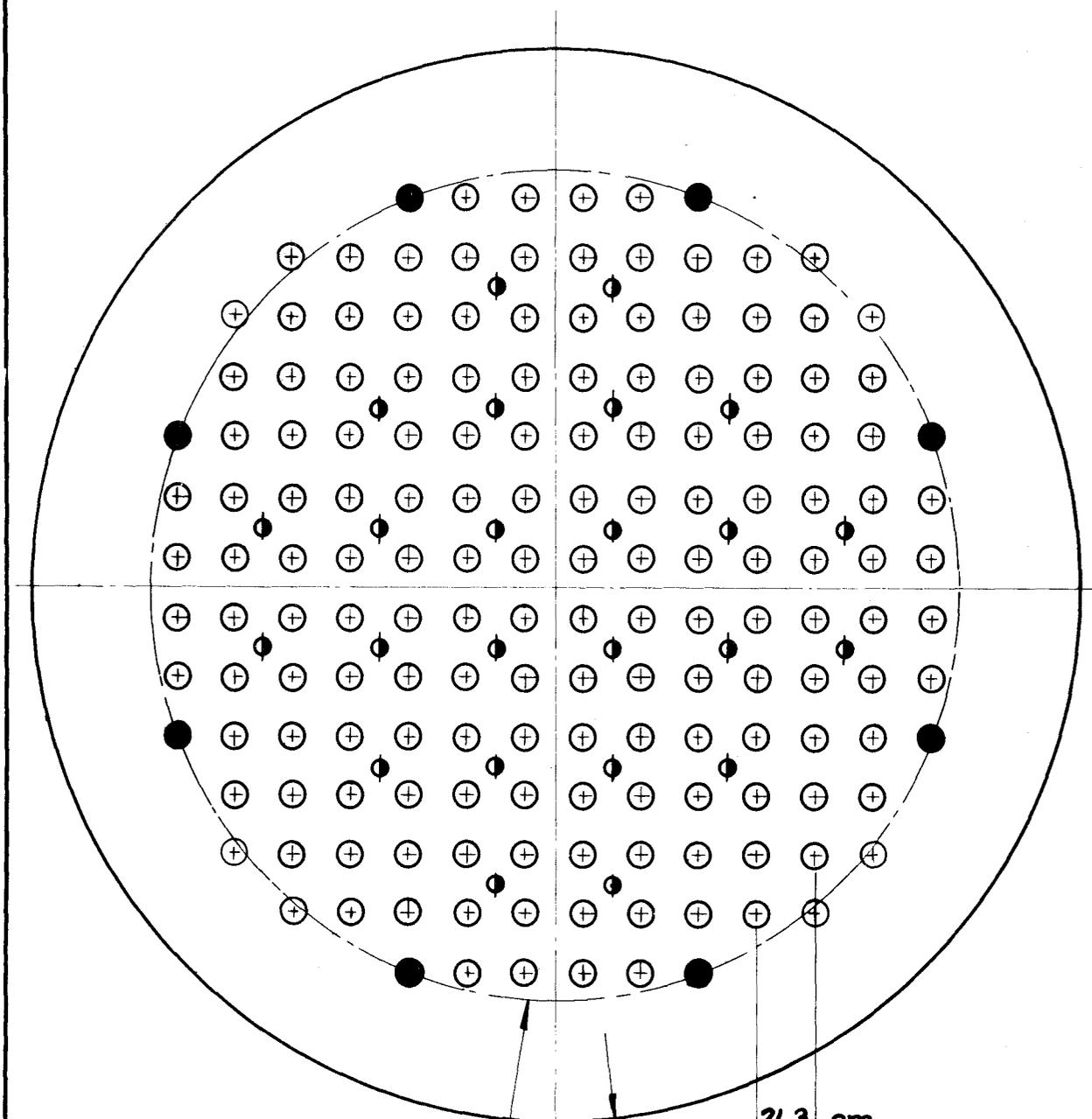


Fig. 6
GO-1793

Fig. 7
GO-1811

ORGEL 250

REACTOR SECTION



Core Diameter : 342 cm

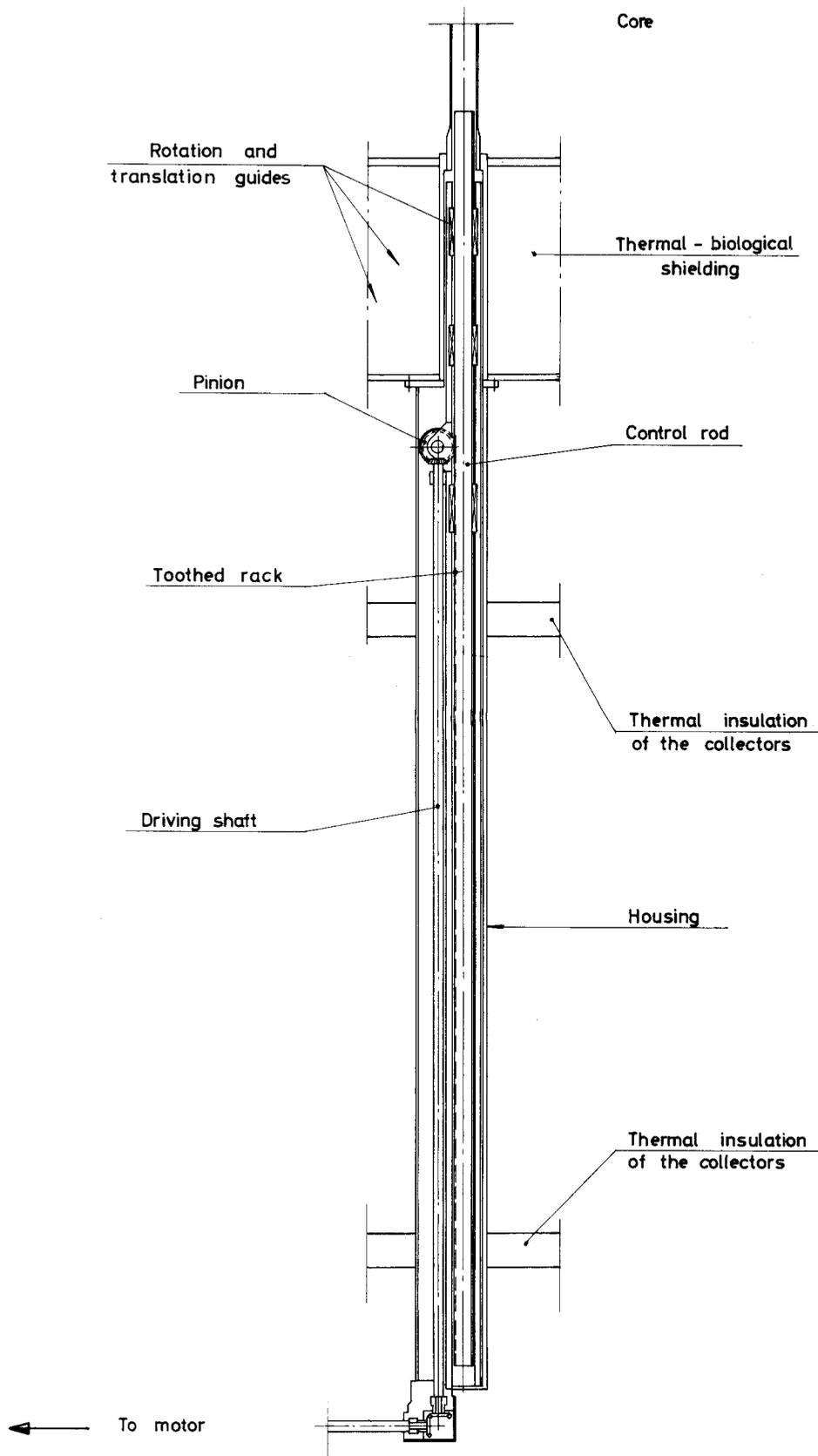
Internal Diameter of the Container : 442 cm

24.3 cm

- Positions of Control Rods.
- ⊕ Positions of Safety Rods.

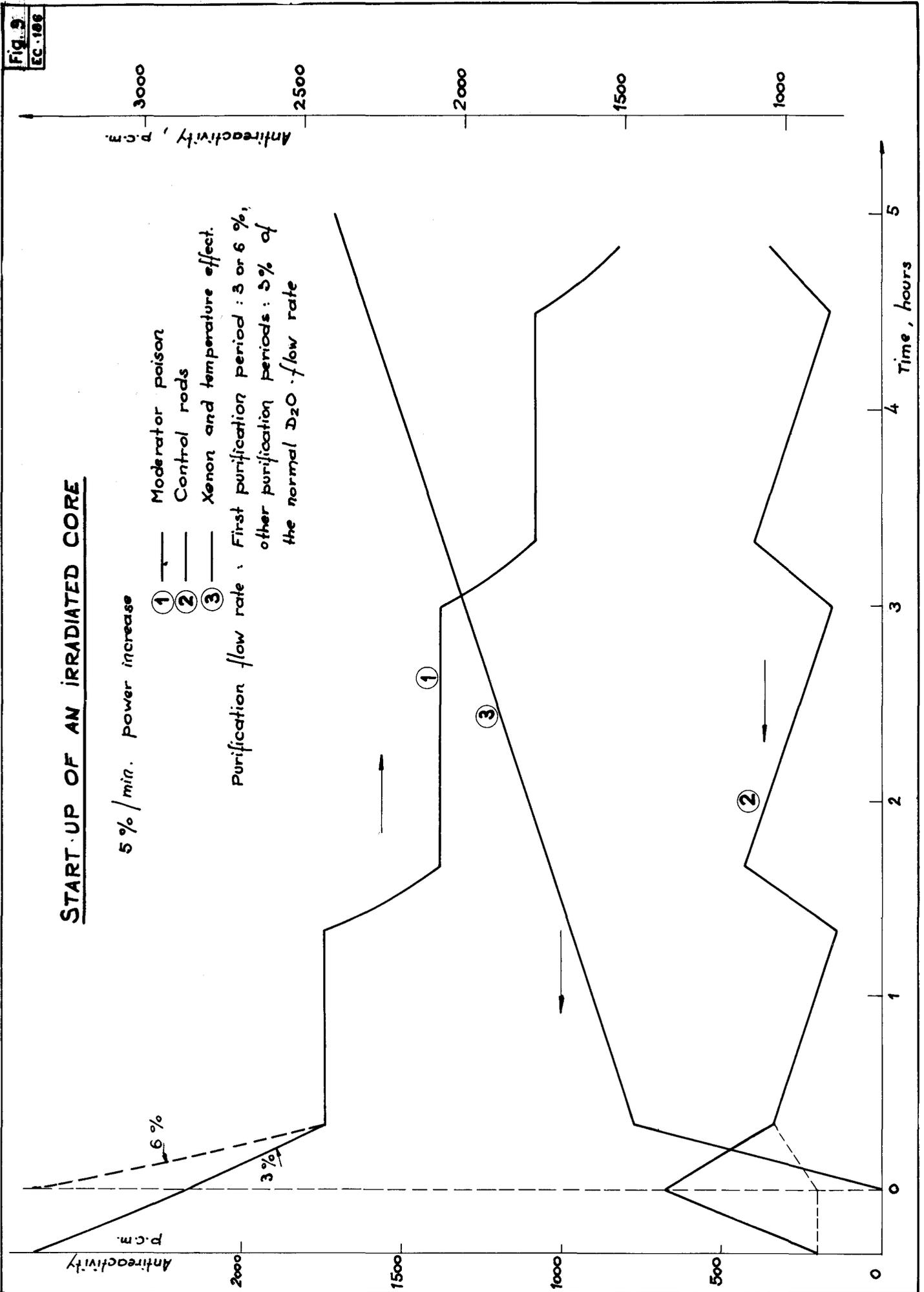
6.10.66

Sc. 1:25



Working principle of the control rods

Fig 8
10-1930



PERFORMANCE INCREASE, 75—100 %

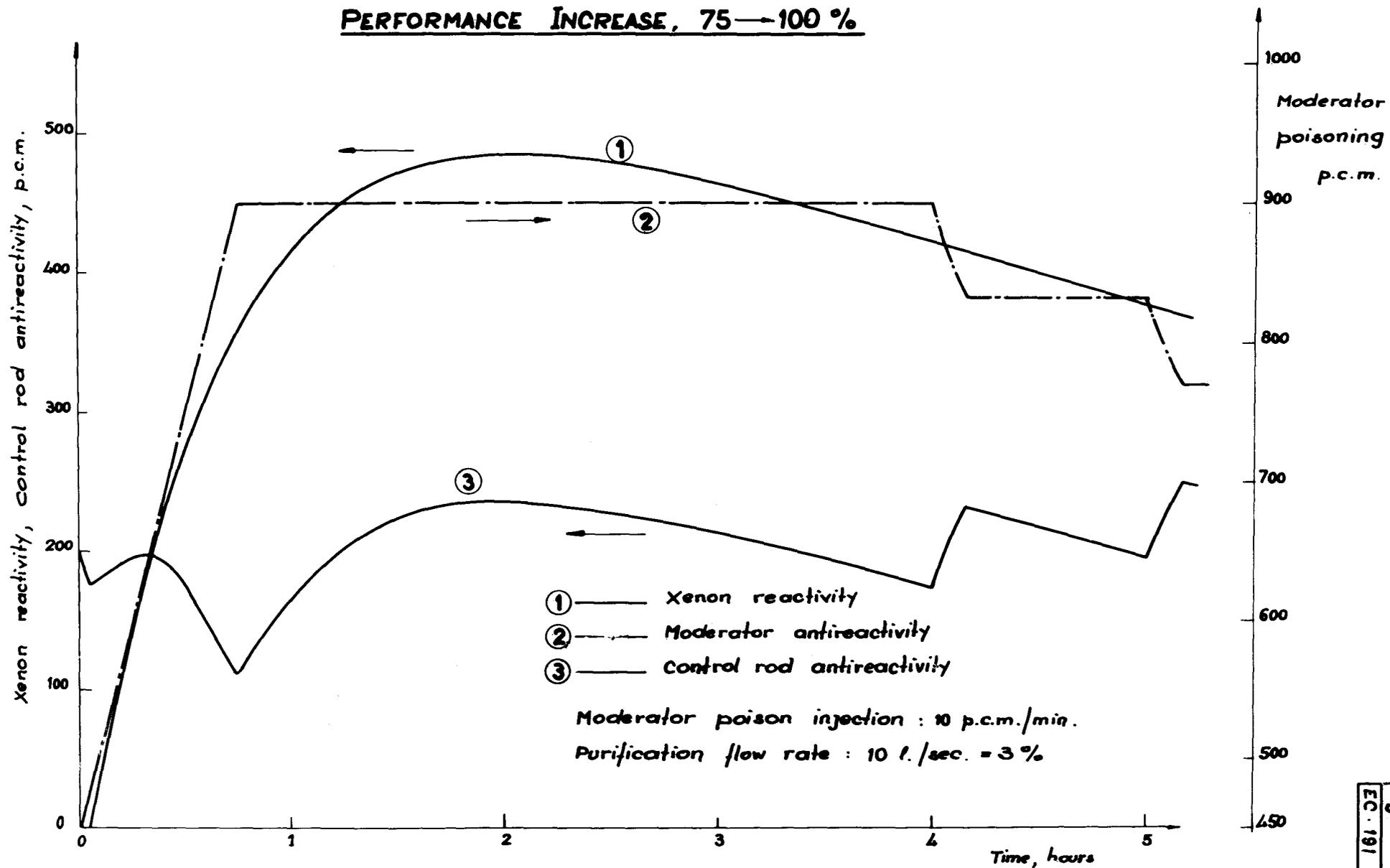


Fig. 10
EC-191

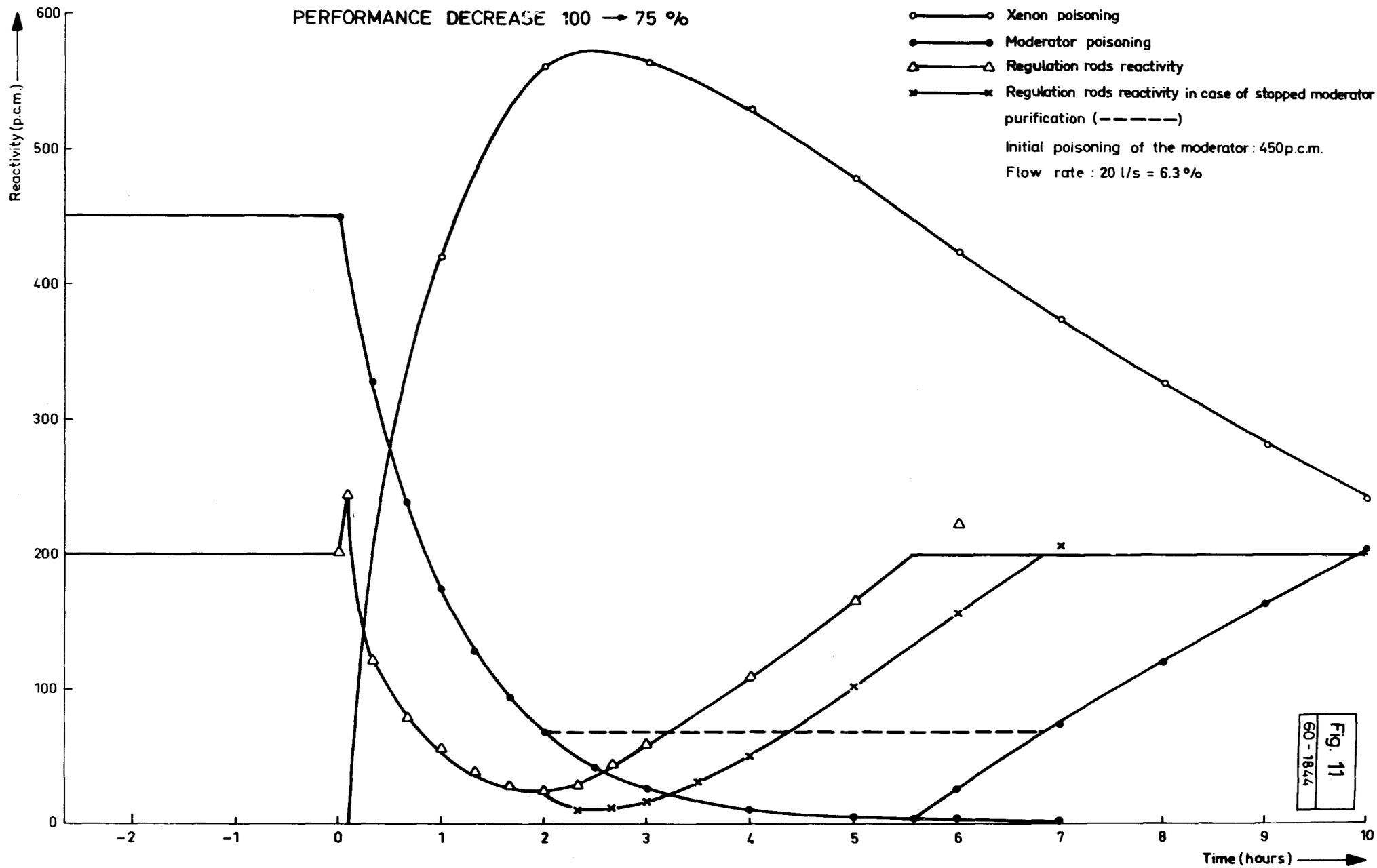
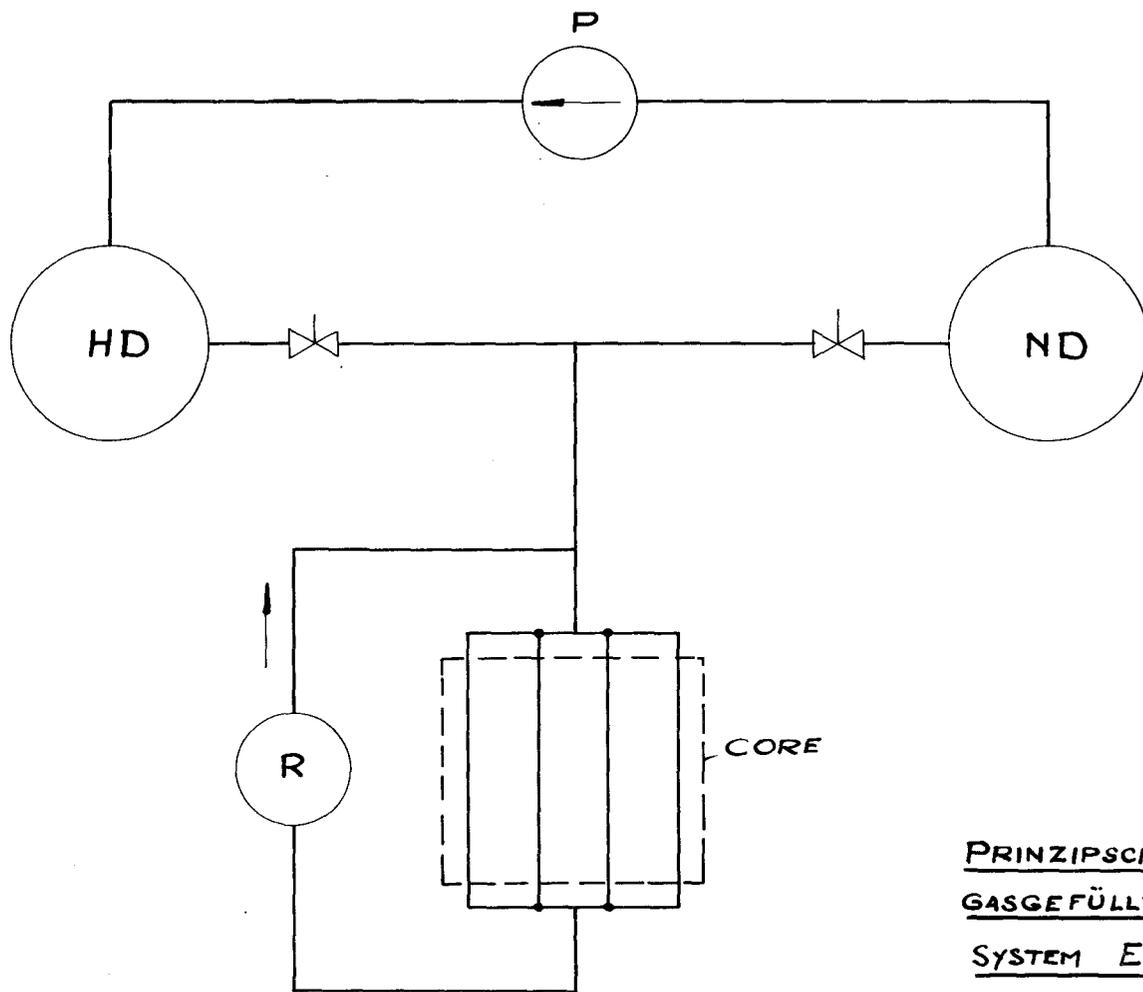
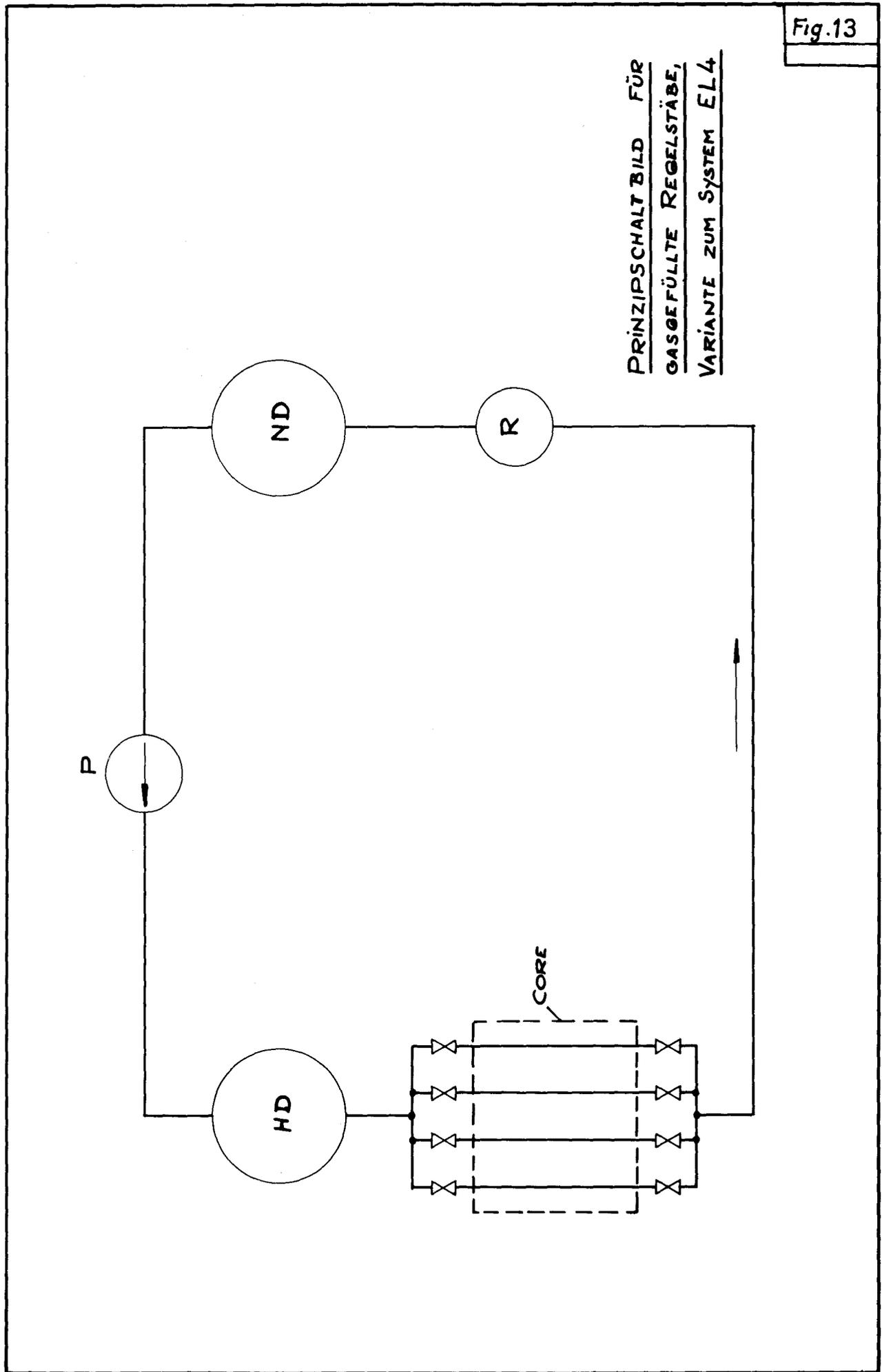


Fig. 11
60 - 1844



PRINZIPSCHALTBILD FÜR
GASGEFÜLLTE REGELSTÄBE,
SYSTEM EL4

Fig. 12

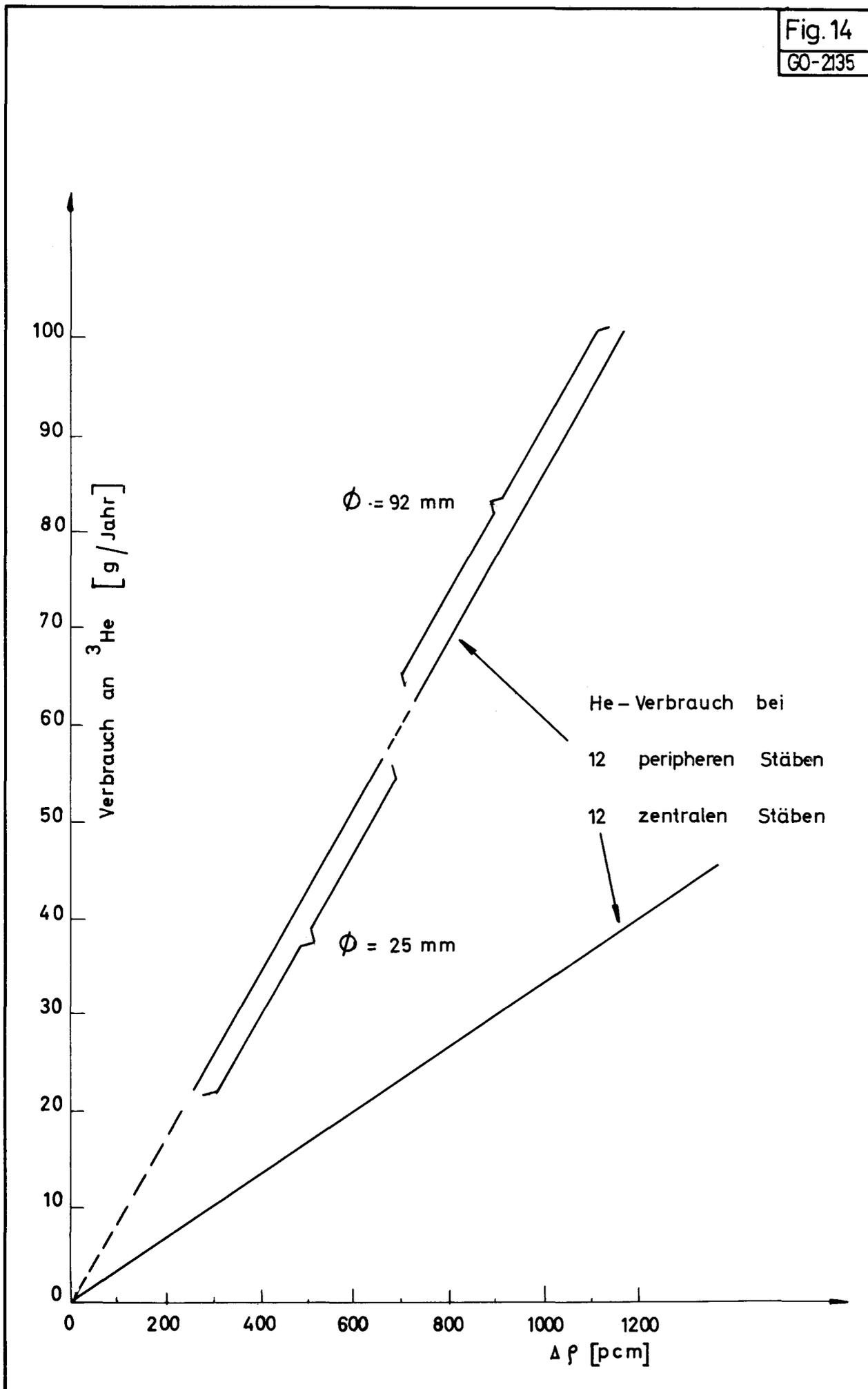


PRINZIPSCHALT BILD FÜR
GASGEFÜLLTE REGELSTÄBE,
VARIANTE ZUM SYSTEM EL4

Fig.13

Fig. 14

GO-2135



MODERATOR POISONING BY CONTINUOUSLY WORKING INJECTION

- ① ——— Cd SO_4 poisoning of the whole circuit, from f_0 to f_1
- ② - - - - Cd SO_4 poisoning within the vessel.
- ③ ——— Counterbalancing movement of the control rods.
- ④ - - - - Normal position of the control rods, at f_r

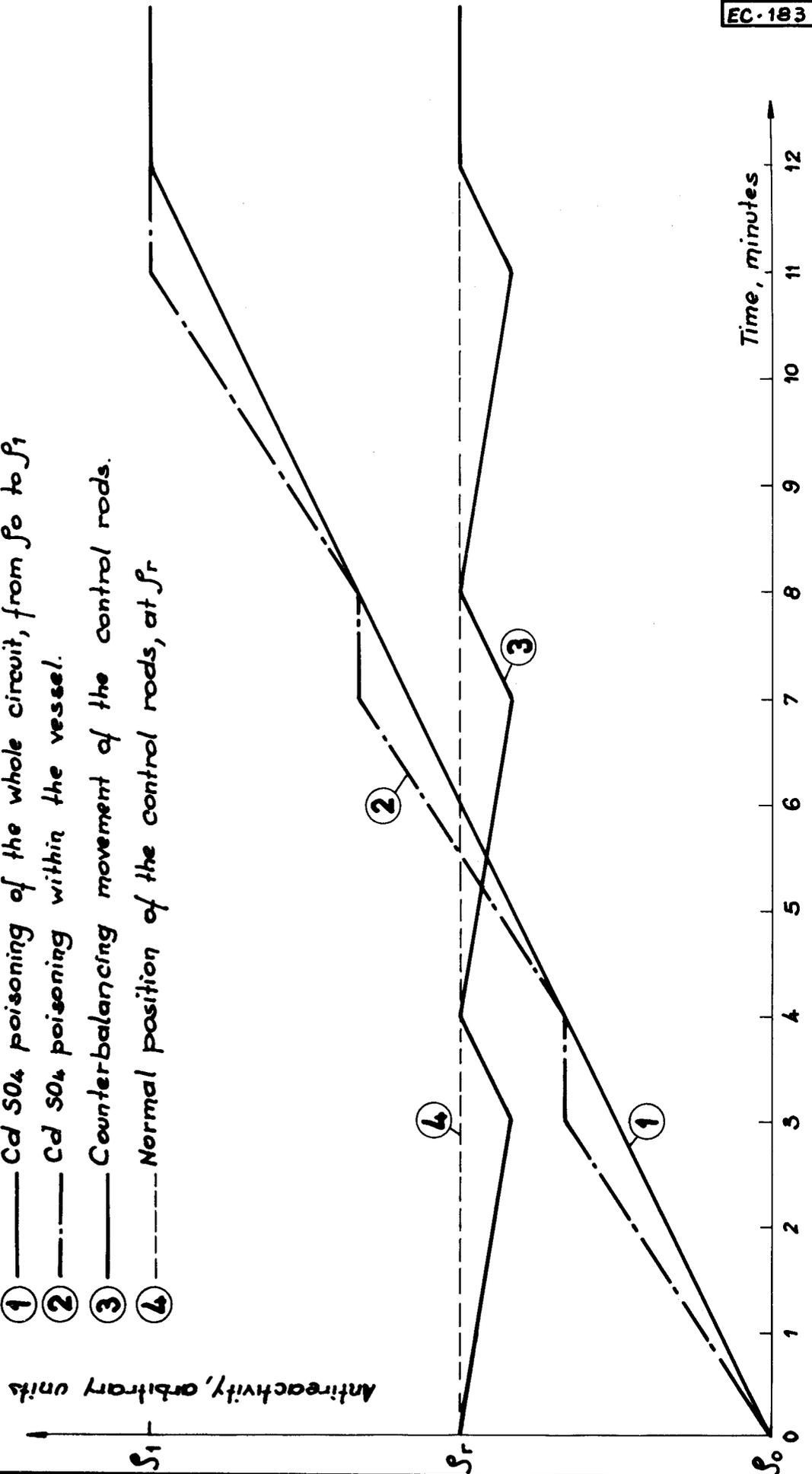


Fig.15
EC-183

Purification du circuit de mode "iteur par
une ou deux colonnes d'échangeurs d'ions

Quantité totale de $D_{2O} = 76 m^3$

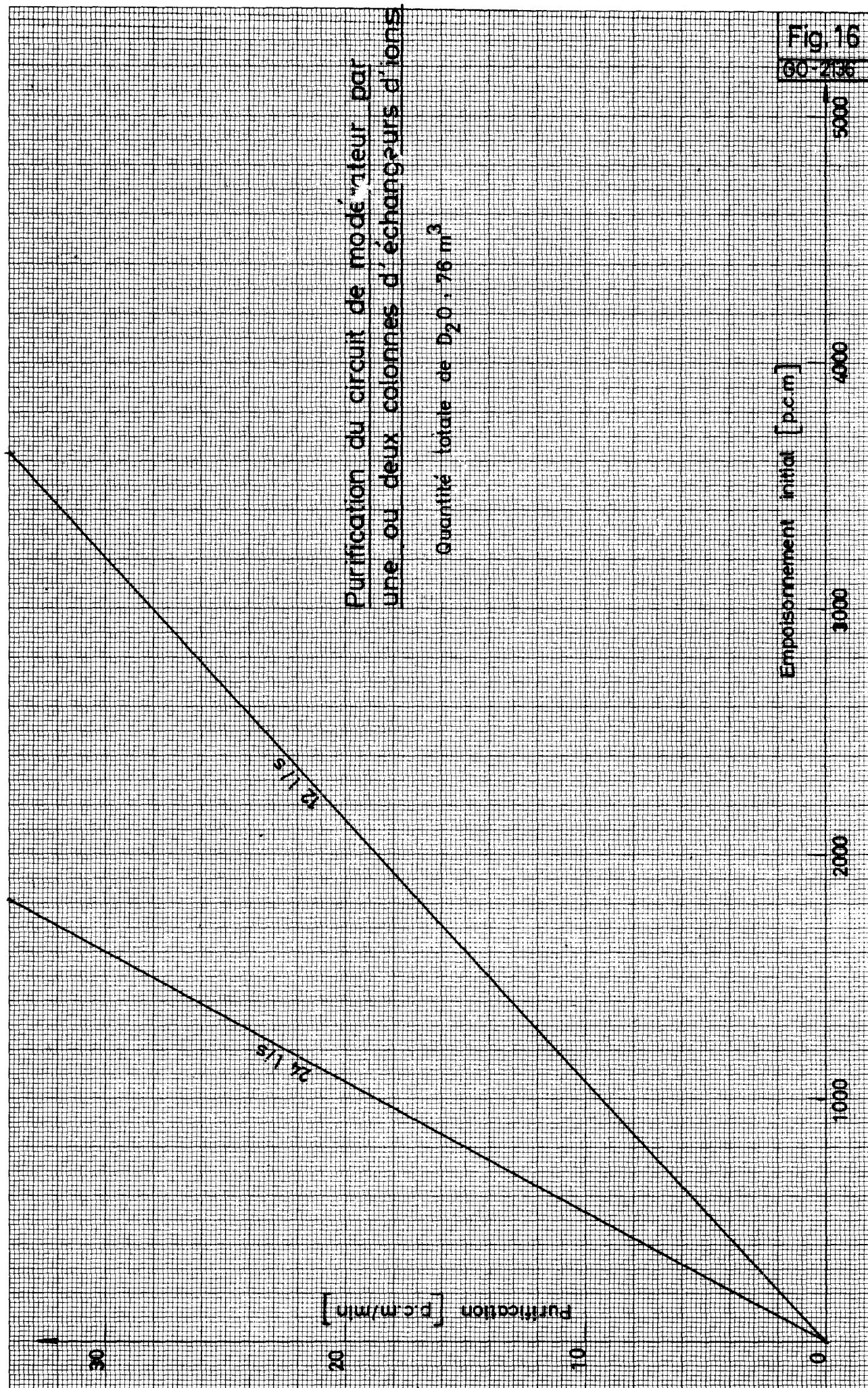
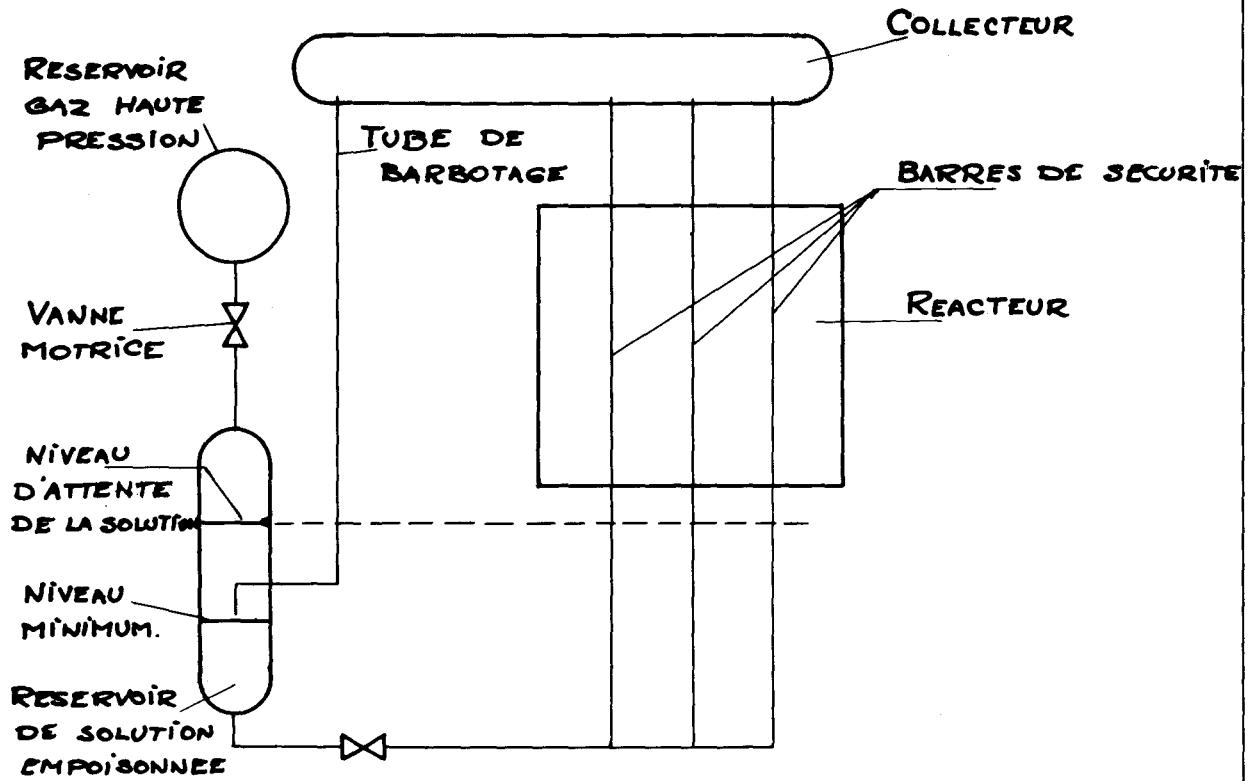


Fig. 16
60-236

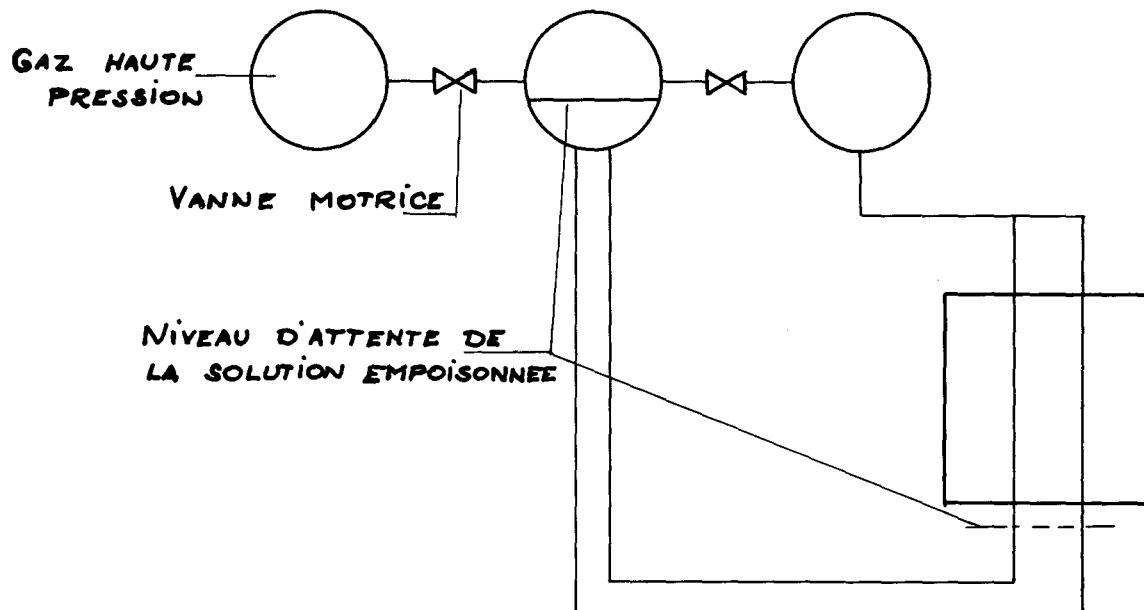
Fig. 17

SYSTEMES DE BARRES LIQUIDES ENVISAGES

a) TUBE DE BARBOTAGE



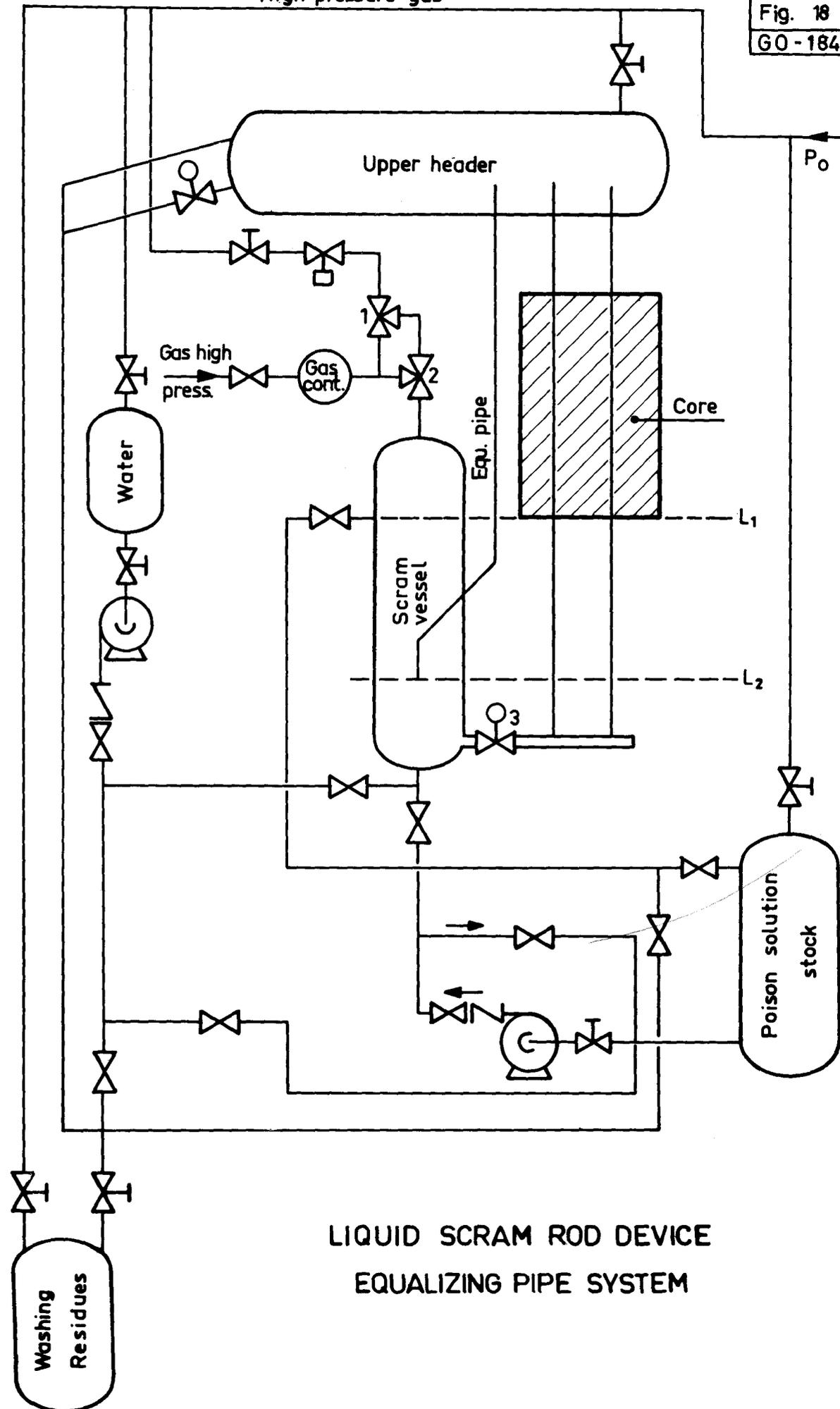
b) PRESSION ET GRAVITE



Référence: ISPRA 1141

High pressure gas

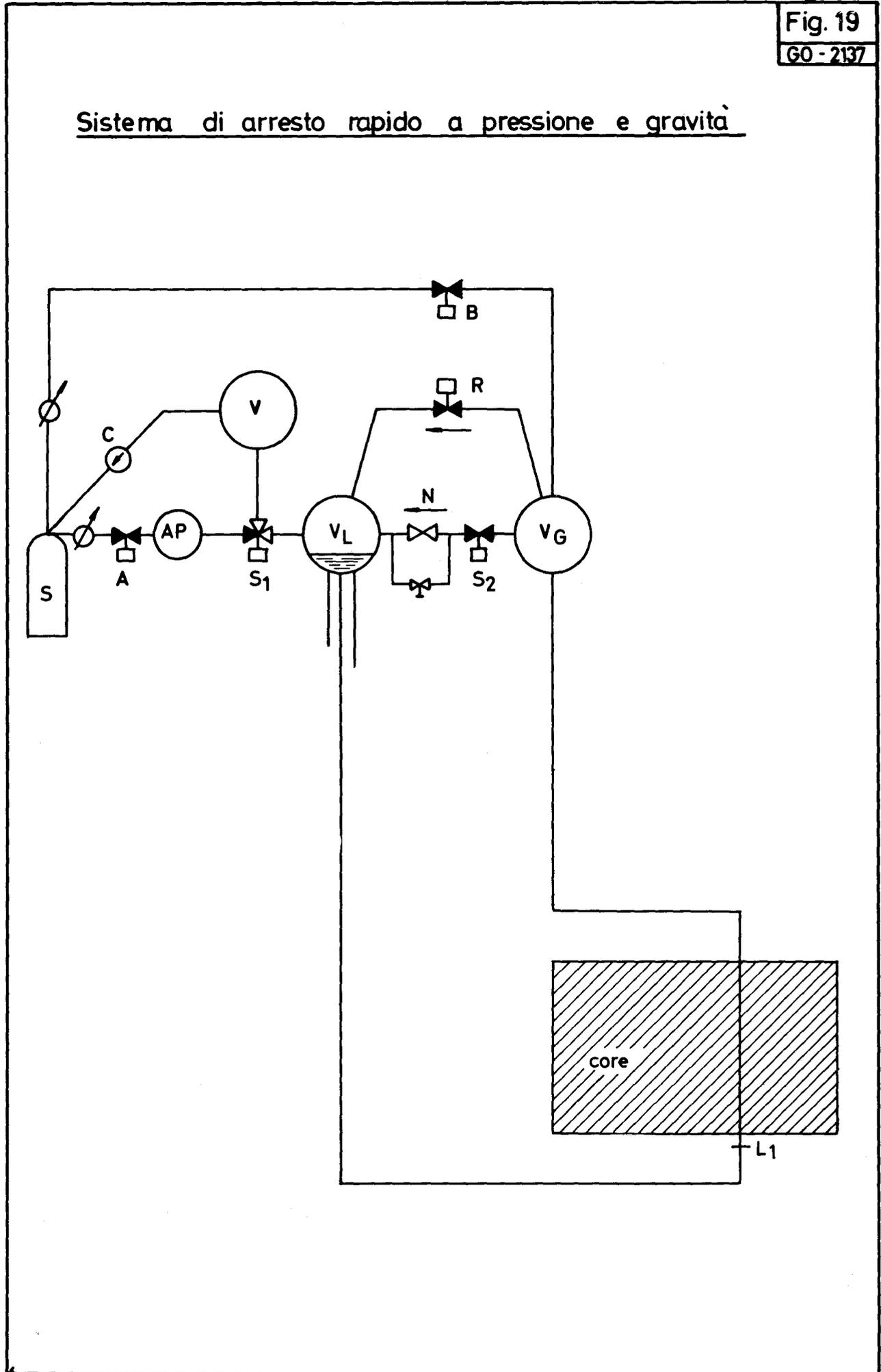
Fig. 18
GO-1848



LIQUID SCRAM ROD DEVICE
EQUALIZING PIPE SYSTEM

Fig. 19
GO - 2137

Sistema di arresto rapido a pressione e gravità



EXCURSION D'ACTIVITE DUE AU MCA

A_g
[pcm]

— 250 MWe, variante indicative 1986, vidange totale = 4000 pcm

- - - 500 MWe, vidange totale = 4500 pcm

Fig. 20
Go-2078

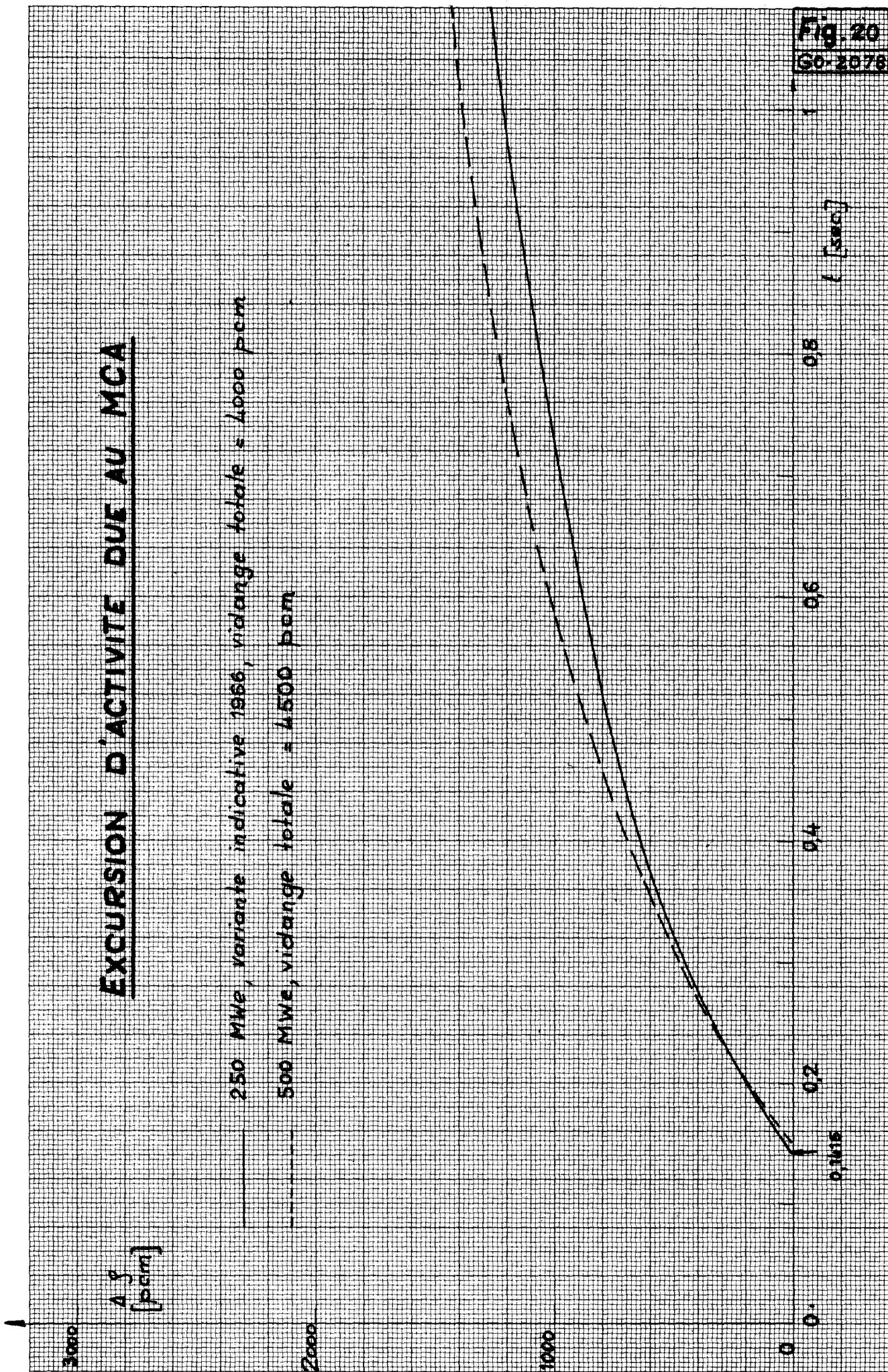
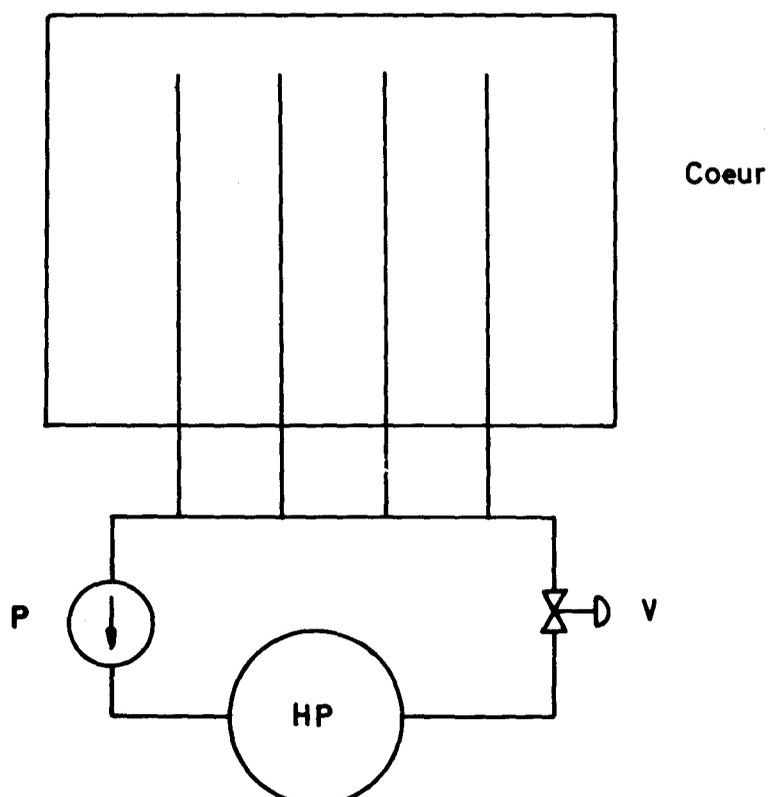


Fig. 21
60-2138

Schéma des barres de scram gazeuses



CIRCUITS AUXILIAIRES NON DESSINES

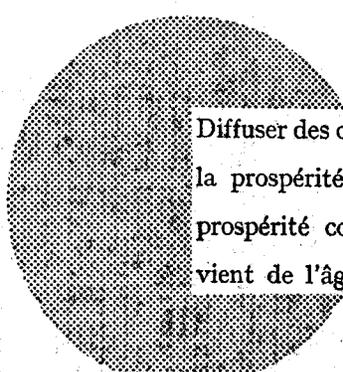
AVIS AU LECTEUR

Tous les rapports Euratom sont signalés, au fur et à mesure de leur publication, dans le périodique mensuel **EURATOM INFORMATION**, édité par le Centre d'information et de documentation (CID). Pour souscrire un abonnement (1 an : FF 75, FB 750) ou recevoir un numéro spécimen, prière d'écrire à :

Handelsblatt GmbH
"Euratom Information"
Postfach 1102
D-4 Düsseldorf (Allemagne)

ou à

Office de vente des publications
des Communautés européennes
2, Place de Metz
Luxembourg



Diffuser des connaissances c'est distribuer de la prospérité — j'entends la prospérité collective et non la richesse individuelle — et cette prospérité contribue largement à la disparition du mal qui nous vient de l'âge des ténèbres.

Alfred Nobel

BUREAUX DE VENTE

Tous les rapports Euratom sont vendus dans les bureaux suivants, aux prix indiqués au verso de la première page de couverture (lors de la commande, bien indiquer le numéro EUR et le titre du rapport, qui figurent sur la première page de couverture).

OFFICE CENTRAL DE VENTE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES

2 place de Metz, Luxembourg (Compte chèque postal N° 191-90)

BELGIQUE — BELGIË

MONITEUR BELGE
40-42, rue de Louvain - Bruxelles
BELGISCH STAATSBLAD
Leuvenseweg 40-42, - Brussel

LUXEMBOURG

OFFICE CENTRAL DE VENTE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
9, rue Goethe - Luxembourg

DEUTSCHLAND

BUNDESANZEIGER
Postfach - Köln 1

NEDERLAND

STAATSDRUKKERIJ
Christoffel Plantijnstraat - Den Haag

FRANCE

SERVICE DE VENTE EN FRANCE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
26, rue Desaix - Paris 15^e

UNITED KINGDOM

H. M. STATIONERY OFFICE
P. O. Box 569 - London S.E.1

ITALIA

LIBRERIA DELLO STATO
Piazza G. Verdi, 10 - Roma

EURATOM — C.I.D.
51-53, rue Belliard
Bruxelles (Belgique)