

**COMPTE RENDU ET RÉSULTATS DES MESURES
EFFECTUÉES DANS AQUILON II
POUR LA JUNTA DE ENERGIA NUCLEAR
JUIN 1963**

par

Pierre LOURME, René JACQUEMART et Guy LEDANOIS

Rapport CEA - R 2615

CEA-R 2615 - LOURME Pierre, JACQUEMART René, LEDANOIS Guy,
MAYQUEZ Edouardo Rodriguez, de FRANCISCO José Luis,
RAFAEL Martin, PAVRET de la ROCHEFORDIERE Alain

COMPTE RENDU ET RESULTATS DES MESURES EFFECTUEES DANS
AQUILON II POUR LA JUNTA DE ENERGIA NUCLEAR

Sommaire. - Des mesures de Laplaciens ont été effectuées pour la Junta de Energia Nuclear dans la pile à eau lourde AQUILON sur des éléments combustibles à carbure d'uranium comportant, dans certains cas, une chemise remplie d'un liquide organique pour simuler un réfrigérant.

Chaque élément combustible est une grappe composée de 19 barres de carbure d'uranium, de diamètre 13 mm, gainées d'aluminium.

La technique expérimentale utilisée a été la méthode de substitution, les mesures étant effectuées par approche cinétique par neutrons pulsés.

Les résultats sont comparés à des calculs de réseaux analogues aux calculs de grappes d'oxyde d'uranium sauf pour le facteur ρ .

1964

18 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

CEA-R 2615 - LOURME Pierre, JACQUEMART René, LEDANOIS Guy,
MAYQUEZ Edouardo Rodriguez, de FRANCISCO José Luis,
RAFAEL Martin, PAVRET de la ROCHEFORDIERE Alain

A REPORT WITH THE RESULTS OF MEASUREMENTS CARRIED OUT
IN AQUILON II FOR THE JUNTA DE ENERGIA NUCLEAR

Summary. - Buckling measurements have been performed in support of the "Junta de Energia Nuclear" program in the heavy water moderated critical facility AQUILON concerning lattices of uranium carbide fuel assemblies. In part of the experiments, these fuel assemblies were sheathed by housing tubes filled with organic to simulate a coolant.

Each fuel assembly is a cluster of nineteen aluminium clad, 13 mm in diameter U C rods.

Experiments were made using substitution method i e. critical approach and pulsed neutron technics.

Results are compared to lattice calculation analogous to oxyde cluster calculation except about ρ factor.

1964

18 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

Les rapports du COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE 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-8^e.

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-8^e.

Département des Etudes de Piles

Service des Expériences Critiques

COMPTE RENDU ET RESULTATS DES MESURES EFFECTUEES
DANS AQUILON II POUR LA JUNTA DE ENERGIA NUCLEAR

JUIN 1963

par

Pierre LOURME, René JACQUEMART, Guy LEDANOIS

(Rapport S.E.C. N° 144 de février 1964)

Ce travail a été réalisé avec le concours de Messieurs Edouardo Rodriguez MAYQUEZ, José Luis de FRANCISCO, Rafael MARTIN de la Junta de Energia Nuclear, et de Monsieur Alain PAVRET de la ROCHEFORDIERE du Service des Expériences Critiques.

COMPTE RENDU ET RESULTATS DES MESURES EFFECTUEES

DANS AQUILON II POUR LA JUNTA DE ENERGIA NUCLEAR

JUIN 1963

I. - INTRODUCTION

Le C.E.A. a effectué pour le compte de la Junta de Energia Nuclear des mesures de Laplacien sur des éléments combustibles à carbure d'uranium comportant ou non une chemise remplie d'un liquide organique pour simuler un réfrigérant. Les mesures ont eu lieu dans le réacteur à eau lourde Aquilon, courant Juin 1963. Les expériences ont été essentiellement des substitutions utilisant la technique habituelle de l'approche cinétique et également la technique des neutrons pulsés.

Avant d'indiquer et de discuter les résultats, nous décrivons la constitution des éléments combustibles utilisés, les techniques expérimentales et les mesures effectuées.

II.- CONSTITUTION DES ELEMENTS COMBUSTIBLES

1.- ELEMENTS A CARBURE (fig. 1)

L'élément est une grappe de 19 barres de carbure d'uranium disposées en couronnes concentriques de 1,6 et 12 barres, l'espacement étant obtenu à l'aide d'entretoises à ailettes hélicoïdales insérées entre les barres.

Les caractéristiques des barres sont les suivantes :

CARBURE : diamètre du carbure : 13 mm
longueur utile : 1.510 mm
densité moyenne : 13,4 g/cm³

GAINAGE : aluminium 38 115
diamètres : int. : 13,3 mm - ext.: 14,4 mm
ailettes hélicoïdales de largeur 1,2 mm
diamètre hors tout de la gaine : 16,8 mm

Les barres et entretoises sont suspendues à une tête d'élément qui permet le raccordement aux suspentes Aquilon.

Dans le cas des mesures sans liquide organique, les grappes sont maintenues en bas et à mi-hauteur par des rubans d'aluminium.

Dans le cas des mesures avec liquide organique, la chemise est fixée à la tête d'élément par un système de bagues d'étanchéité, les orifices de remplissage percés dans la tête pouvant également être obturés par des bouchons étanches.

CHEMISE POUR LIQUIDE ORGANIQUE:

Matière : Aluminium 38.115
Diamètres : int : 82 mm, ext. : 83,6 mm.

LIQUIDE ORGANIQUE:

Nature : Gilotherm D.O. (Progil)
Composition : 75 % oxyde de biphényl
25% biphényl

2.- ELEMENTS DU RESEAU DE REFERENCE (fig. 2)

Aux pas utilisés pour ces mesures, le nombre d'éléments est de 112. Chaque élément comprend 7 barres d' UO_2 de diamètre 22mm, de longueur active 2.300 mm, gainées d'aluminium (diamètre 23 x 25 mm). La distance gaine à gaine en disposition hexagonale est de 7mm. La densité moyenne de l' UO_2 est de $10,19 \text{ g/cm}^3$. Le niveau inférieur de l'oxyde d'uranium se trouve à 75 mm du fond de la cuve tant pour les éléments de la référence que pour les éléments AKB.

III.- TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III.1.- METHODE DU REMPLACEMENT PROGRESSIF

a) PRINCIPE

On remplace une partie du réseau de référence, de laplacien connu, par des éléments à tester. On mesure la différence apparente de laplacien axial qui en résulte sous forme de variation de taille critique et on en déduit la valeur du laplacien des éléments testés par différence avec le réseau de référence.

On fait en général plusieurs mesures avec un nombre croissant d'éléments remplacés afin de pouvoir ajuster les paramètres intervenant dans la relation qui lie les différences de laplaciens.

b) TECHNIQUE

Le réacteur est chargé à 112 éléments de référence disposés suivant un réseau de pas carré (fig. 3). On rend le réacteur légèrement surcritique par montée du modérateur; et pour différents niveaux d'eau lourde, on mesure le temps de doublement de la puissance, traduit ensuite en termes de réactivité par la relation cinétique. On extrapole à une réactivité nulle et on obtient d'une part la taille critique du réseau, d'autre part l'équivalent en réactivité du millimètre de modérateur.

Le remplacement consiste à procéder de même avec un chargement comprenant 4 éléments à tester à la place des 4 éléments de référence centraux, puis 12, 16, 24 éléments. On mesure la température pour chaque série de mesures.

c) CAS DES MESURES SUR LES GRAPPES A CARBURE

Les grappes ont été mesurées successivement sans et avec liquide organique, par remplacement jusqu'à 24, aux pas carrés de 19, 21 et 24 cm.

Les incertitudes proviennent de la mesure du niveau de modérateur ($\pm 0,1$ mm) et de celle du temps de doublement (0,8 % environ). L'incertitude résultante sur les différences de niveaux critiques est inférieure à 0,5 mm. Mais une incertitude beaucoup plus importante s'ajoute quand le niveau critique est au-dessus des éléments carbure.

III.2.- METHODE DES NEUTRONS PULSES

III.2.1.- RAPPEL SIMPLIFIE DE LA METHODE

Si un milieu multiplicateur sous-critique est excité à intervalles réguliers par des bouffées de neutrons brèves et intenses (dans le cas d'Aquilon, pulses de 10^7 n, largeur $2 \mu s$, fréquence 0,5 ou $1 S^{-1}$), on observe en première approximation une montée rapide du flux suivie d'une décroissance exponentielle due à la réponse des neutrons prompts, puis d'un palier dû à la réponse des neutrons retardés.

Abstraction faite des harmoniques, la constante de l'exponentielle est :

$$\alpha = \frac{\beta \text{ eff}}{\theta} k \left(1 - \frac{\rho}{\beta \text{ eff}} \right)$$

θ temps de vie

k pouvoir multiplicateur < 1 , $\rho = \frac{k - 1}{k}$

$\beta \text{ eff}$ fraction effective de neutrons retardés.

En admettant θ et $\beta \text{ eff}$ indépendants de k , l'exploitation usuelle de la mesure est la suivante:

Diverses mesures pour les valeurs faibles et connues en valeur relative de ρ sont faites. On en déduit par extrapolation à $\rho = 0$ $\alpha_0 = \frac{\beta_{eff}}{\theta}$. Toute mesure de α donne alors la valeur correspondante de $\frac{\rho}{\beta_{eff}}$

Mais d'autre part, avec les mêmes hypothèses, on a :

$$\frac{\rho}{\beta_{eff}} = \frac{A}{B}$$

A nombre de neutrons prompts

B nombre de neutrons retardés.

Une seule mesure déterminant $\frac{\rho}{\beta_{eff}}$ et α permet d'obtenir $\alpha_0 = \frac{\beta_{eff}}{\theta}$

Supposons maintenant que l'on cherche la valeur de X_0 qui rende critique un assemblage sous-critique pour diverses valeurs X_i pour lesquelles sont mesurés $\frac{\rho_i}{\beta_{eff}}$ et α_i :

On peut ajuster une relation $\alpha = f(X)$ on obtient une valeur moyenne de α_0 .

$$\bar{\alpha}_0 = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{\beta_{eff}}{\theta} \right)_i$$

on détermine ainsi X_0 tel que $\bar{\alpha}_0 = f(X_0)$

III.2.2.- APPLICATION

Dans le cas qui nous intéresse, le paramètre critique est la hauteur H . Un raisonnement simple montre qu'il est préférable d'ajuster une relation hyperbolique entre α et H_{ei}^2 * hauteur extrapolée.

La méthode a été vérifiée sur le réseau de référence où la taille critique a été obtenue pour $H_e = 1.710$ mm au pas 210.

* Une valeur approchée pour $\Delta H = H_e - H$ a été utilisée, ce qui est sans importance pour l'évaluation des différences

Les résultats suivants ont été obtenus :

$(He)^2 \text{ m}^2$	1,889	2,024	2,306	2,457	2,711
α	68,1	57,3	38,8	30,0	15,7
$\frac{\rho}{\beta_{eff}}$	7,4	5,7	3,6	2,3	0,7
$\left(\frac{\beta_{eff}}{\theta}\right)_i$	8,5	8,9	8,7	9,2	8,8

$$\bar{\alpha}_0 = 8,8$$

$$He = 1.707 \text{ mm}$$

On voit que même si l'on avait disposé des seules mesures loin de la criticalité ($3,6 < \frac{\rho}{\beta_{eff}} < 7,4$), le résultat n'aurait pratiquement pas changé.

Pour les réseaux carbure avec liquide organique, les résultats suivants ont été obtenus :

Chargement	Plage de $\frac{\rho}{\beta_{eff}}$	$\bar{\alpha}_0$	He mm
Pas 210 12 UC	5,48 à 0,6	9	1.801
Pas 210 24 UC	6,7 à 0,83	9	1.877
Pas 240 24 UC	6,2 à 1,8	7,7	1.975

IV.- RESULTATS ET CALCULS

IV.1.- RESEAUX DE REFERENCE

On a utilisé un des réseaux de référence classique d'Aquilon constitué par les grappes d'oxyde $7 \text{ } \phi \text{ } 22$ plongées directement dans l'eau lourde. Compte tenu de la correction de titre d'eau lourde, les paramètres de ce réseau sont les suivants :

Titre d'eau lourde : 99,45 % *

	Pas 19 cm	21 cm	24 cm
Nombres de barres	112	112	112
Hauteur critique (uranium immergé)cm	147,1	139,7	145,8
Hauteur extrapolée cm	183,4	173,1	179,5
Rayon extrapolé cm	154,3	163,5	170,8
L^2 cm ²	111,8	142,1	195,2
L_s^2 cm ²	129,0	126,7	124,4
B^2 m ⁻²	5,36	5,46	5,05

Les coefficients de réflecteur utilisés pour le dépouillement des expériences de remplacement sont donnés dans le tableau ci-après, le premier chiffre correspondant à la hauteur critique, le second à $\delta H = 10$ cm.

	Pas 19 cm	21 cm	23 cm
e	0,075 / 0,076	0,045 / 0,046	0,022 / 0,0225
e'	0,046 / 0,040	0,051 / 0,044	0,045 / 0,039
e''	0,031 / 0,029	0,0325/00,030	0,028 / 0,026

* Valeurs du titre isotopique communiquées par le SIS de Saclay en % D20

21 mai : 99,497 \pm 0,005 17 juin : 99,442 \pm 0,005 3 juillet : 99,455 \pm 0,005

IV.2. - PREMIERE SERIE DE MESURES

Les éléments espagnols ont été débarrassés des tubes d'aluminium et du liquide organique et plongés directement dans l'eau lourde.

La détermination des différences de laplaciens avec les grappes d'oxyde 7 Ø 22 est, pour cette série de mesures, particulièrement précise car les niveaux critiques ont toujours été très voisins de ceux des réseaux de référence. Voici d'ailleurs l'évolution des niveaux critiques au cours des substitutions :

	Pas 19 cm	21 cm	24 cm
4 barres substituées	$\delta H = - 0,42 \text{ cm}$	- 0,63 cm	- 1,12 cm
12 " "	- 0,83	- 2,03	- 3,17
16 " "	- 1,09	- 2,50	- 3,96
24 " "	- 1,36	- 3,55	- 5,49

On obtient les différences de laplaciens :

Pas 19 cm	Pas 19 cm	$\Delta B2 = + 0,08 \text{ m}^{-2}$
	21 cm	$\Delta B2 = + 0,38 \text{ m}^{-2}$
	24 cm	$\Delta B2 = + 0,44 \text{ m}^{-2}$

Après évaluation par le calcul des corrections pour tenir compte du titre d'eau lourde on peut donner les laplaciens des réseaux testés ramenés au titre 99.80 %.

Pas 19 cm	$B2 = 5,49 \text{ m}^{-2}$	(5,36 + 0,08 + 0,05)
21 cm	$B2 = 6,01 \text{ m}^{-2}$	(5,46 + 0,38 + 0,17)
24 cm	$B2 = 5,85 \text{ m}^{-2}$	(5,05 + 0,44 + 0,36)

L'erreur commise sur la différence des laplaciens peut être considérée comme négligeable, Compte tenu de l'erreur sur la correction de titre d'eau lourde qu'on peut évaluer à $0,03 \text{ m}^{-2}$ et de l'incertitude sur les laplaciens du réseau de référence, les présents résultats sont connus à $0,10 \text{ m}^{-2}$ près.

IV.3. - ELEMENTS DU CALCUL DE RESEAUX

Pour les grappes de carbure d'uranium plongées dans l'eau lourde, le calcul de réseau se conduit comme pour les grappes d'oxyde, sauf pour la détermination du facteur p sur laquelle nous reviendrons plus loin.

Dans les conditions standards (20° C et titre d'eau lourde 0,9980) nous avons obtenu :

	Pas 19 cm	21 cm	24 cm
D1	1,154	1,163	1,171
$\Sigma 1$	0,009194	0,009587	0,009766
D2	0,819	0,822	0,8245
$\Sigma 2$	0,008604	0,006733	0,004870
f	0,9769	0,9746	0,9705
ϵ	1,0242	1,0242	1,0242
ηp	1,1226	1,1542	1,1846
k^∞	1,1233	1,1514	1,1776
B2	5,43	6,03	5,89

REMARQUES :

Pour l'évaluation des captures parasites dans l'aluminium constituant le gainage et les structures des éléments espagnols, nous avons calculé une section efficace de capture à partir de l'analyse chimique qui nous a été communiquée par la Junta de Energia Nuclear.

A 20° C la section de capture macroscopique de l'aluminium est prise égale à 0,01285.

Pour le calcul du facteur antitrappe, nous avons procédé comme suit :

La formule ajustée pour les réseaux d'oxyde d'uranium donne la valeur du produit ηp pour une grappe fictive de même géométrie que la grappe de carbure qui nous intéresse et dont le combustible serait de l'oxyde de même densité que ce carbure (13,4). Le rapport $\frac{S}{M}$ est donc conservé $\frac{S}{M} = 0,126$.

En calculant η au moyen des sections effectives (modèle graphite) pour le spectre qui règne dans le réseau réel, on obtient une valeur de l'intégrale effective pour la grappe fictive.

Par ailleurs le programme mis au point par MOUGEY et SOLANILLA (rapport SPM n° 705) permet de comparer pour la même valeur $\frac{S}{M} = 0,126$ les intégrales effectives théoriques d'une grappe d'oxyde et d'une grappe de carbure.

$$\text{Pour le carbure} \quad I_{\text{eff}} = 4,33 + 24,9 \sqrt{\frac{S}{M}}$$

$$\text{Pour l'oxyde} \quad I_{\text{eff}} = 4,15 + 26,6 \sqrt{\frac{S}{M}}$$

En admettant que le rapport des intégrales effectives est celui des valeurs théoriques, on corrige le facteur antitrappe de la grappe fictive pour passer à celui du réseau réel.

IV.4.- DEUXIEME SERIE DE MESURES

Les éléments espagnols comportent cette fois le premier tube d'aluminium et le liquide organique (Gilotherm : mélange de diphényl et d'oxyde de diphényl).

Il est important de souligner que la plupart des niveaux critiques au cours des substitutions sont supérieurs au niveau maximum des éléments espagnols *. Les variations de hauteur critique ne peuvent donc être interprétées directement pour en tirer un laplacien. Il est nécessaire de tenir compte du réflecteur supérieur qui intervient dans la zone substituée. De plus, les constantes de ce réflecteur ne peuvent être connues avec une grande précision à cause des bouchons de volume important, de géométrie et de composition (cuivre, acier, aluminium) complexes, qui surmontent les éléments espagnols. (fig. 4).

On ne peut donc attendre une grande précision de ces mesures par remplacement. Toutefois, des informations complémentaires très utiles sont apportées aux pas 21 et 24 cm par des mesures par neutrons pulsés, en pile mixte, qui sont décrites par ailleurs. Elles permettent en principe de connaître le niveau critique d'une pile où l'uranium des éléments espagnols serait

* Cette difficulté s'était déjà présentée mais de façon beaucoup moins gênante lors des mesures Siemens dans Aquilon en 1961.

prolongé pour éviter la présence du réflecteur supérieur . On peut traiter les différences de niveau critique ainsi obtenues par la méthode classique de dépouillement des mesures de substitution, en sachant qu'elles ne sont pas connues à 0,5 mm mais à 5 mm près.

La confrontation des deux types de mesures s'est révélée satisfaisante ce qui nous permet de donner les valeurs des laplaciens qui vont suivre :

PAS 21 cm

Au pas 21 cm la situation est relativement favorable. L'évolution du niveau critique au cours du remplacement a été :

Référence		140,13 cm	(hauteur d'uranium)
4 barres substituées		143,08	
12 barres	"	149,00	
16 barres	"	152,24	
24 barres	"	158,84	

Les éléments carbure-liquide organique sont noyés à partir de 16 barres mais pour ce point le réflecteur supérieur n'a que 2,24 cm d'épaisseur ce qui permet une correction relativement précise. Le calcul donne une variation de hauteur extrapolée équivalente de 1,30 cm. Le coefficient e^{-1} du réseau substitué est petit : - 0,052. Le dépouillement du remplacement avec les trois premiers points donne alors :

$$\Delta B2 = - 1,70 \text{ m}^{-2}$$

D'autre part, pour 12 barres substituées, la mesure par neutrons pulsés donne une différence de niveau critique de 8,9 cm contre 9,4 expérimental et pour 24 barres 17,0 cm, soit, compte tenu de e^{-1} , une différence de hauteur extrapolée de 17,5 cm alors que le calcul de réflecteur donne 16,7 cm pour une différence de niveau de 18,7 cm.

L'accord peut être considéré comme satisfaisant, d'autant plus que si on utilise les δH fictifs obtenus par neutrons pulsés dans un calcul de remplacement, on obtient :

$$\Delta B2 = - 1,68 \text{ m}^{-2}$$

Au pas 21 cm pour le titre d'eau lourde 99,45 % $B2 = 3,78. \text{ m}^{-2}$

PAS 24 cm

L'évolution des niveaux critiques a été :

Référence	146,05 cm
4 barres	149,65
12 barres	157,13
16 barres	160,87
24 barres	169,41

On dispose en outre d'une mesure par neutrons pulsés pour 24 barres substituées qui donne après recalage $\delta H = 19,9$ cm.

Dépouillement avec les 4 points après calcul de réflecteur : $\Delta B2 = - 1,44 \text{ m}^{-2}$

Dépouillement avec $\left\{ \begin{array}{l} 4 \text{ barres } \delta H = 3,6 \text{ cm} \\ 24 \text{ barres } \delta H = 19,9 \text{ cm} \end{array} \right.$ $\Delta B2 = - 1,39 \text{ m}^{-2}$

Nous avons admis $\Delta B2 = -1.42$ soit $B2 = 3.63 \text{ m}^{-2}$

PAS 19 cm

L'évolution des niveaux critiques a été :

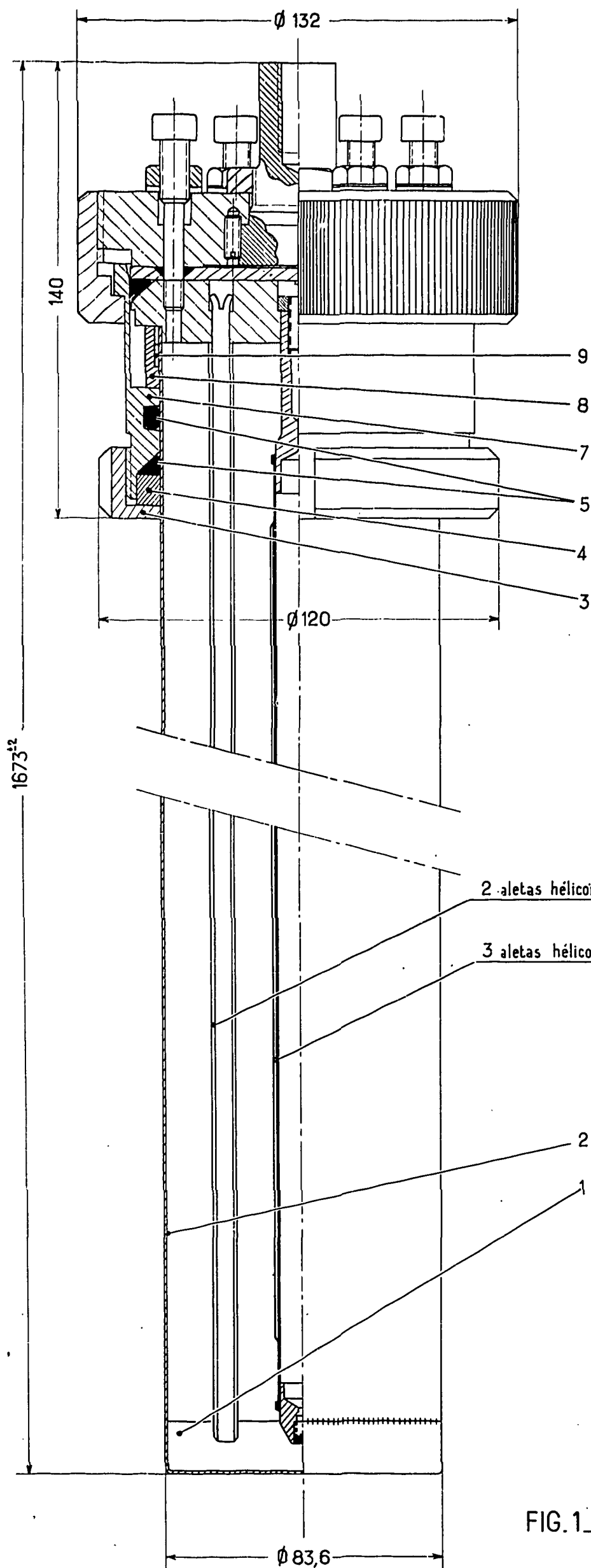
Référence	146,99 cm
4 barres	150,17
12 barres	156,99
16 barres	160,71
24 barres	168,41

On ne peut que faire confiance au calcul de réflecteur car il n'y a pas eu de mesure par neutrons pulsés.

On obtient : $\delta B2 = -1.72 \text{ m}^{-2}$ soit : $B2 = 3.64 \text{ m}^{-2}$

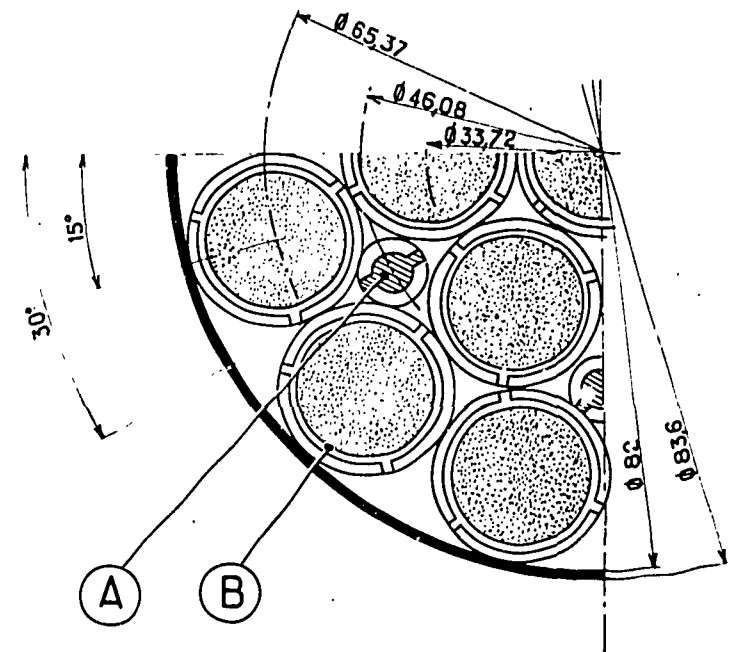
T A B L E D E S M A T I E R E S

	page
I - INTRODUCTION	1
II - CONSTITUTION DES ELEMENTS COMBUSTIBLES	2
III - TECHNIQUES EXPERIMENTALES	3
III.1.- Méthode du remplacement progressif	3
III.2.- Méthode des neutrons pulsés	4
IV - RESULTATS ET CALCULS	7
IV.1.- Réseaux de référence	7
IV.2.- Première série de mesures	8
IV.3.- Eléments du calcul de réseaux	9
IV.4.- Deuxième série de mesures	10



2 aletas helicoidales de 110 mm de paso

3 aletas helicoidales de 750 mm de paso



¼ DE COUPE

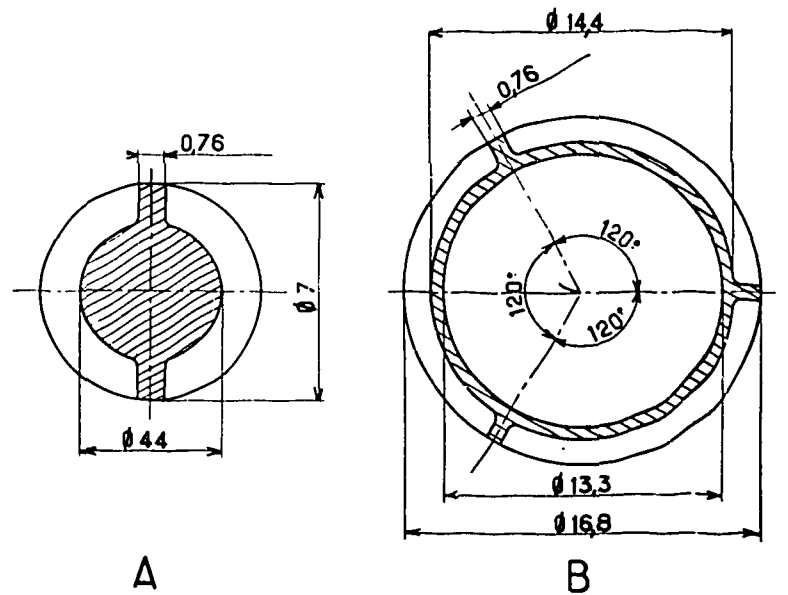


FIG.1_ ELEMENT A CARBURE D URANIUM
AVEC TUBE POUR ORGANIQUE

Grappe 70F"7

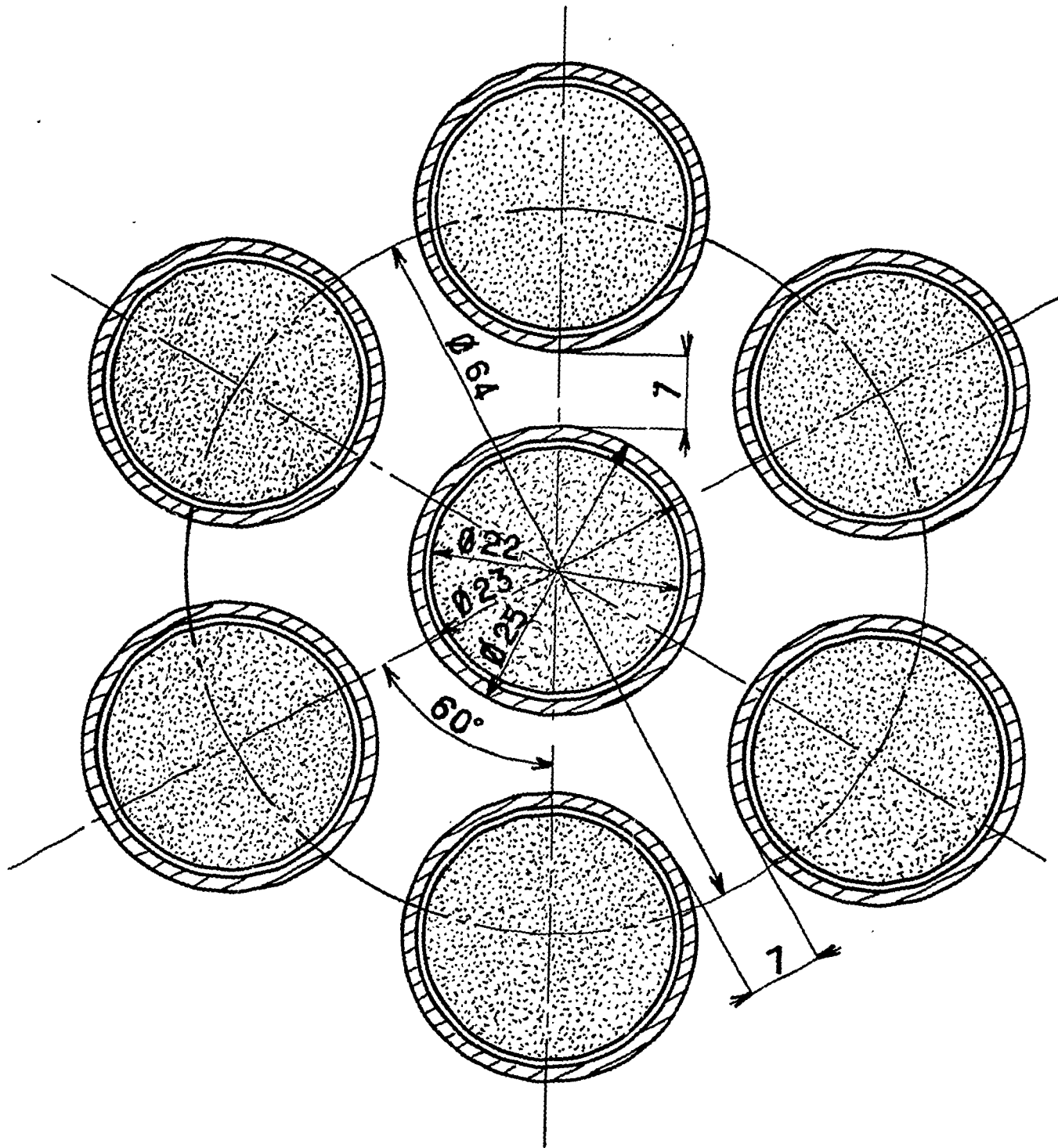
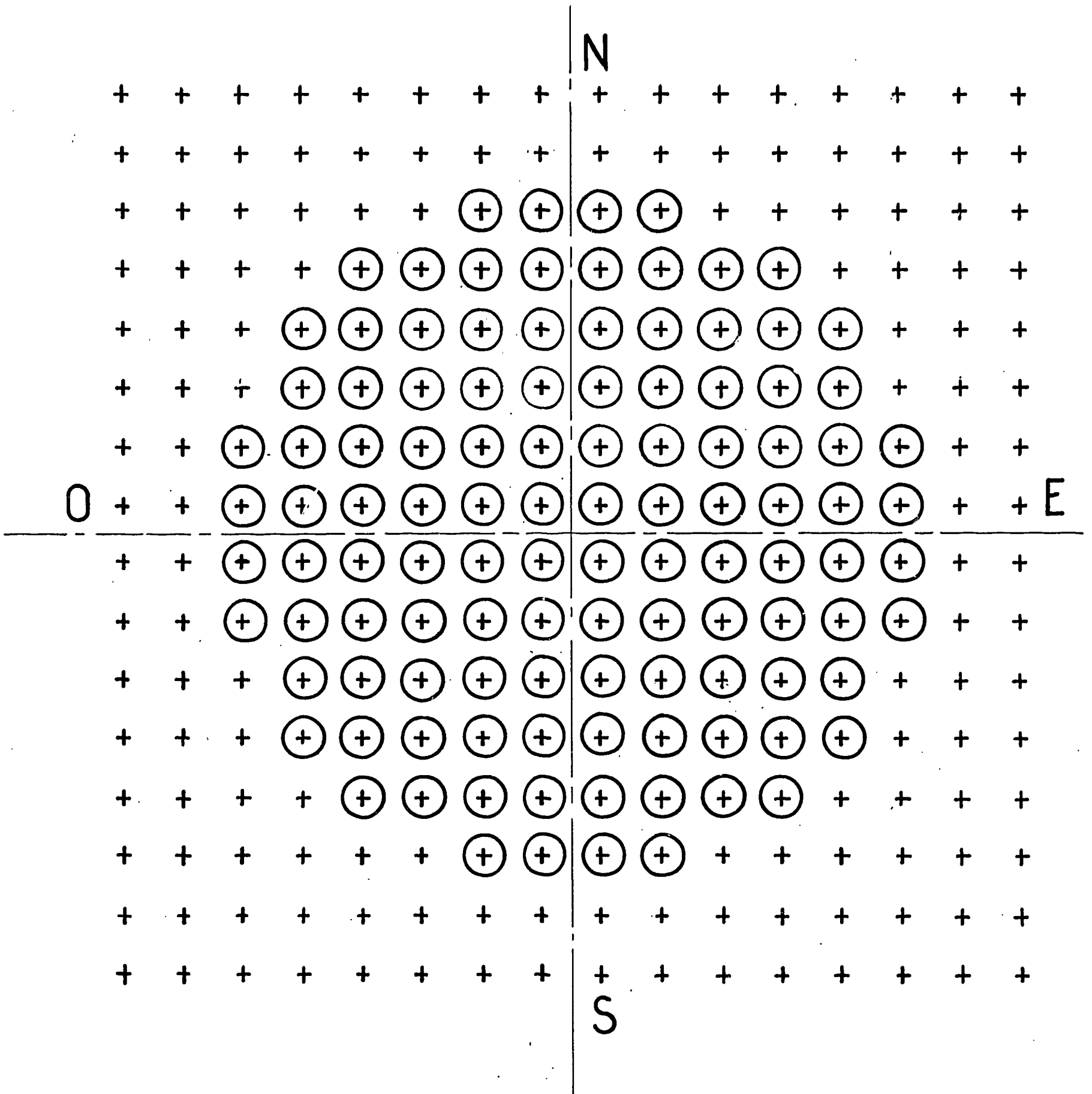


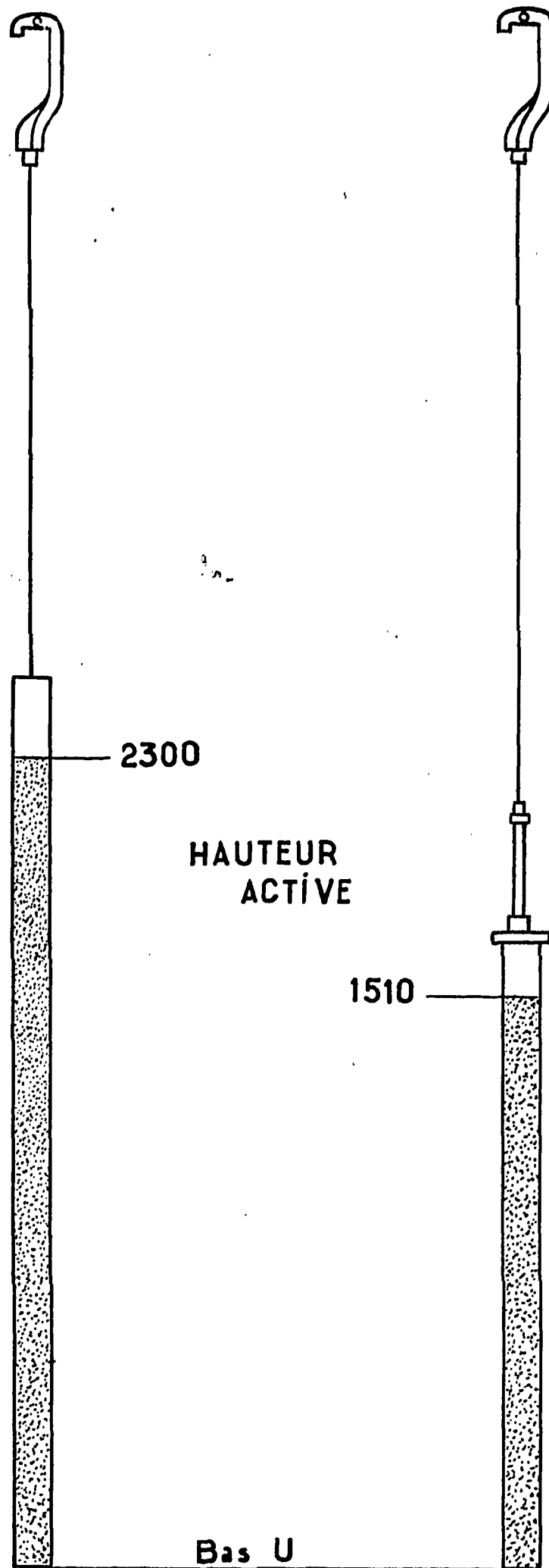
fig.2

Chargement à 112 barres



fig_3

Hauteur active comparée des éléments de référence et des éléments au carbure



fig_4

FIN