

CEA-R 2533 - GARIOD Roger, MERCHIE Francis, O'BYRNE Guy

CONTROLE DE PUISSANCE DES PILES A EAU PAR MESURE D'ACTIVITE  
EN AZOTE 16.

Sommaire. - Au Centre d'Etudes Nucléaires de GRENOBLE, les piles piscine à coeur ouvert MELUSINE (2 MW) et SILOE (15 MW) sont pilotées à puissance globale constante au moyen de chaînes "Azote 16".

Les chaînes linéaires classiques de pilotage répondent instantanément aux fluctuations rapides de puissance ce qui est nécessaire pour la sécurité des réacteurs, mais leurs indications de puissance sont erronées car elles sont affectées par les déformations locales de flux thermique dues aux mouvements de compensation des barres de contrôle.

Les chaînes "Azote 16" par contre donnent une indication de puissance globale proportionnelle au flux moyen de fission et indépendante des mouvements de barre, mais leur temps de réponse est de 15 secondes.

Un pilotage à puissance globale constante est donc possible par correction lente du signal de référence du pilotage automatique commandé par les chaînes linéaires au moyen d'un terme correcteur délivré par les chaînes "N. 16". Ceci est fait automatiquement à MELUSINE, manuellement à SILOE.

1964

p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

CEA-R 2533 - GARIOD Roger, MERCHIE Francis, O'BYRNE Guy

POWER CONTROL OF WATER REACTORS USING NITROGEN 16 ACTIVITY  
MEASUREMENTS.

Summary. - At the GRENOBLE Nuclear Research Centre, the open-core swimming pool reactors MELUSINE (2 MW) and SILOE (15 MW) are controlled at a constant overall power using nitrogen-16 channels.

The conventional linear control channels react instantaneously to the rapid power fluctuations, this being necessary for the safety of the reactors, but their power indications are erroneous since they are affected by local deformations of the thermal flux caused by the compensation movements of the control rods.

The nitrogen-16 channels on the other hand give an indication of the overall power proportional to the mean fission flux and independent of the rod movements, but their response time is 15 seconds.

A constant overall power control is thus possible by a slow correction of the reference signal given by the automatic control governed by the linear channels by means of a correction term given by the "N-16" channels. This is done automatically in MELUSINE and manually in SILOE.

1964

p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France



**CONTROLE DE PUISSANCE DES PILES A EAU  
PAR MESURE D'ACTIVITE EN AZOTE 16**

par

Roger GARIOD , Francis MERCHIE , Guy O'BYRNE

**Rapport C E A - R 2533**

**1964**

Ba

CENTRE D'ETUDES  
NUCLEAIRES DE GRENOBLE



*Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.*

*The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.*

**C.E.A. - C.E.N.G.**

**Le 12 MAI 1964**

**SERVICE DES PILES**

**CONTROLE DE PUISSANCE DES PILES A EAU  
PAR MESURE D'ACTIVITE EN AZOTE 16**

**R. GARIOD  
F. MERCHIE  
G. O'BYRNE**



## R E S U M E

Au Centre d'Etudes Nucléaires de GRENOBLE, les piles piscine à coeur ouvert MELUSINE (2 MW) et SILOE (15 MW) sont pilotées à puissance globale constante au moyen de chaînes " Azote 16 ".

Les chaînes linéaires classiques de pilotage répondent instantanément aux fluctuations rapides de puissance ce qui est nécessaire pour la sécurité des réacteurs, mais leurs indications de puissance sont erronées car elles sont affectées par les déformations locales de flux thermique dues aux mouvements de compensation des barres de contrôle.

Les chaînes " Azote 16 " par contre donnent une indication de puissance globale proportionnelle au flux moyen de fission et indépendante des mouvements de barre, mais leur temps de réponse est de 15 secondes.

Un pilotage à puissance globale constante est donc possible par correction lente du signal de référence du pilotage automatique commandé par les chaînes linéaires au moyen d'un terme correcteur délivré par les chaînes " N<sup>16</sup> ". Ceci est fait automatiquement à MELUSINE, manuellement à SILOE.





## I. INTRODUCTION

Les trois réacteurs implantés dans le Centre d'Etudes Nucléaires de GRENOBLE sont du type piscine à Uranium enrichi, modérés et refroidis à l'eau légère.

La puissance nominale de " MELUSINE " est de 2 MW, celle de " SILOE " est de 15 MW, " SILOETTE " modèle nucléaire de " SILOE " ne dépassera pas 100 kW.

Le cycle de fonctionnement de MELUSINE est d'une semaine, du lundi à 12 h jusqu'au samedi à 18 h, avec arrêt du samedi jusqu'au lundi suivant. Celui de SILOE est de 3 semaines en continu, les cycles étant séparés entre eux par une semaine d'arrêt permettant notamment l'entretien et les vérifications périodiques, l'enfournement et le défournement des manipulations, le changement de coeur, etc...

Pour des raisons évidentes liées à la bonne marche des réacteurs et des manipulations présentes en pile (boucles et capsules), il est nécessaire de fonctionner à puissance globale constante. La chaîne " N<sup>16</sup> " comme nous le verrons donne une indication de puissance globale.

Le principe adopté pour piloter à puissance globale constante est le suivant :

- pilotage automatique à partir des indications d'une chaîne linéaire mesurant le flux thermique en un point du réflecteur. A MELUSINE comme à SILOE, le signal est fourni par une chambre compensée aux rayonnements  $\gamma$  (du type CEA-CCP 1N10 à MELUSINE et CEA-CCC.2 à SILOE) ; ce signal est introduit dans le calculateur de pilotage pour comparaison avec la puissance affichée et élaboration de l'ordre de montée ou de descente d'une barre de pilotage. La réponse de ce système à une variation de puissance réelle est instantanée.

- enregistrement en continu de la puissance globale de la pile fournie par la chaîne N<sup>16</sup>. A MELUSINE, le signal de la chaîne N<sup>16</sup> est introduit également dans le calculateur de pilotage comme correction au signal de la chaîne linéaire. A SILOE, cette correction est faite manuellement en fonction de la puissance lue sur la chaîne N<sup>16</sup> ; le temps de réponse de la chaîne N<sup>16</sup> est de l'ordre de 14 secondes à SILOE et de 13 secondes à MELUSINE.

- vérification et recalages éventuels des indications des chaînes N<sup>16</sup> par comparaison avec les bilans thermiques effectués périodiquement. A SILOE, par exemple, un bilan thermique est établi toutes les 4 heures et après le démarrage de la pile, il faut attendre l'équilibre thermique soit environ 6 heures avant de pouvoir faire un bilan correct. Jusqu'à présent, ce système de pilotage a donné toutes satisfactions et a effectivement permis de piloter les piles à puissance thermique constante, ce qui simplifie beaucoup de problèmes.

Une mesure du flux  $\gamma$  dans le réflecteur, loin du cœur, pourrait également donner en principe une bonne indication de la puissance globale. Des expériences et des mesures faites à MELUSINE ont montré malgré tout que cette mesure subissait des influences dont il était difficile de s'affranchir totalement (Référence 3). Cette mesure est toutefois conservée à MELUSINE à titre indicatif.

## II. GENERALITES SUR LA MESURE DE L'ACTIVITE EN N<sup>16</sup> DE L'EAU :

Rappelons brièvement que la formation de l'Azote 16 est due à une réaction (n,p) sur l'Oxygène 16 contenu dans l'eau traversant le cœur. Cette réaction possède un seuil élevé (11 MeV) ce qui fait que la formation d'Azote 16 dépendra uniquement du flux de fission régnant dans tout le volume du cœur, donc de la puissance globale de la pile. L'Azote 16 formé a une période courte de 7,35 secondes et se désintègre en émettant des  $\beta$  et des  $\gamma$  énergiques ( $\gamma$  de 6,14 MeV dans 68% des cas) pour redonner de l'Oxygène 16.

D'autre part, l'activité en N<sup>16</sup> représente au moins 99% de l'activité totale de l'eau sortant du cœur, l'activité restante étant due à l'activité des impuretés, des produits de corrosion, des produits de fission et à des réactions moins importantes de formation d'Azote 17, d'Oxygène 19 et d'Argon 41.

La vie courte de l'Azote 16 est telle que son activité aura complètement disparu lorsque l'eau retournera dans le cœur après passage dans les bacs de désactivation et les échangeurs, et d'autre part l'Azote 16 se désintégrant pour redonner de l'Oxygène 16, la proportion du nuclide parent de l'Azote 16 demeurera en proportion constante dans l'eau.

La section efficace moyenne d'activation de l'Azote 16 sur le spectre de fission ( $\sigma = 18,5 \mu\text{b}$ ) est telle que l'activité de l'eau peut être mesurée facilement un certain temps après sa sortie du cœur.

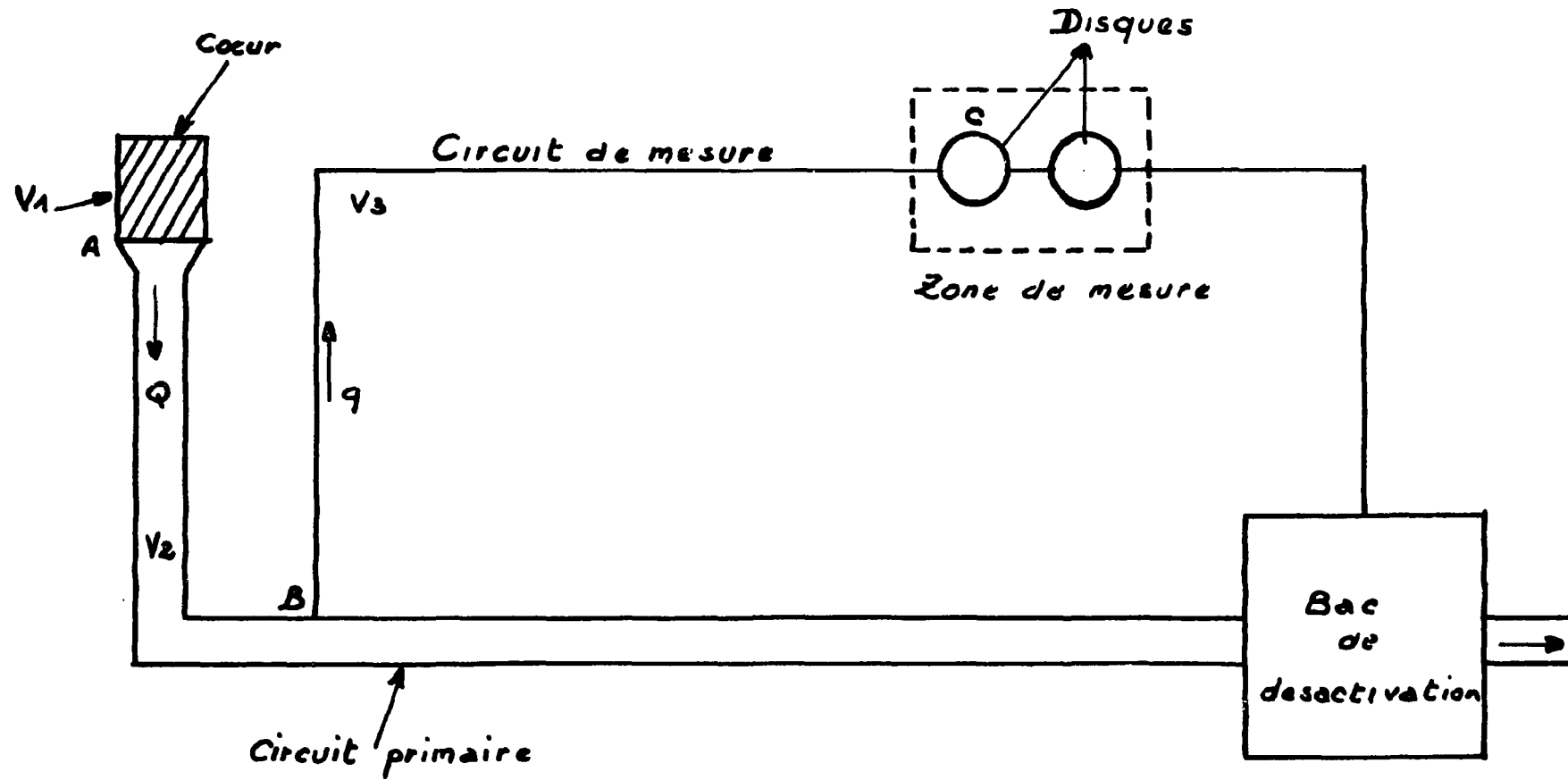
Tout ceci est donc favorable à une bonne mesure de la puissance globale de la pile par mesure de " l'activité N<sup>16</sup> " ; mesure qui ne sera pas affectée par les déformations locales de flux (cas des chaînes linéaires) provenant des effets de positions des barres qui varient pour compenser les effets Xénon et Samarium, l'effet du Burn-up et l'effet des dispositifs expérimentaux.

Le principe de la mesure consistera à prélever l'eau active dès sa sortie du cœur et à l'amener au point de mesure dans un temps suffisamment court par rapport à la période de l'Azote 16 de façon à ne pas perdre trop d'activité. Après passage dans le dispositif de mesure, l'eau sera rejetée dans les bacs de désactivation.

Le schéma de principe de l'installation sera donc le suivant : (fig. 1)

.../.

FIGURE 1. Schéma de principe



L'activité au point de mesure pour une puissance  $P$  de la pile sera donnée par l'expression suivante :

$$A = KP \left[ 1 - e^{-\frac{\lambda V_1}{Q}} \right] e^{-\frac{\lambda V_2}{Q}} e^{-\frac{\lambda V_3}{q}}$$

$A$  : activité au point de mesure,

$K$  : constante tenant compte des caractéristiques de l'appareil de mesure et des constantes intervenant dans le calcul de l'activation en fonction du flux de fission moyen,

$\lambda$  : constante de déclin de l'Azote 15,

$Q$  : débit de réfrigération primaire,

$q$  : débit dans le circuit de mesure,

$V_1$  : volume d'activation du coeur, constant pour un coeur donné,

$V_2$  : volume de désactivation (A à B) depuis la sortie du coeur jusqu'au piquage ; (volume constant donné par le volume des tuyauteries),

$V_3$  : volume de désactivation (B à C) depuis le piquage jusqu'au point de mesure, volume constant une fois définitivement fixé le point de mesure.

Nous avons :  $T$  = temps de transit de l'eau depuis sa sortie du coeur jusqu'au point de mesure. =  $\frac{V_2}{Q} + \frac{V_3}{q}$

Pour une puissance  $P$  donnée, l'activité en Azote 16, au point de mesure peut donc varier en fonction du débit  $Q$  du circuit primaire de réfrigération et du débit  $q$  propre au circuit de mesure. (Voir courbe 1 et courbe 2).

Il sera donc essentiel de maintenir ces débits rigoureusement constants pour obtenir une " mesure N<sup>16</sup> " stable.

Le débit primaire de réfrigération  $Q$  est en principe fixé d'une façon définitive. A MELUSINE, il est de 240 m<sup>3</sup>/h. A SILOE, il est de 1 480 m<sup>3</sup>/h et ne varie pas au cours d'un cycle, ni d'un cycle à un autre. Le débit propre au circuit de mesure, une fois choisi le temps de transit, ne varie pas lui non plus en cours de cycle ni d'un cycle à un autre.

.../.

Précisons qu'à MELUSINE, 1% de variation sur le débit  $q$  provoque une variation maximum sur l'activité de 2% : une variation de 6% autour du débit primaire  $Q$  donne une variation de 2% sur l'activité.

A SILOE, une variation de 1% sur  $q$  autour de 10 m<sup>3</sup>/h donne une variation de 1,4% sur l'activité et une variation de 1,7% sur  $Q$  autour de 1500 m<sup>3</sup>/h, donne une variation de l'ordre de 1,3% sur l'activité. Précisons que 1,7% sur  $Q$  représente 25 m<sup>3</sup>/h pour  $Q = 1500$  m<sup>3</sup>/h et que le réglage du débit primaire se fait à 5 m<sup>3</sup>/h près.

### III. INSTALLATION MELUSINE

Le choix du point de mesure de l'activité N<sup>16</sup> qui devait être situé avant le bac de désactivation a créé quelques difficultés dues au fait que rien n'avait été prévu lors de la construction. Finalement, un piquage situé à l'entrée du bac de désactivation amène l'eau active dans une zone protégée au moyen d'une pompe centrifuge d'un débit compris entre 0 et 2,5 m<sup>3</sup>/h. La mesure de débit est donnée à partir d'un débitmètre à moulinet FAURE-HERMAN dont la précision est de 1%.

Cette eau active peut passer au moyen d'un jeu de vannes dans un des 3 disques de mesure ce qui permet d'avoir des temps de transit de l'eau depuis la sortie du cœur jusqu'au point de mesure compris entre 10 et 26 secondes pour le débit maximum de la pompe. L'eau est ensuite refoulée dans le bac de désactivation.

Ces disques sont des petites capacités munies de chicanes assurant une bonne circulation de l'eau. Une vanne de réglage du débit permet d'ajuster le temps de transit à la valeur choisie qui est de 13 secondes. Les disques sont placés dans des casemates en plomb de façon à les isoler de l'activité ambiante, de l'activité des tuyauteries et de l'activité des autres disques. Le dispositif de mesure de l'activité est placé sur le disque choisi à l'intérieur de la casemate de plomb. Ce dispositif de mesure est constitué d'une chambre d'ionisation de 900 cm<sup>3</sup>, remplie d'air à la pression atmosphérique, à parois de Graphite, spécialement construite à cet usage, (voir fig. 2), suivie d'un préamplificateur constitué d'un tube électromètre et d'une résistance de charge de  $10^{11}$  Ohms, d'un amplificateur à courant continu du type ACC.2 et d'un indicateur de puissance intégrée.

La sensibilité de la chambre est de  $10^{-10}$  A/R/h. Le courant de fuite est de  $2 \cdot 10^{-14}$  A. A 2 MW, on obtient un courant de  $4 \cdot 10^{-11}$  A. Cette chaîne possède une bonne précision et une bonne stabilité autour de la puissance de régime du réacteur (2 MW).

Des mesures ont été faites au moyen d'une chaîne à impulsions dont la fidélité s'est avérée moins bonne que pour la chaîne à courant continu. Ceci est dû au nombre d'éléments

électroniques nécessaires (préampli, amplificateur, tiroir à seuil, échelle de comptage, intégrateur); la moindre variation de la très haute tension  $\pm \frac{1}{1000}$  par exemple, entraîne une erreur de  $\pm 1/100$  sur le taux de comptage.

La chaîne N<sup>16</sup> a été progressivement étalonnée par rapport aux bilans thermiques effectués 36 heures au moins après le démarrage de MELUSINE de façon à se trouver dans de bonnes conditions de mesures thermiques (équilibre des températures).

Finalement, la chaîne N<sup>16</sup> donne à  $\pm 1,5\%$  près les mêmes indications que la puissance thermique. La vérification de l'indépendance des indications N<sup>16</sup> par rapport aux effets cités dans le paragraphe 2 est concluante.

Le pilotage à indication constante sur la chaîne linéaire entraînait pour la puissance globale une variation hebdomadaire liée à l'effet Xénon de 10% et une variation au cours du cycle de combustible liée au Burn-up de 5%. La chaîne N<sup>16</sup> a permis de s'affranchir de ces variations. Au vu, de ces résultats, il a été décidé d'introduire le signal de la chaîne N<sup>16</sup> dans le calculateur de pilotage (Référence 2).

Pour réaliser cette super-régulation à partir du signal N<sup>16</sup>, une chaîne permet la correction lente de la tension de référence du pilote à partir de l'intégrale des écarts entre l'indication N<sup>16</sup> et une référence qui devient ainsi la véritable référence du pilote pour la régulation à long terme.

En effet, le retard de l'information N<sup>16</sup> ne permet que de faire une régulation à faible bande passante (produit gain bande passante  $< 1/\text{retard}$ ), ce qui est très suffisant puisque le but de cette stabilisation est de corriger les dérives lentes produites par les mouvements de barre sur la mesure de la puissance par une chaîne neutronique ponctuelle.

L'intégrateur par son grand gain continu procure une erreur statique du système négligeable et permet de régler facilement la bande passante.

# Principe de la chaine

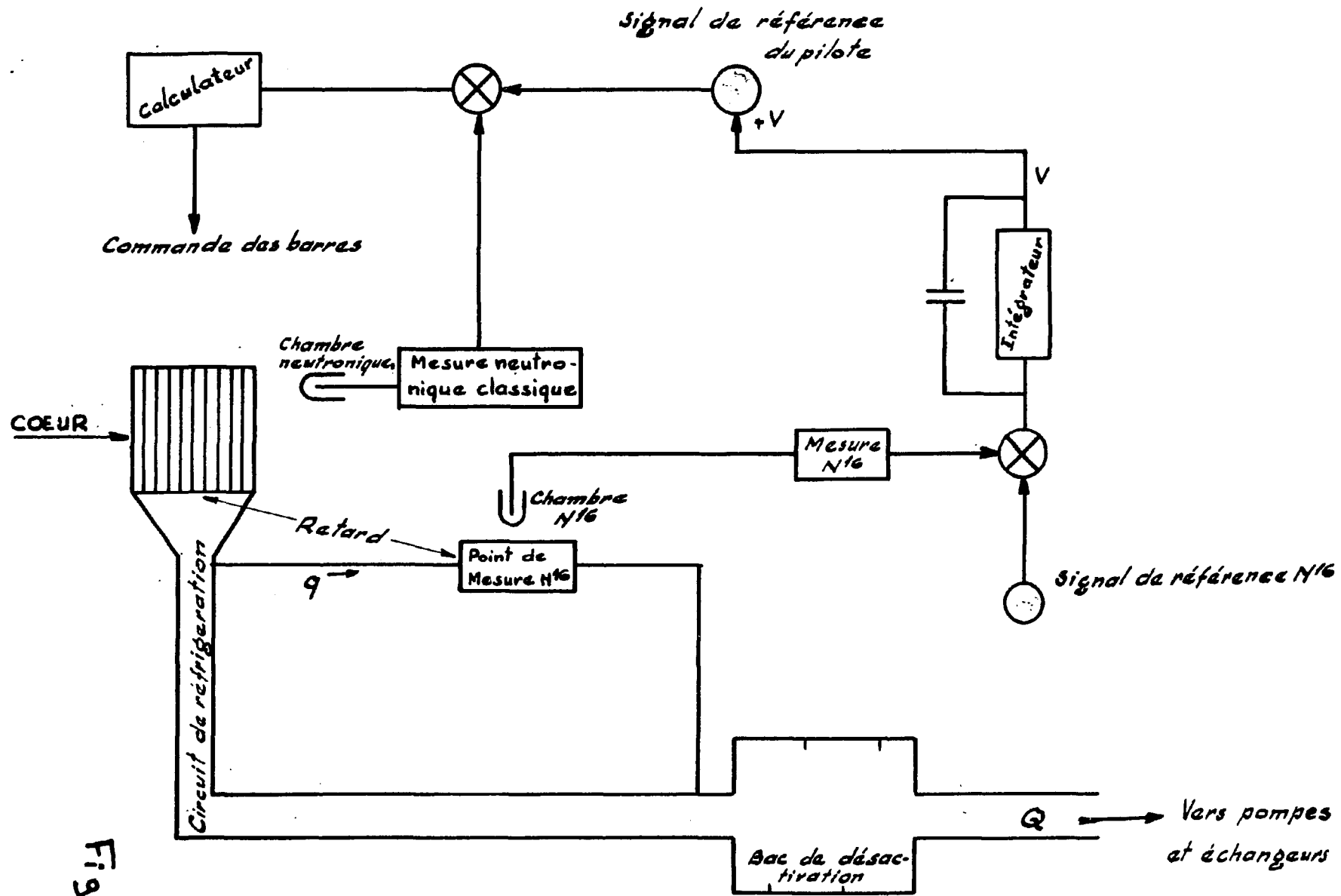


Fig: 2



#### IV. INSTALLATION SILOE

La mesure de puissance par mesure de l'activité  $N^{16}$  était prévue dès la construction. Sur le collecteur de débit primaire de réfrigération à la sortie du coeur, un piquage amène l'eau active dans le dispositif de mesure qui est placé dans une casemate en béton. Le débit de ce circuit peut se régler entre 0 et 20 m<sup>3</sup>/h ; il est mesuré par un débitmètre FAURE-HERMAN qui assure une précision de 1 %. Le débit choisi est fixé à 10 m<sup>3</sup>/h, ce qui donne un temps de transit de 14 secondes. La pompe de circulation refoule l'eau après passage dans des disques identiques à ceux de MELUSINE dans un des bacs de désactivation.

L'ensemble électro-pompe, vannes d'isolement et de réglage est situé dans une fosse protégée alors que seuls sont placés dans la casemate de béton les disques et les appareils de mesure. La chambre de mesure est une chambre d'ionisation à parois de Graphite identique à celle de MELUSINE, remplie d'air à la pression atmosphérique. Elle est suivie d'un préamplificateur linéaire constitué d'un tube électromètre et d'une résistance de charge de 10<sup>11</sup> Ohms. L'amplificateur est standard, transistorisé, à grand gain et faible impédance de sortie. La sortie de l'amplificateur est reliée à un enregistreur MECI placé en salle de contrôle et à un galvanomètre situé sur le coffret local de commande de l'installation. Un intégrateur en local donne directement la puissance intégrée, (fig. 4).

Depuis 2 mois, une chambre en Aluminium d'un volume de 3 litres environ est à l'essai. Elle permet d'utiliser une résistance de mesure de 10<sup>10</sup> Ohms. Par la suite, il est probable que seule cette chambre servira à la mesure car elle a donné toutes satisfactions jusqu'à maintenant.

L'étalonnage de la chaîne  $N^{16}$  de SILOE s'est fait par rapport aux bilans thermiques précis effectués par le Service des Transferts Thermiques du Centre d'Etudes Nucléaires de GRENOBLE pendant la période de démarrage de SILOE. En marche normale, la référence de puissance est donnée par la chaîne  $N^{16}$ . Le pilotage automatique se fait à partir du signal fourni par la chaîne linéaire mais les opérateurs recalent manuellement la puissance par rapport à l'indication donnée par la chaîne  $N^{16}$ . Un bilan thermique banal mais suffisamment précis est effectué toutes les 4 heures et sert de vérification. L'écart entre les deux mesures ne dépasse jamais 200 kW à 15 MW, soit 1,3 %. (La majeure partie des mesures se situe à  $\pm 75$  kW autour de 15 MW).

Le signal de la chaîne  $N^{16}$  n'a pas été introduit dans le calculateur de pilotage, l'expérience montrant qu'il était facile et rapide de recalculer manuellement.

Le pilotage à puissance globale à partir de la chaîne  $N^{16}$  a permis de constater qu'un pilotage à partir de la chaîne linéaire introduirait des fluctuations importantes sur la puissance, la chambre d'ionisation de la chaîne linéaire étant fortement influencée par les mouvements de barre en cours de cycle.

.. / .

La figure 3 montre l'évolution des indications de la chaîne linéaire en cours de cycle. Si le pilotage était effectué à partir de l'indication de cette chaîne en début de cycle, l'erreur atteindrait environ 16 % de la puissance nominale qui est de 15 MW.

Au démarrage du réacteur en début de cycle, après arrêt prolongé, l'indication N<sup>16</sup> est indispensable car d'une part le premier bilan thermique ne peut se faire que 6 heures environ après le palier à 15 MW, l'équilibre thermique étant alors atteint, et d'autre part l'effet du changement de coeur et des déplacements de dispositifs expérimentaux intervenus pendant l'arrêt combiné avec la montée rapide de l'effet Xénon (3.200 pcm en 36 heures, ce qui impose les mouvements de barre correspondants) font que le flux local lu par la chambre de pilotage est fortement perturbé et empêche de se fier à son indication autrement que de façon grossière.

## V. CONCLUSION

A l'heure actuelle, il serait difficile aux exploitants des réacteurs du Centre d'Etudes Nucléaires de GRENOBLE de se passer des mesures de puissance par Azote 16, les avantages d'un fonctionnement à puissance globale constante étant nombreux.

D'un principe et d'un emploi simples, elles resteront indispensables tant que d'autres méthodes plus avantageuses n'auront pas été mises au point. Leurs inconvénients résultent d'une part de leur temps de réponse de l'ordre de 15 secondes et d'autre part des variations qu'elles peuvent donner lorsque les débits Q ou q ne sont pas fixes.

Pour un pilotage à puissance constante soit à 2 MW pour MELUSINE, soit à 15 MW pour SILOE, le temps de réponse n'est certainement pas un inconvénient majeur. Même lorsqu'il s'agit d'effectuer des paliers à des niveaux différents de puissance, la référence est donnée par l'Azote 16 et pour passer d'un palier à un autre le temps de réponse n'est pas gênant.

En ce qui concerne les débits, une surveillance périodique des instruments de mesure de débit permet de s'affranchir des erreurs possibles. Quant aux variations voulues de débit primaire par exemple, des courbes d'étalonnage permettent un recalage. (courbes 1 - 2).

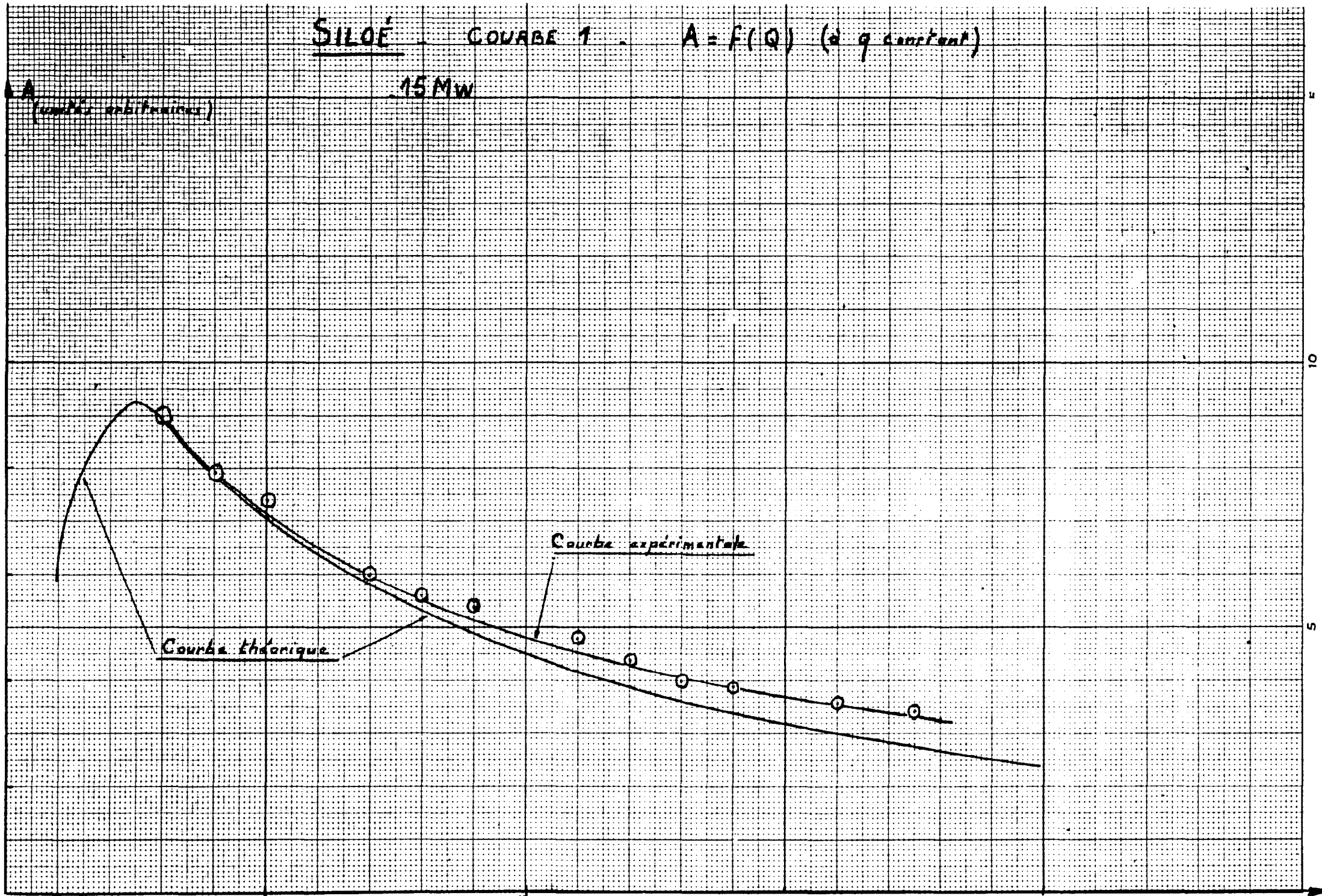
## BIBLIOGRAPHIE

- [ 1 ] Chaîne de puissance " Azote 16 " sur le circuit de réfrigération de MELUSINE.  
R. TIBERGHIE - Rapport C.E.A. N° 2211 - 1962.
  
- [ 2 ] Essais de stabilisation automatique de MELUSINE sur chaîne N<sup>16</sup>  
P. COUDRET - Note d'Etude EL/EG-21 -C.E.N./G.
  
- [ 3 ] Comparaison des indications de la chaîne  $\gamma$ , de la chaîne N<sup>16</sup> et des mesures de bilan thermique dans la pile MELUSINE.  
G. O'BYRNE. Note à paraître.
  
- [ 4 ] Contrôle de la puissance du réacteur SILOE de 15 MW par une mesure de l'activité de l'eau en Azote 16.  
F. MERCHIE - Note à paraître.

SILOE COURBE 1 .  $A = f(Q)$  (à  $q$  constant)

15 MW

A  
(unités arbitraires)



Courbe théorique

Courbe expérimentale

500

1000

1500

2000

$Q \text{ m}^3/\text{h}$

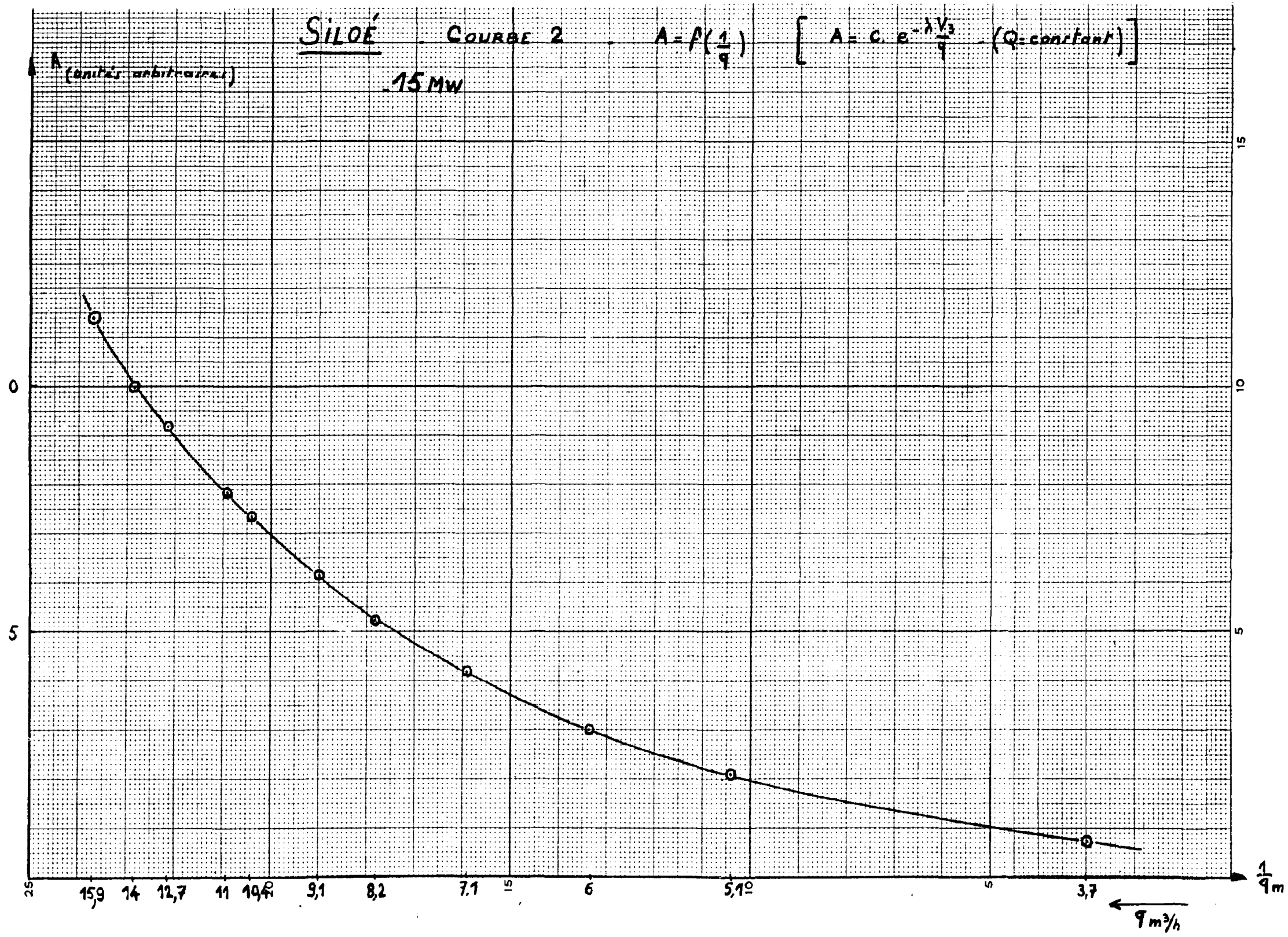


SILÓÉ COURBE 2

$A = f\left(\frac{1}{q}\right)$  [  $A = c \cdot e^{-\lambda \frac{V_3}{q}}$  (Q-constant) ]

A (unités arbitraires)

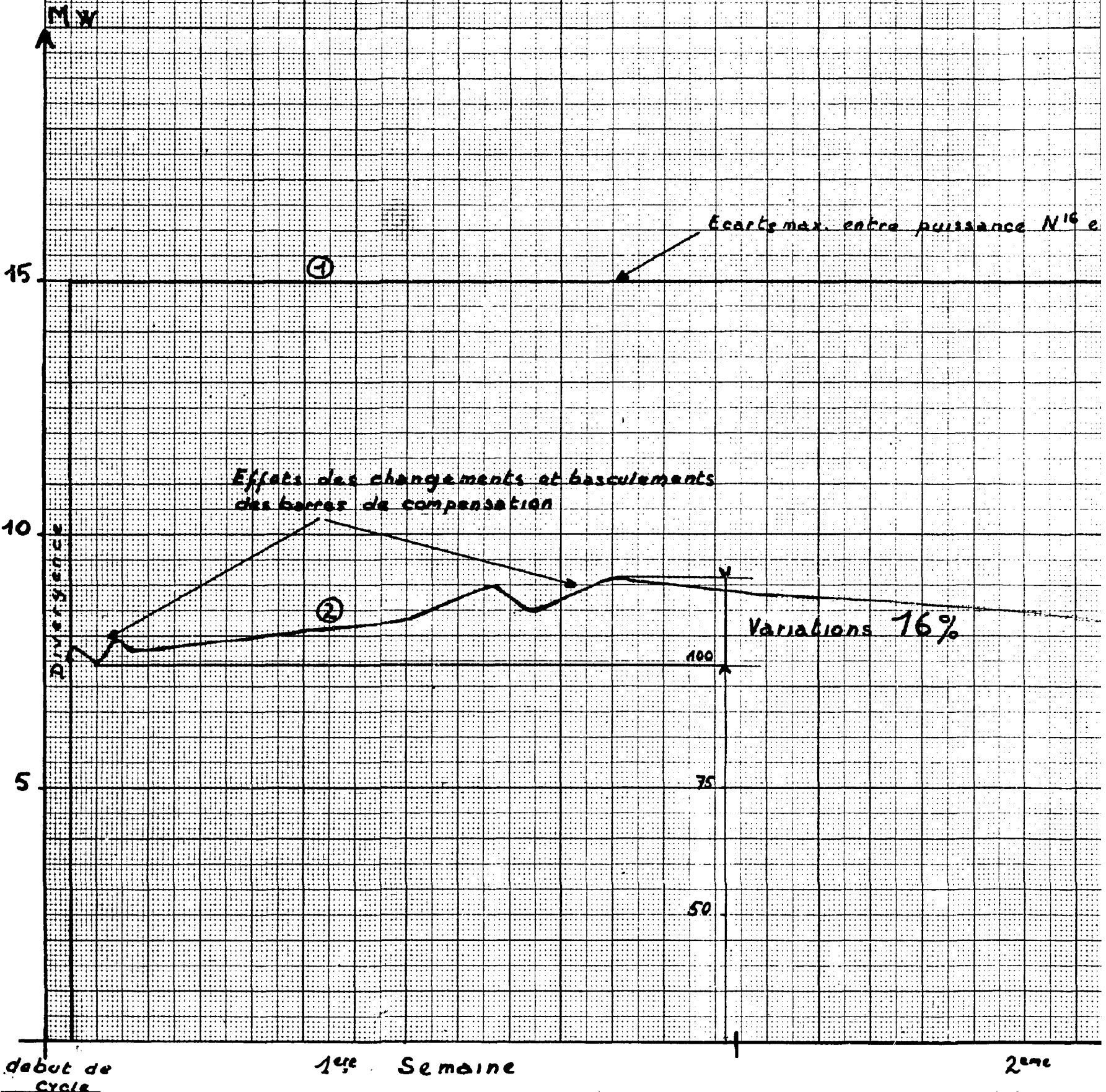
15 MW



# SILOE. Courbes de puissance pendant 1.

Courbe ①. Puissance N<sup>16</sup> contra

Courbe ②. Evolution des indicat





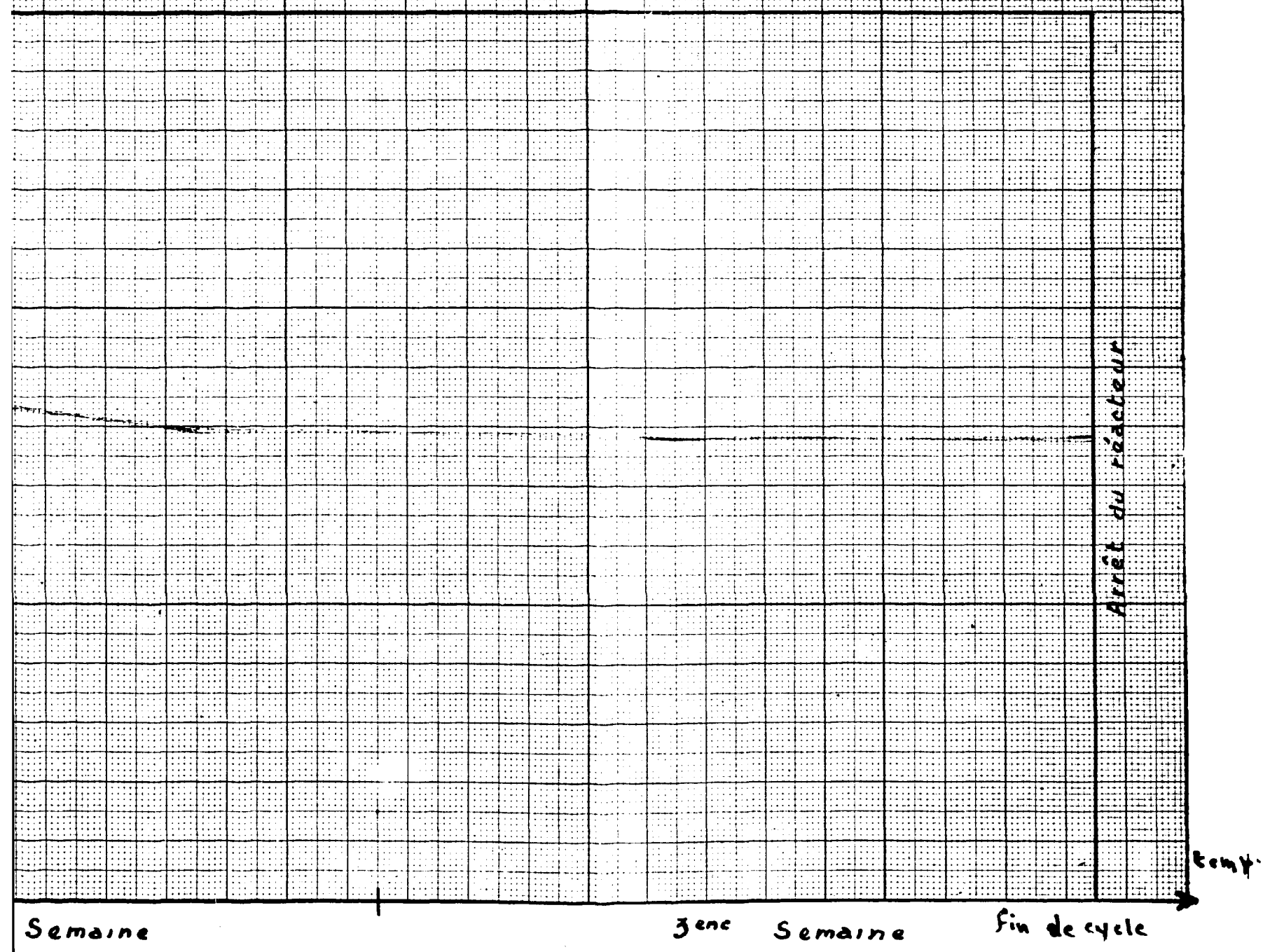
cycle de fonctionnement de 3 semaines

Fig. 3

les par bilans thermiques toutes les 4 heures

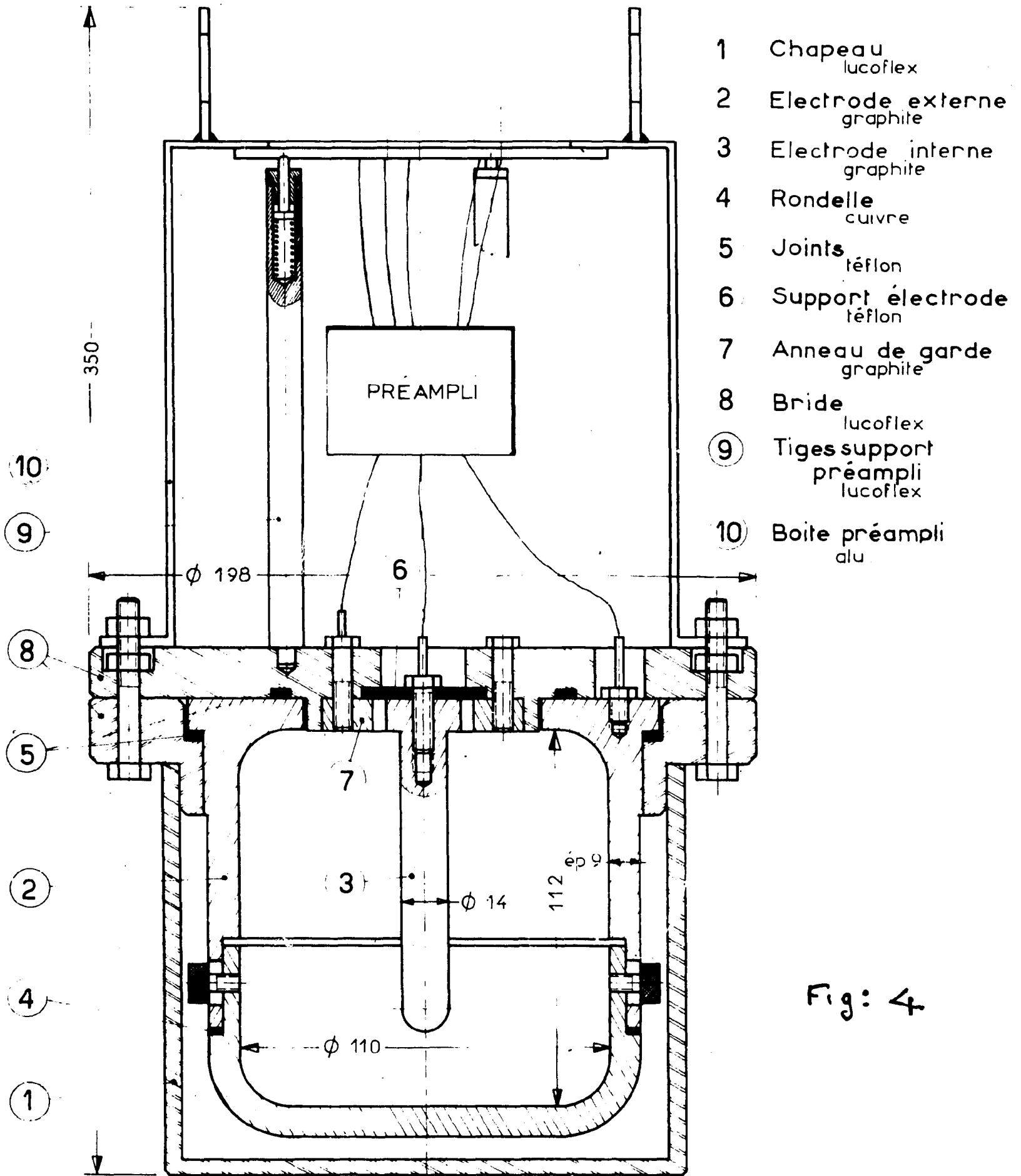
ions de la chaîne linéaire de pilotage (unités arbitraires)

bilans thermiques 1,3%









- 1 Chapeau  
lucoflex
- 2 Electrode externe  
graphite
- 3 Electrode interne  
graphite
- 4 Rondelle  
cuivre
- 5 Joints  
téflon
- 6 Support électrode  
téflon
- 7 Anneau de garde  
graphite
- 8 Bride  
lucoflex
- 9 Tiges support  
préampli  
lucoflex
- 10 Boite préampli  
alu

Fig: 4

CHAMBRE PAROI DE GRAPHITE . V = 900 cm<sup>3</sup>



**FIN**