

EUR 3791 f

COMMUNAUTE EUROPEENNE DE L'ENERGIE ATOMIQUE - EURATOM

**TRANSFERT DE CHALEUR A L'INTERIEUR
DE COMBUSTIBLES NUCLEAIRES CONSTITUES DE
POUDRES COMPACTEES D'UO₂ ET D'UO₂ - PuO₂**

par

**H. ANDRIESSEN
(BelgoNucléaire)**

1968



Accord de Coopération EURATOM / U.S.A.

Rapport EURAEC N° 1998 établi par la BelgoNucléaire, Bruxelles - Belgique

Contrat EURATOM / BelgoNucléaire / C.E.N. N° 001-64-1 TRUB

AVERTISSEMENT

Le présent document a été élaboré sous les auspices de la Commission des Communautés Européennes en application du programme commun défini par l'Accord de coopération, signé le 8 novembre 1958, entre le gouvernement des Etats-Unis d'Amérique et la Communauté Européenne de l'Energie Atomique.

Il est précisé que la Commission des Communautés Européennes, le gouvernement des Etats-Unis, la United States Atomic Energy Commission, leurs contractants, ou toutes personnes agissant en leur nom :

Ne garantissent pas explicitement ou implicitement l'exactitude, le caractère complet ou l'utilité des informations contenues dans le présent document, ni que l'utilisation d'une information, d'un équipement, d'une méthode ou d'un procédé quelconques divulgués dans le présent document ne porte pas atteinte à des droits privatifs.

N'assument aucune responsabilité quant à l'utilisation d'informations, d'équipements, de méthodes ou de procédés quelconques décrits dans le présent document, ni quant aux dommages résultant de ladite utilisation.

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

au prix de FF 7,—

FB 70,—

DM 5,60

Lit. 870,—

Fl. 5.10

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

Imprimé par Smeets
Bruxelles, juin 1968

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

EUR 3791 f

COMMUNAUTE EUROPEENNE DE L'ENERGIE ATOMIQUE - EURATOM

**TRANSFERT DE CHALEUR A L'INTERIEUR
DE COMBUSTIBLES NUCLEAIRES CONSTITUES DE
POUDRES COMPACTEES D'UO₂ ET D'UO₂ - PuO₂**

par

**H. ANDRIESSEN
(BelgoNucléaire)**

1968



Accord de Coopération EURATOM / U.S.A.

Rapport EURAEC N° 1998 établi par la BelgoNucléaire, Bruxelles - Belgique

Contrat EURATOM / BelgoNucléaire / C.E.N. N° 001-64-1 TRUB

RESUME

La courbe $\int k dT$ de combustibles constitués de poudres compactées d' UO_2 et d' UO_2-PuO_2 a été mesurée hors pile en fonction de la température.

L'influence des gaz de remplissage hélium, argon et azote sur la valeur $\int k dT$ a été mesurée et la théorie de Deissler et Eian a été utilisée afin d'évaluer les attributions de la conductivité thermique du matériau céramique et du gaz aux valeurs totales mesurées de la conductivité thermique.

Les influences de la densité et de la présence du PuO_2 sur la valeur $\int k dT$ ont été évaluées.

Les valeurs mesurées $\int_0^T k dT$ sont :

$$\left| \int_0^T k dT \right|_{88 \pm 1 \% DT} = 63 \pm 7 \text{ W/cm}$$

$$\left| \int_0^T k dT \right|_{84 \pm 1 \% DT} = 70 \pm 8 \text{ W/cm}$$

MOTS-CLES

URANIUM DIOXIDE
PLUTONIUM OXIDES
POWDERS
VIBRATIONS
COMPACTING
THERMAL CONDUCTIVITY
HELIUM

ARGON
NITROGEN
DENSITY
DIAGRAMS
PRESSURE
INERT GASES

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

Liste des tableaux.

Liste des figures.

1. INTRODUCTION.	7
2. EVALUATION THEORIQUE.	8
2.1. Principe de mesure de la conductivité thermique.	8
2.2. Influence du gaz de remplissage sur la conductivité thermique totale mesurée.	9
3. EVALUATION PRATIQUE.	12
3.1. Appareillage.	12
3.2. Préparation et caractéristiques des échantillons.	13
3.3. Conditions expérimentales.	13
3.4. Résultats et interprétations.	14
4. CONCLUSIONS.	16
5. REMERCIEMENTS.	19
ANNEXE I.	21
ANNEXE II.	25
REFERENCES.	27

★

★

★

LISTE DES TABLEAUX.

- Tableau I - Conductivité thermique en fonction de la température de l'hélium, de l'argon et de l'azote à 1 kg/cm².
- Tableau II - Conditions de préparation et caractéristiques des éléments d'UO₂ vibrés destinés à la simulation thermique.
- Tableau III - Conditions de préparation et caractéristiques des éléments vibrés d'UO₂-PuO₂ mixtes destinés à la simulation thermique.
- Tableau IV - Emplacement des thermocouples à l'intérieur des échantillons lors des essais de simulation thermique.
- Tableau V - $\int_0^T k dT$ mesurée dans atmosphère d'hélium et d'argon (1 atm), à 84 ± 1 et 88 ± 1 % DT (W/cm).
- Tableau VI - Valeurs des puissances calorifiques générées lors des irradiations en convoyeur hydraulique HR-1.
- Tableau VII - Détermination du facteur géométrique.

★

★ ★

LISTE DES FIGURES.

- Figure 1 - Calcul théorique de la conductivité thermique d'un mélange gaz-poudre (composé de sphères identiques).
- Figure 2 - Calcul théorique de la conductivité thermique d'un mélange gaz-poudre (composé de cylindres réguliers identiques).
- Figure 3 - k_s/k_g en fonction de k/k_g .
- Figure 4 - Fraction de volume occupée par le gaz en fonction de k/k_g .
- Figure 5 - Appareillage de simulation thermique.
- Figure 6 - Courbe de correction de voltage.
- Figure 7 - $\int kdT$ d' (U - Pu)O₂ vibré.
- Figure 8 - $\int kdT$ d'UO₂ vibré (84 ± 1 % DT) sous différentes pressions d'argon et sous différentes pressions d'azote.
- Figure 9 - $\int kdT$ d'UO₂ vibré (84 ± 1 % DT) sous différentes pressions d'hélium.
- Figure 10 - Conductivité thermique en fonction de la température de poudres tassées d'UO₂ sous différents gaz de remplissage.
- Figure 11 - $\int kdT$ d'UO₂ vibre (84 et 88 ± 1 % DT) sous atmosphères d'hélium et d'argon, comparé avec les résultats théoriques calculés à partir des données de Godfrey et de Stora.
- Figure 12 - Macrographies et autoradiographies de barreaux combustibles irradiés en convoyeur hydraulique à puissance constante.

★

★ ★

1. INTRODUCTION.

Afin de définir les conditions optima d'utilisation de l'oxyde d'uranium et des oxydes mixtes d'uranium et de plutonium dans les réacteurs de puissance, il est indispensable de connaître la puissance linéique maximum permise, qui limite l'utilisation thermique de ces matériaux combustibles. La puissance linéique est déterminée surtout par la conductivité thermique moyenne du matériau propre, mais également par la conductivité thermique du gaz de remplissage, conductivité qui est fonction du type et de la pression du gaz. Cette conductivité thermique influence le transfert de chaleur dans le matériau combustible et celui à l'interface combustible-gainage.

La conductivité thermique du matériau combustible est également influencée par divers paramètres, dont les plus importants sont :

- la présence éventuelle de PuO_2 ,
- la densité tassée du matériau combustible,
- les changements structuraux causés par des effets thermiques,
- la stoechiométrie du rapport O/M.

Ce rapport décrit les expériences réalisées hors pile dans le cadre du programme de recherches C.E.N.-BelgoNucléaire-Euratom sur l'utilisation du plutonium dans les réacteurs de puissance refroidis à l'eau légère. Les essais portent sur des éléments combustibles fabriqués par vibration de poudres denses d' UO_2 et d' $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ (sous forme de mélange physique) et ont servi à vérifier l'influence des paramètres susmentionnés sur la conductivité thermique, ainsi que l'influence du gaz de remplissage sur la conductivité thermique de l'espace radiale matériau combustible-gainage.

2. EVALUATION THEORIQUE.

2.1. Principe de mesure de la conductivité thermique.

Le but des mesures a été la détermination de l'intégrale de conductivité thermique du matériau céramique qui est reliée à la puissance linéique d'un barreau combustible par la formule :

$$\int_{T_s}^{T_c} k dT = \frac{q'}{4 \pi} f_n$$

- k : conductivité thermique du matériau combustible en fonction de la température (W/cm°C),
 T : température (°C),
 T_c : température centrale du combustible (°C),
 T_s : température de surface du combustible (°C),
 q' : puissance linéique (W/cm),
 f_n : facteur de dépression du flux neutronique.

A partir des essais de simulation thermique cette intégrale peut être calculée à l'aide de la formule :

$$\int_{T_2, T_3}^{T_1} k dT = \bar{k}, k_{\text{eff}}(T_1 - T_2, T_3)$$

$$= \frac{q \ln \frac{r_2 r_3}{r_1}}{2 \pi L}$$

- q : flux de chaleur au moment de la stabilisation des températures (W),
 T₁ : température du matériau combustible contre l'électrode chauffante (°C),
 T₂ : température à la surface extérieure du matériau céramique (°C),

T_3 : température à la surface extérieure du tube de gainage ($^{\circ}\text{C}$),

\bar{k} : conductivité thermique moyenne du matériau céramique ($\text{W}/\text{cm}^{\circ}\text{C}$),

k_{eff} : conductivité thermique effective de l'élément combustible ($\text{W}/\text{cm}^{\circ}\text{C}$),

r_1, r_2, r_3 : rayons auxquels sont mesurés les températures T_1, T_2, T_3 (cm),

L : longueur du filament chauffant (cm).

La variation de la conductivité thermique en fonction de la température peut être trouvée par dérivation de la courbe $\int k dT$ en fonction de la température obtenue. Etant donné l'erreur de mesure de cette courbe, une telle dérivation ne peut conduire qu'à l'obtention d'une courbe de la conductivité thermique en fonction de la température qui n'est qu'une approximation grossière de la vraie courbe.

2.2. Influence du gaz de remplissage sur la conductivité thermique totale mesurée.

La conductivité thermique dans un élément vibré ne dépend pas uniquement de la conductivité thermique du matériau combustible, mais également de la conductivité thermique du gaz de remplissage, qui est déterminée par le type et la pression du gaz.

Une théorie développée par R.G. Deissler et C.S. Eian (1) permet l'évaluation théorique de l'influence du gaz de remplissage sur la conductivité thermique de barreaux combustibles constitués de poudres densifiées par vibration à basses températures.

Cette théorie stipule que la conductivité thermique peut être déterminée à partir de :

1. la conductivité thermique du solide (k_s),
2. la conductivité thermique du gaz (k_g),
3. la fraction en volume occupée par le gaz (a).

En supposant que la poudre est présente dans certaines formes régulières et en arrangements réguliers la courbe k/k_g (k : conductivité thermique totale) en fonction de k_g/k_s peut être déterminée.

a) Conductivité thermique d'une poudre composée de sphères identiques arrangées cubiquement.

Le flux de chaleur à travers l'échantillon est égal à la conductivité thermique moyenne, si nous utilisons un gradient thermique et des dimensions unitaires. Selon la loi de Fourier le flux de chaleur à travers un élément infinitésimal d'épaisseur dx est égal à :

$$dq = \frac{2 \pi x dx k_s}{4 \sin \theta} (1 - t) \quad (\text{fig. 1})$$

$t = \text{temps}$

ou
$$dq = \frac{2 \pi x dx k_g t}{4 (1 - \sin \theta)}$$

Donc
$$\frac{k_s (1 - t)}{\sin \theta} = \frac{k_g t}{1 - \sin \theta}$$

et
$$t = \frac{1}{1 + \frac{k_g}{k_s} \left(\frac{\sin \theta}{1 - \sin \theta} \right)}$$

En éliminant t et en remplaçant

$$\cos \theta = x$$

et
$$- \sin \theta d\theta = dx$$

$$dq = - \frac{\pi}{2} k_g \frac{\sin \theta \cos \theta d\theta}{1 - \sin \theta + \frac{k_g}{k_s} \sin \theta}$$

ou
$$q = \frac{\pi}{2} k_g \int_0^{\pi/2} \frac{\sin \theta \cos \theta}{1 + \left(\frac{k_g}{k_s} - 1 \right) \sin \theta} d\theta + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) k_g$$

II

q : flux de chaleur à travers la surface a b c d ;

q peut être remplacé par k :

$$\frac{k}{k_g} = \frac{1}{2} \frac{\pi}{\left(\frac{k_g}{k_s} - 1\right)^2} \left[\left(\frac{k_g}{k_s} - 1\right) - \ln \frac{k_g}{k_s} \right] + \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)$$

Dans le cas présent la fraction de volume occupée par le gaz, soit

$$a = 0,475.$$

b) Conductivité thermique d'une poudre composée de cylindres réguliers (d = h) arrangés cubiquement.

Le flux de chaleur à travers un élément infinitésimal est :

$$dq = \frac{k_s dx}{\sin \theta} (1 - t) \quad (\text{fig. 2})$$

ou

$$dq = \frac{k_g dx}{1 - \sin \theta} t$$

En procédant de la même manière que ci-dessus, nous obtenons :

$$\frac{k}{k_g} = \frac{\pi}{2 \left(\frac{k_g}{k_s} - 1\right)} - \frac{\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{k_g}{k_s} - 1\right)}{\left(\frac{k_g}{k_s} - 1\right) \sqrt{2 \frac{k_g}{k_s} - \left(\frac{k_g}{k_s}\right)^2}}$$

Dans le cas présent, a = 0,214.

Les valeurs de $\frac{k}{k_g}$ en fonction de $\frac{k_s}{k_g}$ sont maintenant connues pour quatre conditions :

$$1) a = 0,475$$

$$2) a = 0,214$$

$$3) a = 0 : \frac{k}{k_g} = \frac{k_s}{k_g}$$

$$4) a = 1 : \frac{k}{k_g} = 1$$

Ces valeurs sont introduites dans les figures 3 et 4 et donnent donc $\frac{k}{k_g}$ en fonction $\frac{k_s}{k_g}$ pour une poudre de forme indéterminée pour chaque pourcentage de la densité théorique.

Tout en connaissant la conductivité thermique du gaz de remplissage dans les conditions expérimentales utilisées, il est possible (par mesure de la conductivité thermique du matériau combustible) de calculer la valeur de la conductivité thermique totale pour la région de température où le transfert de chaleur se fait surtout par conduction.

Les valeurs de conductivité thermique des gaz à une atmosphère, utilisées pour ce calcul, sont reprises au tableau I.

A partir des résultats de mesure de T.G. Godfrey (2) et J.P. Stora (3) une courbe a été établie à l'aide de la théorie susmentionnée, pour une poudre tassée d' UO_2 à 88 % DT sous une atmosphère d'hélium. Cette courbe est reprise à la figure 11.

3. EVALUATION PRATIQUE.

3.1. Appareillage.

L'appareillage utilisé est décrit aux références (4) et (5) et donné à la figure 5.

3.2. Préparation et caractéristiques des échantillons.

Les échantillons sont préparés par vibration de poudres denses de différentes granulométries.

Quand le PuO_2 est présent, il est incorporé dans la fraction la plus fine de la poudre.

Les caractéristiques des échantillons sont reprises aux tableaux II et III.

3.3. Conditions expérimentales.

3.3.1. Mesure de la pression du gaz de remplissage.

La pression du gaz de remplissage est mesurée à l'aide d'un manomètre monté sur le four de chauffage, indiquant la pression entre 20 et 760 mm Hg avec une précision de ± 20 mm Hg. La pression est maintenue constante par un grand volume d'équilibrage.

Pour effectuer les essais sous gaz inerte le four et l'échantillon sont dégazés pendant quelques heures et ensuite trois purges avec le gaz inerte sont exécutées.

Les essais sous vide sont exécutés après un préchauffage jusqu'à 500°C afin de dégazer complètement le four et l'élément.

Tous les essais ont été réalisés sous des pressions inférieures à la pression atmosphérique.

3.3.2. Mesure des températures.

Les températures du matériau combustible ont été relevées à l'aide de thermocouples étalonnés W/W-26 % Re de 0,5 mm de diamètre, et disposés radialement dans l'échantillon. Les têtes de mesure avaient un diamètre compris entre 0,9 et 1,1 mm. Les températures à la surface externe du matériau combustible et du gainage ont été mesurées à l'aide de thermocouples Pt/Pt-10 % Rh.

L'emplacement des thermocouples dans les différents échantillons lors des essais a été repris au tableau IV.

La perte de chaleur par les fils du thermocouple provoque une erreur de mesure de $\pm 2 \%$; la mesure potentiométrique de la température introduit une erreur supplémentaire qui est plus petite que $\pm 0,5 \%$.

L'emplacement des thermocouples dans le matériau céramique peut être déterminé avec une précision de $\pm 0,3 \text{ mm}$, à la surface du gainage ; cette précision est $\pm 0,1 \text{ mm}$.

La mesure des températures par thermocouples a été contrôlée à l'aide d'un pyromètre optique et par examen du point de fusion de fils métalliques incorporés dans les éléments. Ces mesures ont confirmé les résultats de mesure par thermocouples.

3.3.3. Mesure de puissance.

La puissance qui s'écoule au moment de la stabilisation des températures est mesurée à partir des valeurs du voltage et de l'ampérage.

La puissance dissipée dans le filament chauffant peut être considérée comme s'écoulant radialement à travers le matériau céramique étant donné la bonne isolation thermique aux extrémités et la longueur de l'échantillon.

Afin de corriger les mesures de voltage s'effectuant aux bornes de filament chauffant, celles-ci sont comparées avec des mesures de voltage effectuées par prise directe sur le fil de tungstène (fig. 6). Les valeurs V et I sont mesurées avec une erreur totale de $\pm 2 \%$ et les fuites de chaleur par les fils des thermocouples causent une erreur supplémentaire de $\pm 1 \%$. Le filament chauffant a une longueur de $160 \pm 1 \text{ mm}$.

3.4. Résultats et interprétations.

Les résultats de mesure des températures et de la puissance et les conditions expérimentales des différents essais sont rassemblés aux figures 7, 8 et 9.

3.4.1. L'influence de la densité des éléments vibrés sur la courbe $\int k_d T$.

Dans le domaine de température où le transfert de chaleur se fait par conduction une corrélation existe entre la conductivité thermique et la densité du matériau céramique :

$$k_m = (1 - nP) k_t$$

- k_m : conductivité thermique mesurée du matériau céramique,
 k_t : conductivité thermique théorique du matériau céramique,
 P : fraction de porosité,
 n : constante variant entre 2 et 3, augmentant lorsque la densité diminue.

R.J. Allio propose (16) :

n	P
1,05	0,00 - 0,10
2,00	0,10 - 0,15
2,40	0,15 - 0,20
2,60	0,20 - 0,25

Cette formule est comparable avec celle de A.M. Ross (6).

3.4.2. Influence de la présence de PuO_2 .

Comme montré par les mesures et comme indiqué à la figure 7, la valeur de la conductivité thermique de l' UO_2 n'est pas influencée par la présence de PuO_2 entre 1 et 10 % en poids, si le matériau combustible consiste en un mélange physique d' UO_2 - PuO_2 dans la fraction fine et d' UO_2 fondu dans les fractions grosse et moyenne, qui sont donc de la même nature pour tous les éléments.

Par conséquent les combustibles UO_2 - PuO_2 à moins de 10 % de PuO_2 peuvent être considérés comme des combustibles d' UO_2 pur pour l'interprétation des phénomènes thermiques hors pile et en pile.

3.4.3. Influence du gaz de remplissage.

Des figures 8 et 9, il découle que le gaz de remplissage influence fortement les valeurs mesurées de la conductivité thermique. Les essais ont été effectués sous atmosphère d'hélium, d'argon et d'azote à plusieurs pressions du gaz pour le même échantillon, un cyclage thermique correspondant à une pression déterminée.

Les cyclages thermiques sont faits à des températures suffisamment basses pour ne pas influencer les conditions structurales des éléments. Afin de vérifier ceci, un cyclage thermique sous vide a été effectué au début et à la fin de chaque expérience.

Le gaz de remplissage a une influence sur la valeur de la conductivité thermique, surtout aux basses températures. L'effet dans la zone des températures élevées est moins prépondérant, ceci est dû au transfert de chaleur par radiation plus important.

Une comparaison de différents résultats de mesure sur des éléments vibrés ou rétreints sous différents gaz de remplissage de C.S. Eian (7), J.L. Daniel (8), NUKEM (9), FIAT (10), M.F. Lyons (11) et les résultats obtenus par le groupe mixte C.E.N.-BelgoNucléaire (4,12) est donnée à la figure 10.

Lors des essais aucun changement de la teneur en oxygène du matériau céramique n'a été constaté.

3.4.4. Calcul de k à partir d'une valeur de k_s connue.

Les valeurs de k_s mesurées sur la matériau pastillé peuvent être utilisées pour le calcul de k, après l'application de la correction pour la densité des grains utilisés pour la vibro-compaction sur k_s .

4. CONCLUSIONS.

De l'examen des résultats de mesure, il ressort que plus la densité est basse plus la correction de la valeur $\int kdT$ devient disproportionnée avec la fraction de porosité.

Dans la limite des erreurs de mesure la présence du PuO_2 jusqu'à 10 % en poids n'influence pas la valeur de la conductivité thermique de l' UO_2 .

Etant donné qu'aucun changement de la teneur en oxygène n'a été constaté lors de nos essais et que l'uranium métallique n'a pas été détecté par métallographie, il semble que l'augmentation de la valeur de la conductivité thermique de l' UO_2 à des températures élevées pendant les essais de simulation thermique ne peut être imputée à une contribution électronique à la conductivité thermique par la présence d'uranium métallique ou une phase hypostoéchiométrique d' UO_2 .

L'augmentation de la conductivité thermique peut être attribuée partiellement à :

- 1) l'effet de chauffage interne de l' UO_2 par passage de courant électrique dans l' UO_2 dont la résistance thermique a diminuée à haute température (13). Cet effet est considéré dans l'annexe III.
- 2) L'augmentation du transfert de chaleur par radiation dans l' UO_2 et les changements structuraux (formation de la structure basaltique).

L'influence du gradient thermique à hautes températures, qui est plus élevé lors des essais de simulation thermique que lors des essais en pile, sur la valeur de la conductivité thermique est négligeable (18), vu l'influence importante de la radiation sur la conductivité thermique totale.

A basses températures, où le gradient thermique hors pile est plus petit qu'en pile, l'influence de ce gradient est également négligeable dans le cas de combustibles vibrés et ce, du fait que le transfert de chaleur se fait surtout par conduction et convection des gaz de remplissage.

Il est possible que pendant l'irradiation une augmentation de la conductivité thermique a lieu à températures élevées par une contribution électronique à la conductivité thermique d'une phase hypostoéchiométrique d' UO_2 formée par transfert d'oxygène aux produits de fission (14,15).

Les essais ont permis d'évaluer les valeurs de la résistance thermique de contact pour des éléments vibrés sous gaz de remplissage différents et pour des températures de gainage en acier inox comprises entre 100 et 150°C :

vide 10^{-4} mm Hg	$\Delta T = 3 \pm 1^\circ C/W/cm^2$	$(0,4 \pm 0,1 W/cm^2/^\circ C)$
argon, azote	$\Delta T = 1,5 \pm 0,6^\circ C/W/cm^2$	$(0,8 \pm 0,3 W/cm^2/^\circ C)$
hélium	$\Delta T = 0,6 \pm 0,2^\circ C/W/cm^2$	$(1,8 \pm 0,6 W/cm^2/^\circ C)$

La pression du contact était celle provoquée par la dilatation thermique du matériau combustible chauffé à des températures centrales entre 1800 et 2300°C et des températures de surface entre 250 et 500°C.

Les essais indiquent que la conductivité thermique totale d'un élément vibré est plus grande quand la conductivité thermique du gaz de remplissage est plus élevée. Aussi, plus la pression du gaz est élevée (entre 200 et 700 mm Hg) plus la conductivité thermique s'améliore.

Dans la figure 11, les données sont rassemblées concernant les mesures sous hélium et sous argon à 1 atm. Les courbes $\int_0^T kdT$ sont établies pour des densités de $84 \pm 1 \%$ et $88 \pm 1 \%$ DT et comparées avec la courbe pour 88% DT sous 1 atm d'hélium, calculée à partir des résultats de Godfrey (2) et Stora (6) qui correspond avec nos résultats (5).

Les valeurs $\int_0^T kdT$ en fonction de la température centrale pour les différentes conditions sont groupées au tableau V. De l'examen de cette figure, il ressort que l'hélium a surtout une influence favorable sur la valeur de la conductivité thermique totale à basses températures. Dans la zone des températures élevées, l'influence de l'hélium est beaucoup plus petite par le fait qu'à des températures élevées le transfert de chaleur se fait surtout par radiation.

L'effet de l'hélium comme gaz de remplissage sur la conductivité thermique des éléments vibrés est vraisemblablement annihilé, pendant l'irradiation en réacteurs thermiques à des taux de combustion élevés, par la formation des gaz de fission xénon et krypton qui ont une conductivité thermique plus basse que celle de l'hélium. En réacteurs rapides, l'hélium est formé par fission ternaire (rendement de fission $0,3 \%$). A des taux de combustion élevés, l'hélium exercera ainsi son influence sur la conductivité thermique totale.

Les valeurs de la courbe $\int kdT$ en fonction de la température sous atmosphère d'hélium comparées avec celle sous argon indiquent que la température centrale jusqu'à 2000°C est diminuée de 150°C au maximum quand l'hélium est utilisé au lieu d'argon pour une irradiation dans des conditions équivalentes.

Les valeurs $\left(\int_0^{T_f} kdT \right)_{84 \pm 1 \% \text{ DT}}$ et $\left(\int_0^{T_f} kdT \right)_{88 \pm 1 \% \text{ DT}}$ trouvées sont respectivement $63 \pm 7 \text{ W/cm}$ et $70 \pm 8 \text{ W/cm}$ pour des poudres vibrées.

5. REMERCIEMENTS.

L'auteur remercie la Commission de l'Euratom pour lui avoir permis de réaliser cette étude.

Une mention spéciale s'adresse à Monsieur P. Kruys, Chef de Projet à Euratom et à Monsieur E. Vanden Benden, Directeur-Adjoint à la Société Belgo-Nucléaire, pour leurs précieux encouragements.

L'auteur remercie également Messieurs J.M. Leblanc et H. Bairiot pour les discussions fructueuses qu'ils ont eues avec lui.

★

★

★

A N N E X E I.

Calcul de $\int_{T_s}^{T_c} k dT^*$ à partir des essais en pile.

Différents essais d'irradiation ont été effectués en convoyeur hydraulique, dont le principe a été décrit dans la référence (17).

Certaines campagnes d'irradiation en convoyeur hydraulique comprenaient un barreau homogène, contenant le PuO_2 dans les trois fractions granulométriques obtenues par fusion d'un mélange physique UO_2 - PuO_2 .

L'irradiation des barreaux homogènes a permis d'obtenir une évaluation

précise de $\int_{T_s}^{T_c} k dT$ à partir de l'évaluation de la puissance linéique par mesure

du taux de combustion et à partir de la mesure des rayons limites des changements structuraux observés sur les coupes métallographiques, dont les températures limites de transition sont connues. La puissance linéique moyenne au droit de chaque coupe métallographique est déterminée à partir des mesures de flux neutroniques non perturbés, connues à $\pm 5\%$, ayant les déterminations radiochimiques du taux de combustion comme points de repère. Pour les différents échantillons des quatre campagnes d'irradiation dans le convoyeur hydraulique (1 HR-1, 2 HR-1, 3 HR-1, 4 HR-1), les puissances calorifiques générées ont été calculées par une méthode décrite dans la référence (17). Les résultats du calcul ont été résumés au tableau VI. Les valeurs obtenues sont entachées d'une erreur de $\pm 6\%$.

* T température ($^{\circ}C$),
 T_c température centrale du matériau combustible ($^{\circ}C$),
 T_s température de surface du matériau combustible ($^{\circ}C$),
k conductivité thermique du matériau combustible en fonction de la température ($W/cm^{\circ}C$).

Intégrales de conductivité.

Sur la base des changements structuraux observés sur la céramographie de la coupe 9 du tableau VI, montrée à la figure 12 en même temps que l'autoradiographie de cette coupe, et provenant d'un barreau homogène, il est possible

de déduire la valeur de $\int_{T_s}^{T_c} k dT$:

Changement structural	Température (°C)	Rayon du changement structural (mm)
Formation de la structure basaltique	2000 ± 200	5,6 ± 0,2
Fusion d' UO_2 -4 w/o PuO_2	2800 ± 25	4,2 ± 0,2

Le rayon du matériau combustible $r_s = 7,5 \pm 0,1$ mm et la température de surface $T_s = 550 \pm 50^\circ C$ calculée à partir des données suivantes :

- température de surface du barreau $T_o = 160^\circ C$,
- conductibilité thermique de l'acier inoxydable 304 L AISI utilisé pour le gainage $k_{ss} = 0,16$ W/cm°C,
- coefficient de transfert de chaleur entre le gainage et le matériau combustible $h = 1$ W/cm²°C,
- épaisseur de paroi du gainage $e = 0,5$ mm :

$$T_s = T_o + \frac{e q'}{\pi k_{ss} (2 r_s + e)} + \frac{q'}{2 \pi h r_s}$$

$$\int_{T_s}^T k dT = \frac{q' f_n (r_s^2 - r^2)}{4 \pi r_s^2}$$

où f_n : facteur dû à la dépression du flux neutronique, dépendant du diamètre de l'élément combustible et de l'enrichissement en plutonium :

pour $r_s = 7,5$ mm et $UO_2 - 4$ w/o PuO_2 : $f_n = 0,80$.

A partir des données pour la coupe 9 :

$$\left[\int_{0^{\circ}C}^{2800^{\circ}C} kdT \right]_{85 \% DT (Ar + He)} = 79 \pm 8 \text{ W/cm}$$

En appliquant cette valeur de $\int_{T_s}^T kdT$ sur des échantillons hétérogènes

($UO_2 - 4$ w/o PuO_2 avec le PuO_2 uniquement dans la fraction fine), il paraît que

les valeurs de $\int_{T_s}^T kdT$ que l'on peut calculer à partir des données de température (tableau VII) ne correspondent pas avec les valeurs $\int_{T_s}^T kdT$ obtenues pour

le barreau homogène. Ceci est dû au fait que la distribution du plutonium dans les barreaux hétérogènes est telle que le plutonium est localisé préférentiellement à la périphérie du barreau. Afin de corriger la valeur $\int_{T_s}^T kdT$ pour ce phénomène un facteur "géométrique" est introduit dans la formule :

$$\int_{T_s}^T kdT = \frac{q' f_n f_g (r_s^2 - r^2)}{4 \pi r_s^2}$$

Dans le tableau VII, ce facteur géométrique a été calculé à l'aide de la

valeur $\int_0^T kdT = 79 \pm 8 \text{ W/cm}$.

Il y a finalement moyen de conclure que les valeurs de $\int_0^T k dT$ trouvées hors pile et en pile sont essentiellement égales pour autant que les densités soient comparables.

★

★ ★

A N N E X E II.

Evaluation des courants vagabonds dans l' UO_2 polycristallin lors
d'un essai de simulation thermique.

Afin d'évaluer l'importance de la puissance développée par les courants vagabonds (effet de Joule) par rapport à la puissance nécessaire pour maintenir l' UO_2 à la température considérée, les conductivités électriques du filament en tungstène d'une part et l' UO_2 polycristallin d'autre part sont comparées, étant donné que les puissances développées sont proportionnelles avec E^2/R .

Les valeurs de la conductivité électrique de l' UO_2 polycristallin utilisées ont été prélevées à la référence (19).

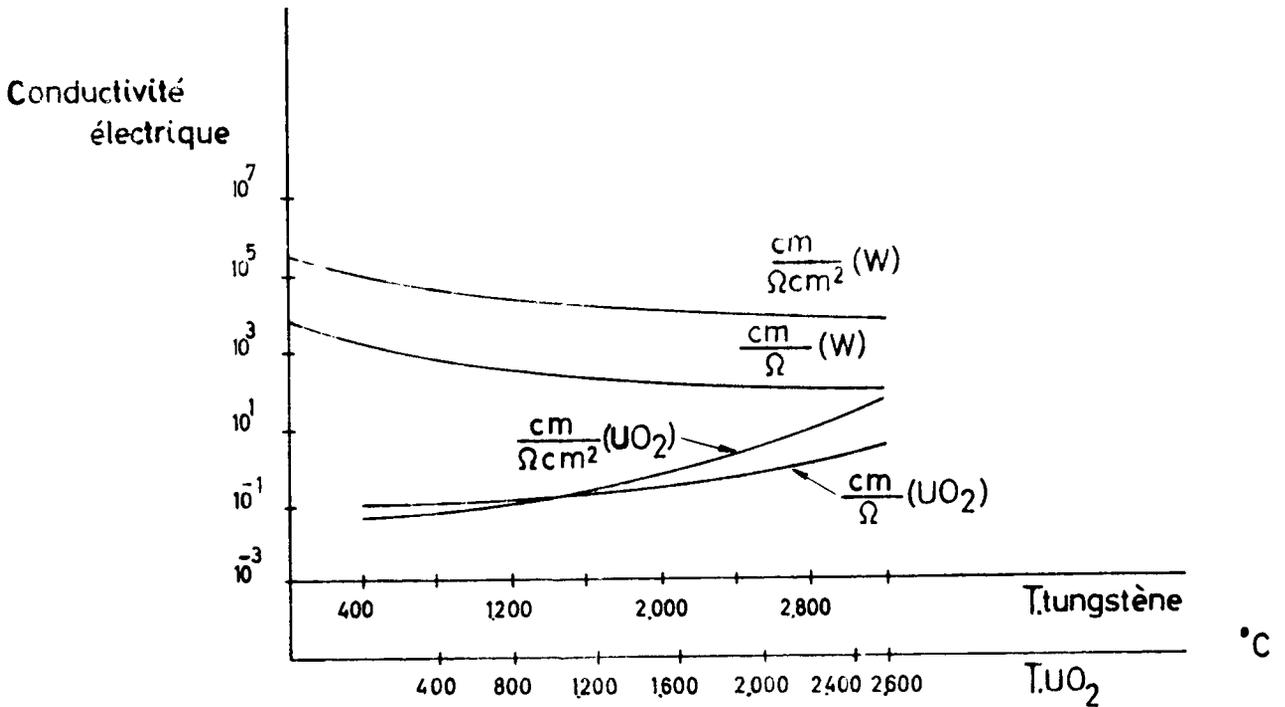
Pour le calcul, les hypothèses suivantes sont adoptées :

La section de l' UO_2 prise en considération sur toute la longueur de l'élément est celle correspondante avec une différence de température de 400°C à partir du bord de l' UO_2 contre le filament. Etant donné la chute de température entre le filament et l' UO_2 (ΔT), la température moyenne de l' UO_2 prise pour cette section est :

$$T_{\text{UO}_2} = T_{\text{tungstène}} - \Delta T - 200^\circ\text{C},$$

et est celle rapportée dans la figure ci-dessous.

Il ressort des courbes que jusqu'à une température de l' UO_2 de 2600°C dans la section considérée (c'est-à-dire une température de 2800°C de l' UO_2 contre le filament) la résistance ohmique de l' UO_2 est encore au moins cent fois plus grande que celle du tungstène et que la puissance développée dans l' UO_2 ne peut pas atteindre plus d'un pourcent de la puissance totale.



Il est évident qu'au-delà du point de fusion de l' UO_2 , la puissance dégagée dans l' UO_2 est plus élevée par une augmentation accélérée de la conductivité électrique de l' UO_2 et une forte diminution de la résistance de contact.

La résistance de contact $\text{UO}_2\text{-W}$ n'a pas été prise en considération jusqu'à ce moment, mais d'après des essais effectués par le Groupe Mixte Plutonium C.E.N.-BelgoNucléaire, cette résistance calculée pour la surface totale du filament serait de l'ordre de 100 Ω à la température ambiante. Cette résistance doit être additionnée à celle de l' UO_2 dans les raisonnements développés ci-dessus, et par conséquent, ce facteur pourrait devenir prédominant.

★

★

★

R E F E R E N C E S.

- (1) R.J. Deissler, C.S. Eian.
Investigation of Effective Thermal Conductivity of Powders.
NACA - RM - E - 52 C 05.
Lewis Flight Propulsion Laboratory (1952).
- (2) T.G. Godfrey et al.
Thermal Conductivity of Uranium Dioxide and Armco Iron by an Improved Radial Heat Flow Technique.
ORNL - 3556.
Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn. (1964).
- (3) J.P. Stora et al.
Conductibilité thermique de l'oxyde d'uranium fritté dans les conditions d'utilisation en pile.
C.E.A.-R-2586.
Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay (1964) août.
- (4) J.M. Leblanc.
Etude sur le transfert de chaleur à l'intérieur de barreaux combustibles à oxyde d'uranium et oxydes mixtes d'uranium et de plutonium.
BN - 6504 - 26.
BelgoNucléaire (1965) avril.
- (5) H. Andriessen, J.M. Leblanc.
Comportement thermique d'éléments combustibles à oxyde d'uranium densifiés suivant différentes techniques.
New Nuclear Materials including Non Metallic Fuels, Prague.
Vol. II 303-307 (1963) Juillet.
- (6) A.M. Ross.
The Dependence of the Thermal Conductivity of Uranium Dioxide on Density, Microstructure, Stoichiometry and Thermal Neutron Irradiation.
AECL - 1096.
Atomic Energy of Canada Ltd, Chalk River, Ont. (1960) Sept.
- (7) C.S. Eian, R.J. Deissler.
Effective Thermal Conductivities of Magnesium Oxide, Stainless Steel and Uranium Oxide Powders in Various Gases.
NACA - RM - E - 53 G 03.
Lewis Flight Propulsion Laboratory (1953) Oct.
- (8) J.L. Daniel et al.
Thermal Conductivity of UO_2 .
HW - 69945.
Hanford Atomic Products Operation, Richland, Wash. (1962) Sept.
- (9) Fabrication of Swaged Fuel Elements.
Seventh Quartely Report NUKEM covering period January to March 1962.
EURAECE - 323.

- (10) Swaging of Uranium Dioxide.
First Annual Report May 1960 to June 1961.
FIAT, Sezione Energia Nucleare (SENN).
FN - E - 10.
- (11) M.F. Lyons et al.
UO₂ Thermal Conductivity during Irradiation.
Panel Meeting Vienna (1965) April.
- (12) J.M. Leblanc.
Irradiation dans le réacteur de puissance BR-3 de barreaux combustibles
céramiques enrichis au plutonium.
Genève 1964 A/conf. 28/P/443 (1964) Septembre.
- (13) J.B. Ainscough.
The Effect of Electrical Conduction in UO₂ on its High-Temperature.
Thermal Conductivity as determined by Radial Flow Techniques.
TRG - Report 1051 (S).
The Reactor Group, Risley, Warrington, Lancs. (1965) Oct.
- (14) J.E. May et al.
Observations on the Thermal Conductivity of Uranium Dioxide.
AECL-1641.
Atomic Energy of Canada Ltd. Chalk River, Ont. (1962) Nov.
- (15) J.L. Bates.
Metallic Uranium in Irradiated UO₂.
HW - 76301.
Hanford Atomic Products Operation, Richland, Wash. (1964).
- (16) R.J. Allio.
Euratom Ceramic Meeting, Brussels, 28 February to 2 March 1966.
- (17) A. Ihost et al.
Comportement thermique de combustibles céramiques UO₂ - PuO₂ sous irra-
diations à hautes puissances spécifiques.
BN - 6712 - 08.
Commission de l'Euratom - C.E.N. - BelgoNucléaire, Bruxelles (1967) Déc.
- (18) E. Patrassi.
Thermal Conductivity of UO₂.
Ceramic Fuel Meeting, 28 February to 2 March 1966.
- (19) J.L. Bates et al.
Electrical Conductivity of UO₂.
BNWL 296 PT 1.
Battelle Memorial Institute/ Pacific Northwest Laboratory (1966) Aug.
- (20) International Critical Tables of Nuclear Data, Physics, Chemistry and
Technology.
McGraw-Hill (1933).

★

★

★

T A B L E A U I.

Conductivité thermique en fonction de la température de l'hélium,
de l'argon et de l'azote à 1 kg/cm^2 (20).

Température °C	Conductivité thermique (W/cm°C)		
	Hélium	Argon	Azote
20	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-4}$	$2,54 \cdot 10^{-4}$
200	$2,08 \cdot 10^{-3}$	$2,44 \cdot 10^{-4}$	$3,55 \cdot 10^{-4}$
400	$2,60 \cdot 10^{-3}$	$3,08 \cdot 10^{-4}$	$4,50 \cdot 10^{-4}$
600	$3,10 \cdot 10^{-3}$	$3,55 \cdot 10^{-4}$	$5,33 \cdot 10^{-4}$
800	$3,56 \cdot 10^{-3}$	$4,24 \cdot 10^{-4}$	$6,18 \cdot 10^{-4}$
1000	$3,97 \cdot 10^{-3}$	$4,77 \cdot 10^{-4}$	$6,89 \cdot 10^{-4}$
1200	$4,35 \cdot 10^{-3}$	$5,23 \cdot 10^{-4}$	$7,50 \cdot 10^{-4}$
1400	$4,75 \cdot 10^{-3}$	$5,65 \cdot 10^{-4}$	$8,15 \cdot 10^{-4}$
1600	$5,1 \cdot 10^{-3}$	-	-
1800	$5,4 \cdot 10^{-3}$	-	-
2000	$5,8 \cdot 10^{-3}$	-	-

T A B L E A U II.

Conditions de préparation et caractéristiques des éléments d' UO_2
vibrés destinés à la simulation thermique.

Préparation et caractéristiques	Echantillon								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Densité moyenne de UO_2 tassée (% DT)	86,1	85,1	86,3	84,3	83,0	82,4	84,4	82,7	83,8
Titre en oxygène		2,04 ± 0,01				2,010 ± 0,005			
Granulométrie UO_2									
- 4 + 5 mesh				60	60	63,5	63,5	63,5	63,5
- 6 + 7	63,5	63,5	63,5						
30 - 25 + 30				10					
- 50 + 70	15	15	15						
- 60 + 70					10	15	15	15	15
- 80 + 100				15					
- 400	21,5	21,5	21,5	15	30	21,5	21,5	21,5	21,5
Grosseur moyenne des grains élémentaires	10 μ								
Densité des grains de UO_2	97 % DT								
Diamètre intérieur du gainage	20,2 ± 0,1 mm								
Diamètre extérieur du gainage	19,2 ± 0,1 mm								
Nature du gainage	Acier inoxydable								
Nature de la résistance	Tungstène								
Diamètre de la résistance	2,0 mm								

T A B L E A U III.

Conditions de préparation et caractéristiques des éléments vibrés
d' UO_2 - PuO_2 mixtes destinés à la simulation thermique.

Préparation et caractéristiques	Echantillon			
	10	11	12	13
Densité moyenne des oxydes tassées (% DT)	87,8	83,1	85,0	85,1
Granulométrie (%)				
- 4 + 5 mesh	63,5	63,5	63,5	63,5
- 50 + 70	15	15	15	15
- 400	21,5	21,5	21,5	21,5
(% PuO_2)	23	46,5	21,5	43
Pourcentage PuO_2	5,0	10,0	4,6	9,2
Longueur totale (mm)	118	124	122,5	123
Nature de la résistance	Tantale		Tungstène	
Diamètre de la résistance (mm)	1,85		2,0	
Titre en oxygène			2,02 ± 0,01	
Grosseur moyenne des grains élémentaires			10 μ	
Densité des grains d' UO_2 fondus			97 % DT	
Diamètre intérieur du gainage			20,2 ± 0,1 mm	
Diamètre extérieur du gainage			19,2 ± 0,1 mm	
Nature du gainage			Acier inoxydable	

T A B L E A U IV.

Emplacement des thermocouples à l'intérieur des échantillons lors des
essais de simulation thermique.

N° Echantillon	Thermocouple				
	1	2	3	4 Surface combustible	5 Surface gainage
	W/W 26 % Pe mm	W/W 26 % Pe mm	Pt/Pt 10%Rh mm	Pt/Pt 10%Rh mm	Pt/Pt 10% Rh mm
1	1,3 ± 0,3	-	-	9,5 ± 0,3	10,1 ± 0,1
2	1,3 ± 0,3	-	-	9,5 ± 0,3	10,1 ± 0,1
3	1,3 ± 0,3	1,9 ± 0,3	-	9,5 ± 0,3	10,1 ± 0,1
4	1,3 ± 0,3	-	-	9,5 ± 0,3	10,1 ± 0,1
5	1,3 ± 0,3	-	-	9,5 ± 0,3	10,1 ± 0,1
6	-	-	1,3 ± 0,3	9,5 ± 0,3	10,1 ± 0,1
7	-	-	1,3 ± 0,3	9,5 ± 0,3	10,1 ± 0,1
8	-	-	1,3 ± 0,3	9,5 ± 0,3	10,1 ± 0,1
9	1,3 ± 0,3	-	-	9,5 ± 0,3	10,1 ± 0,1
10	1,3 ± 0,3	-	-	9,5 ± 0,3	10,1 ± 0,1
11	1,3 ± 0,3	-	-	9,5 ± 0,3	10,1 ± 0,1
12	-	-	1,3 ± 0,3	9,5 ± 0,3	10,1 ± 0,1
13	-	-	1,3 ± 0,3	9,5 ± 0,3	10,1 ± 0,1

T A B L E A U V.

$\int_0^T k dT$ mesurée dans atmosphère d'hélium et d'argon (1 atm)

à 84 ± 1 et 88 ± 1 % DT (W/cm).

Température (°C)	Hélium		Argon		Godfrey Stora Hélium 88 % DT
	84 % DT	88 % DT	84 % DT	88 % DT	
0	0	0	0	0	0
200	7,7	9,1	6,9	7,4	7,3
400	15,3	17,1	11,6	12,9	14,4
600	22,2	24,3	16,5	18,0	21,0
800	27,0	29,0	20,5	22,6	26,6
1000	30,7	33,5	24,5	27,0	31,5
1200	34,0	37,5	28,1	30,5	35,5
1400	37,3	41,2	31,2	33,7	39,7
1600	42,8	45,2	34,4	37,0	(44,5)
1800	44,2	48,7	(37,5)	(40)	(48,0)
2000	47,7	52,3	(41)	(44,5)	(52,0)
2200	51,3	55,7	(46)	(50)	(55,8)
2400	55,4	60,0	(51)	(55,5)	(60,0)
2600	60,0	65,3	(57)	(62)	-
2800	(65)	(70)	(63)	(69)	-

T A B L E A U VI.

Valeurs des puissances calorifiques générées lors
des irradiations en convoyeur hydraulique HR-1.

Campagne	Echantillons	Barreau *	Endroit de détermination burn-up (mm) **	Endroit coupe métallograph. (mm) **	Puissance calorif. moy. ou maximum (W/cm) \pm 6 %
1 HR-1	1	V95 (H) ^o	0 à -20	-	140
	2	V69 ^{oo}	-	-210	140
	3	V95 (H) ^o	-	0	140
2 HR-1	4	316 ^o	0 à +20	-	560
	5	316 ^o	-	0	570
	6	316 ^o	-	- 30	600
3 HR-1	7	V276 ^o	0 à -20	-	850
	8	V282 ^{oo}	-	-180	875
	9	V279 ^o	-	-180	875
4 HR-1	10	V295 (H) ^o	0 à +20	-	1450
	11	V287 ^o	-200 à -220	-	1300
	12	V295 (H) ^o	-	0	1450
	13	V295 (H) ^o	-	- 20	1500
	14	V287 ^o	-	-180	1400
	15	V287 ^o	-	-200	1350
	16	V287 ^o	-	-240	1250
	17	V289(H) ^{oo}	-	- 20	1500
	18	V294 ^{oo}	-	-180	1400

* (H) = barreau homogène (PuO₂ présent dans les trois fractions granulométriques)

** distance en mm du plan médian du réacteur.

o irradiation à puissance constante (montée rapide).

oo irradiation à puissance montante (montée lente).

T A B L E A U VII.

Détermination du facteur géométrique.

Campagne	% DT	Gaz de remplissage	Température de surface T_s (°C)	Température centrale T_c (°C)	q^f W/cm	$\int_{T_s}^{T_c} k dT$ (W/cm)	f_g
4 HR-1	85	Ar + He	530	2000 (température de formation de la structure basaltique)	1350 1250	57,7 ($r_{2000} = 4,3 \text{ mm}$) 66,0 ($r_{2000} = 3,1 \text{ mm}$)	$0,68 \pm 0,10$
3 HR-1 (vibrés)	84	Ar	430	≤ 1800	875	55,8	$\leq 0,70 \pm 0,11$
2 HR-1 (rétreints)	88	Ar	300	≤ 1400	600	38,2	$\leq 0,81 \pm 0,13$

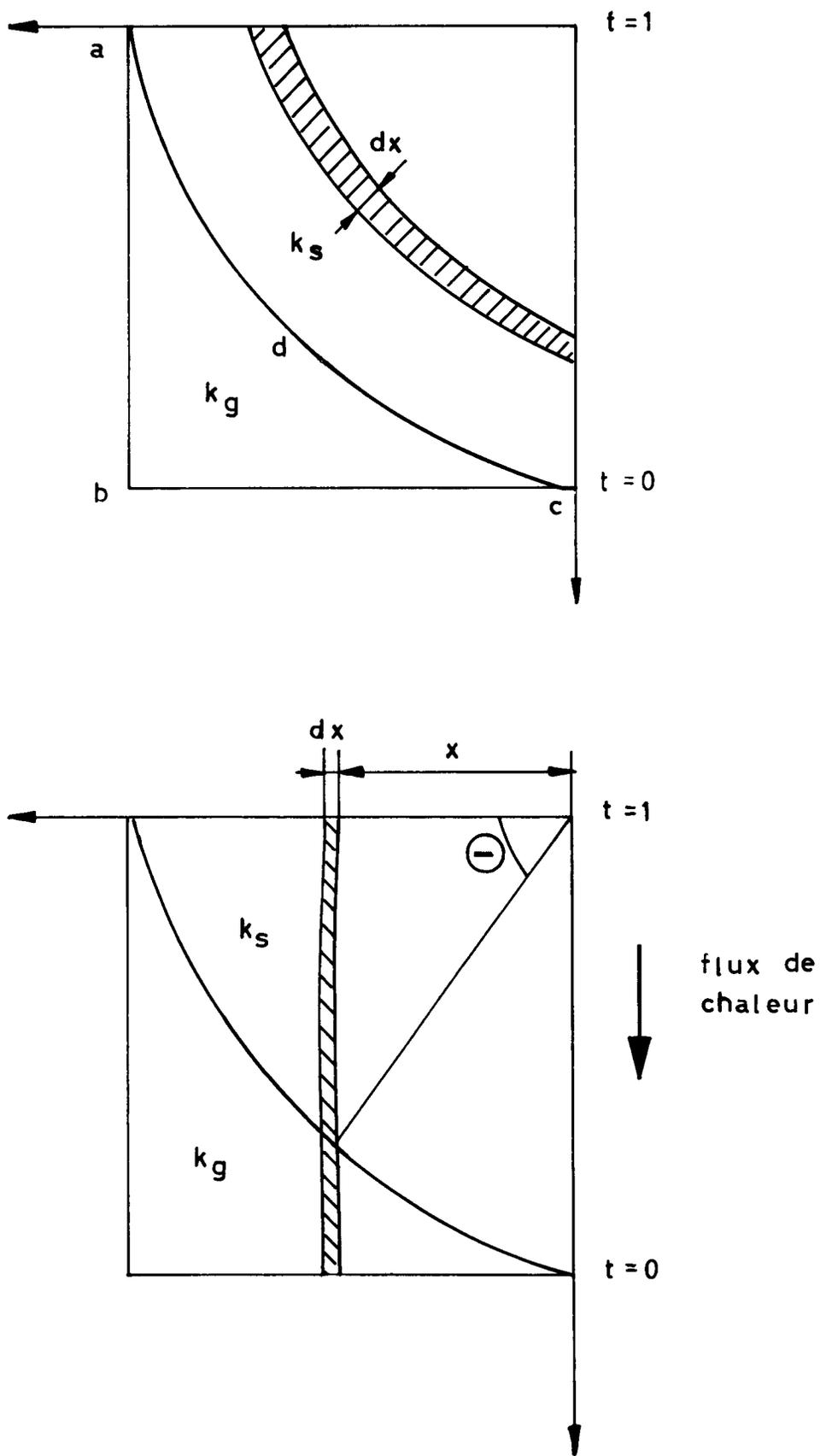


Figure 1 :
 Calcul théorique de la conductivité thermique d'un mélange gaz-poudre.
 (Composée de sphères identiques)

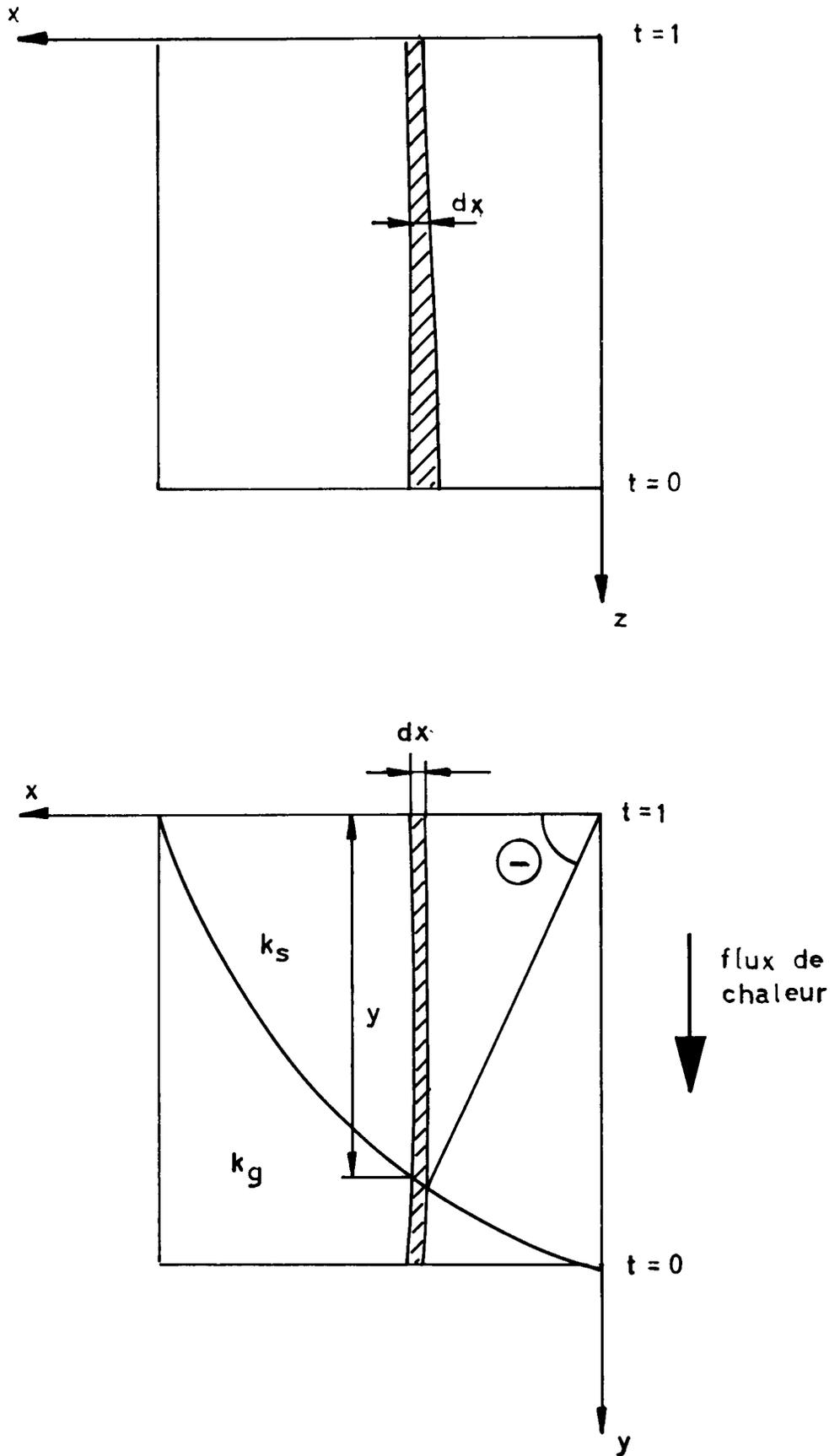


Figure 2 :
**Calcul théorique de la conductivité
 thermique d'un mélange gaz-poudre
 (composée de cylindres réguliers
 identiques.)**

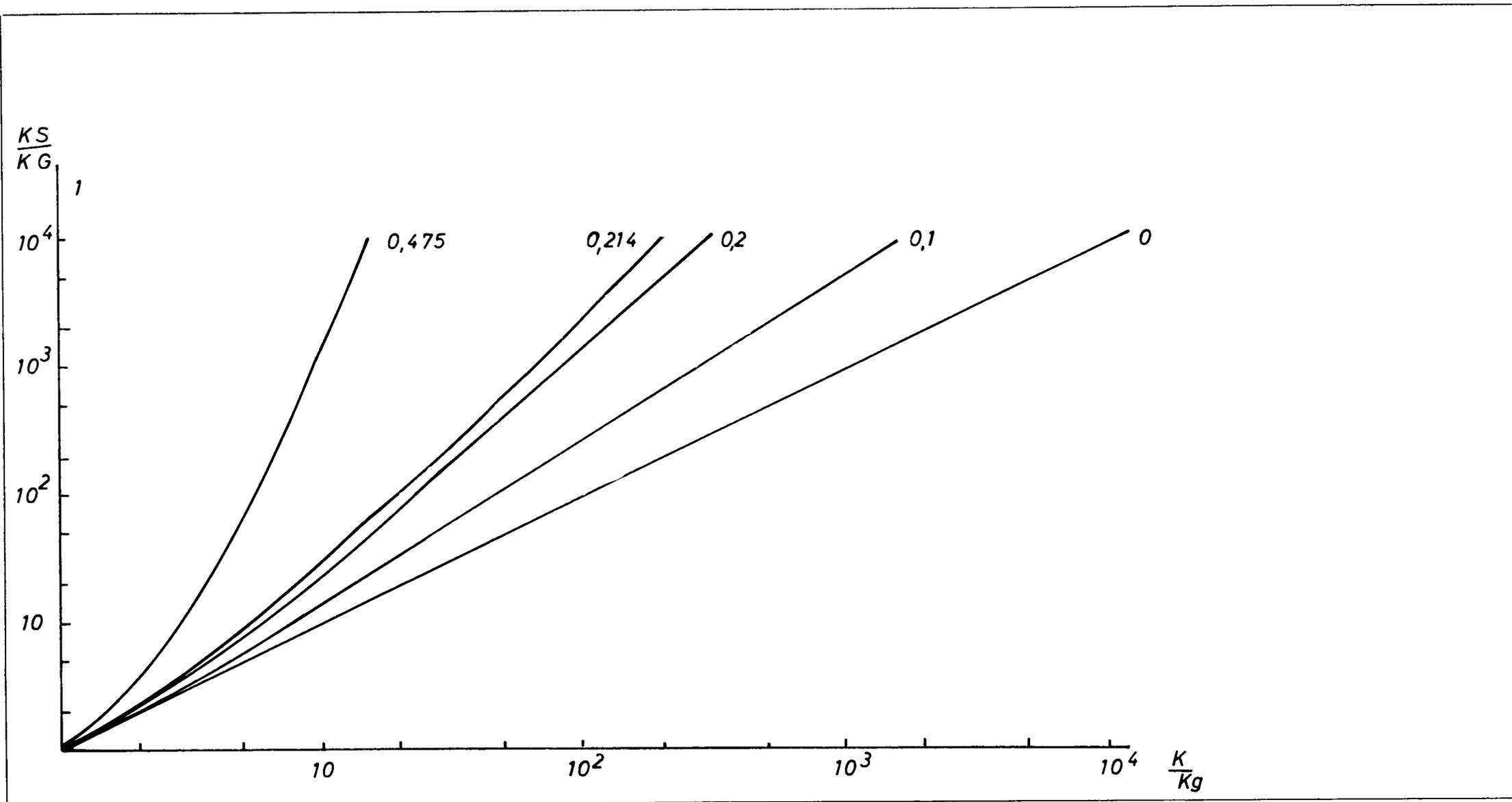


Figure 3 :

$\frac{k_s}{k_g}$ en fonction de $\frac{k}{Kg}$

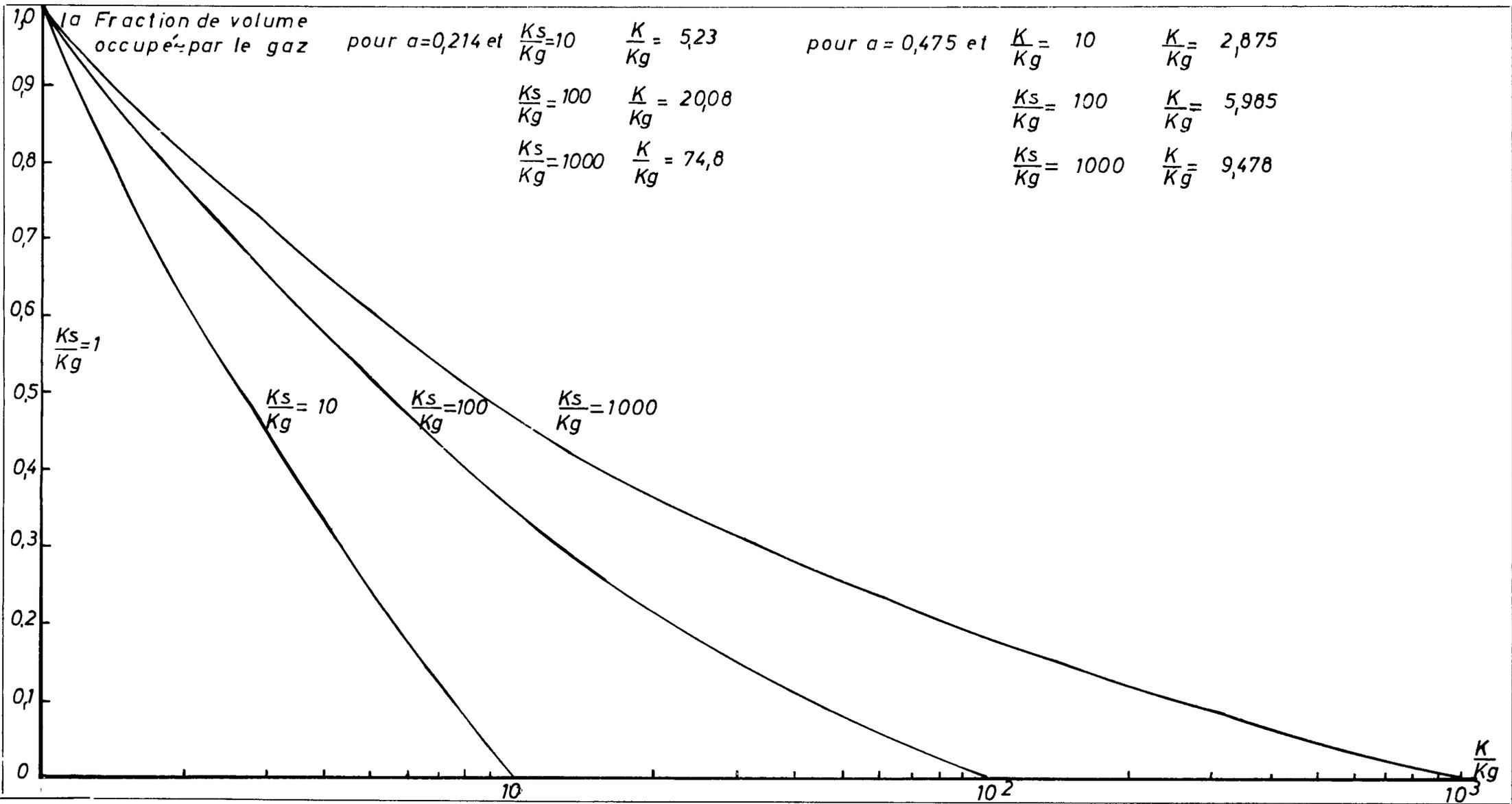


Figure 4 :
 La fraction de volume occupé par le gaz en fonction de $\frac{K}{K_g}$

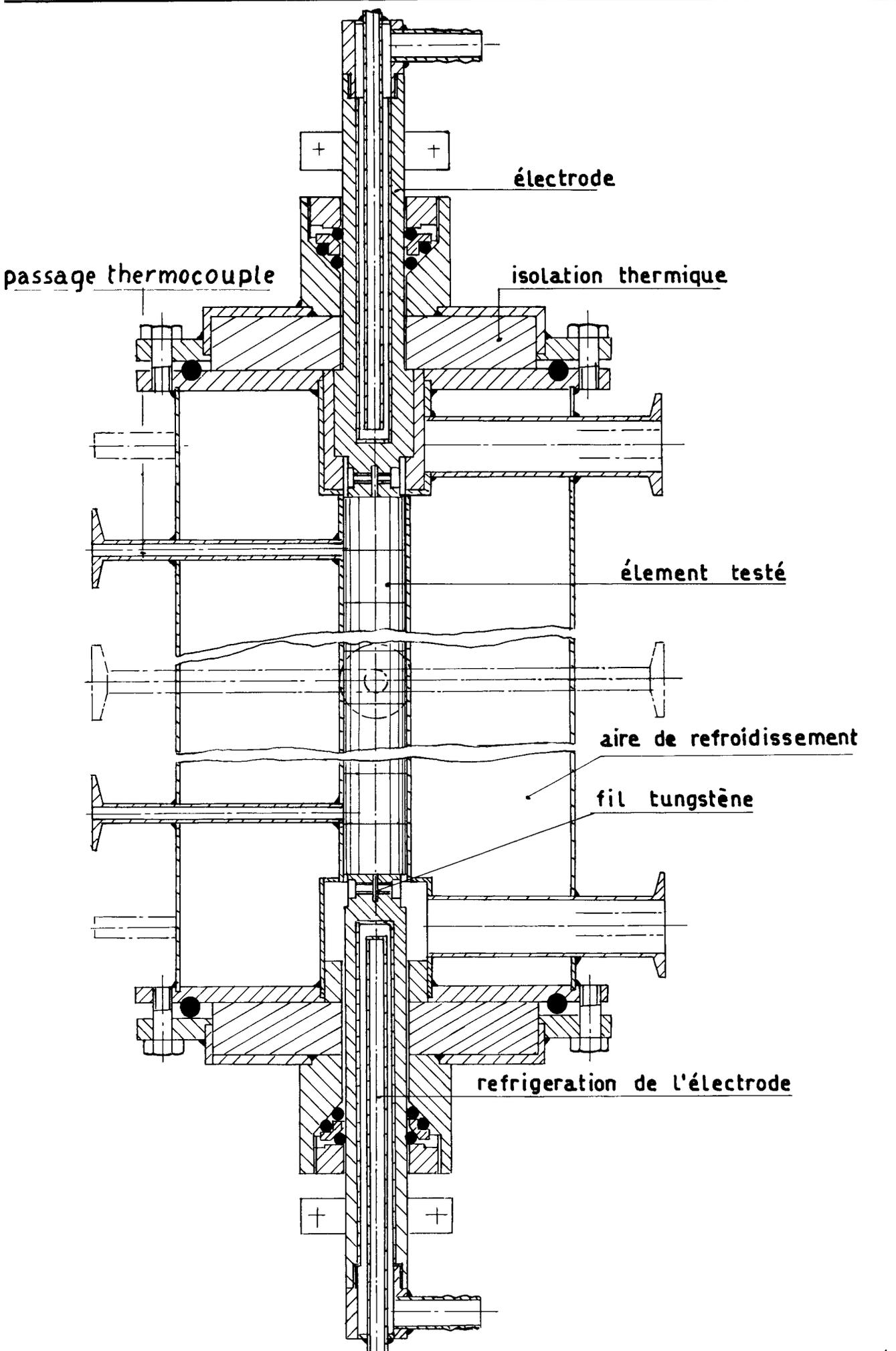


Figure 5 :

APPAREIL de SIMULATION THERMIQUE

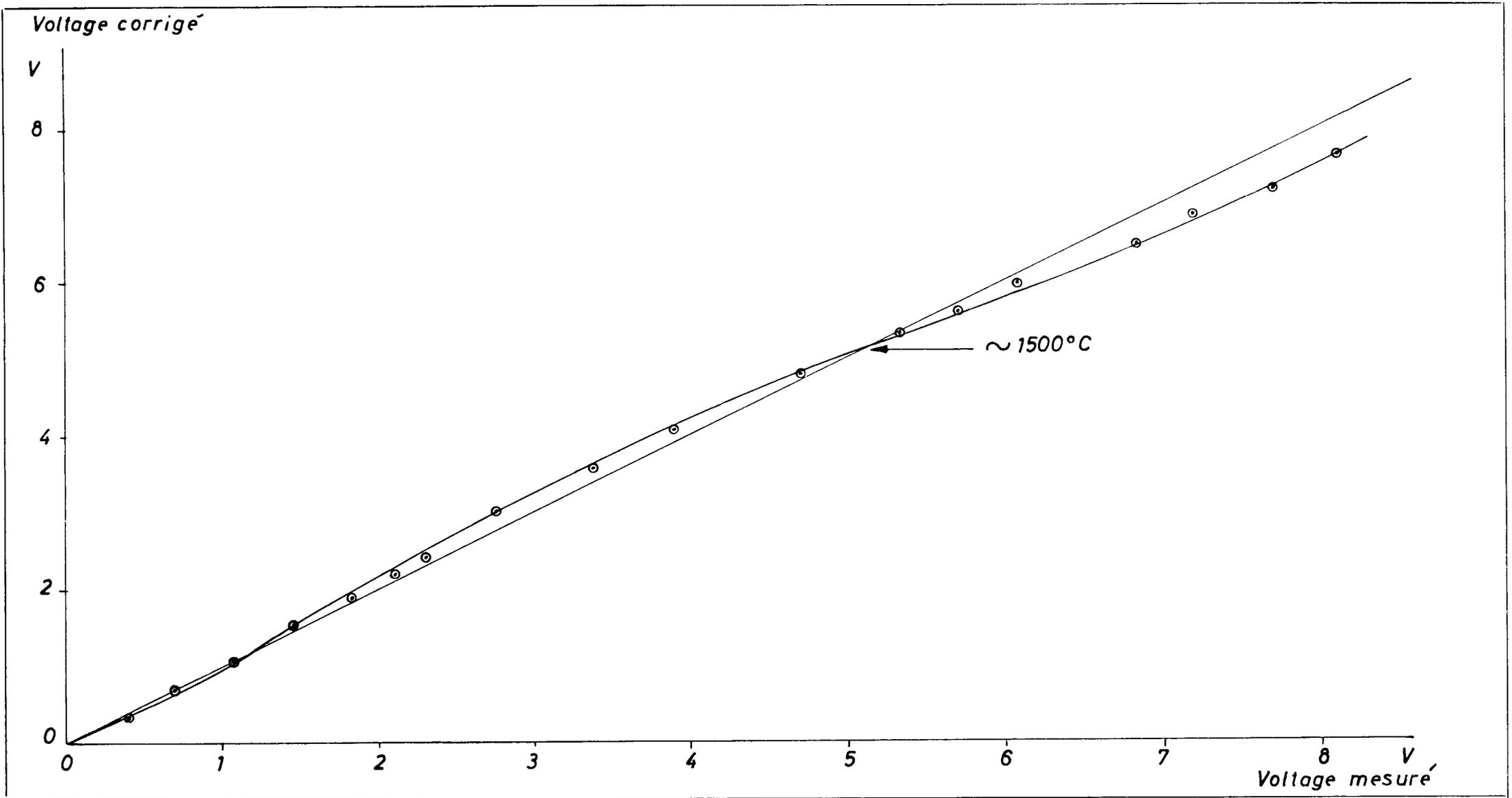


Figure 6 :

Courbe de correction de voltage.

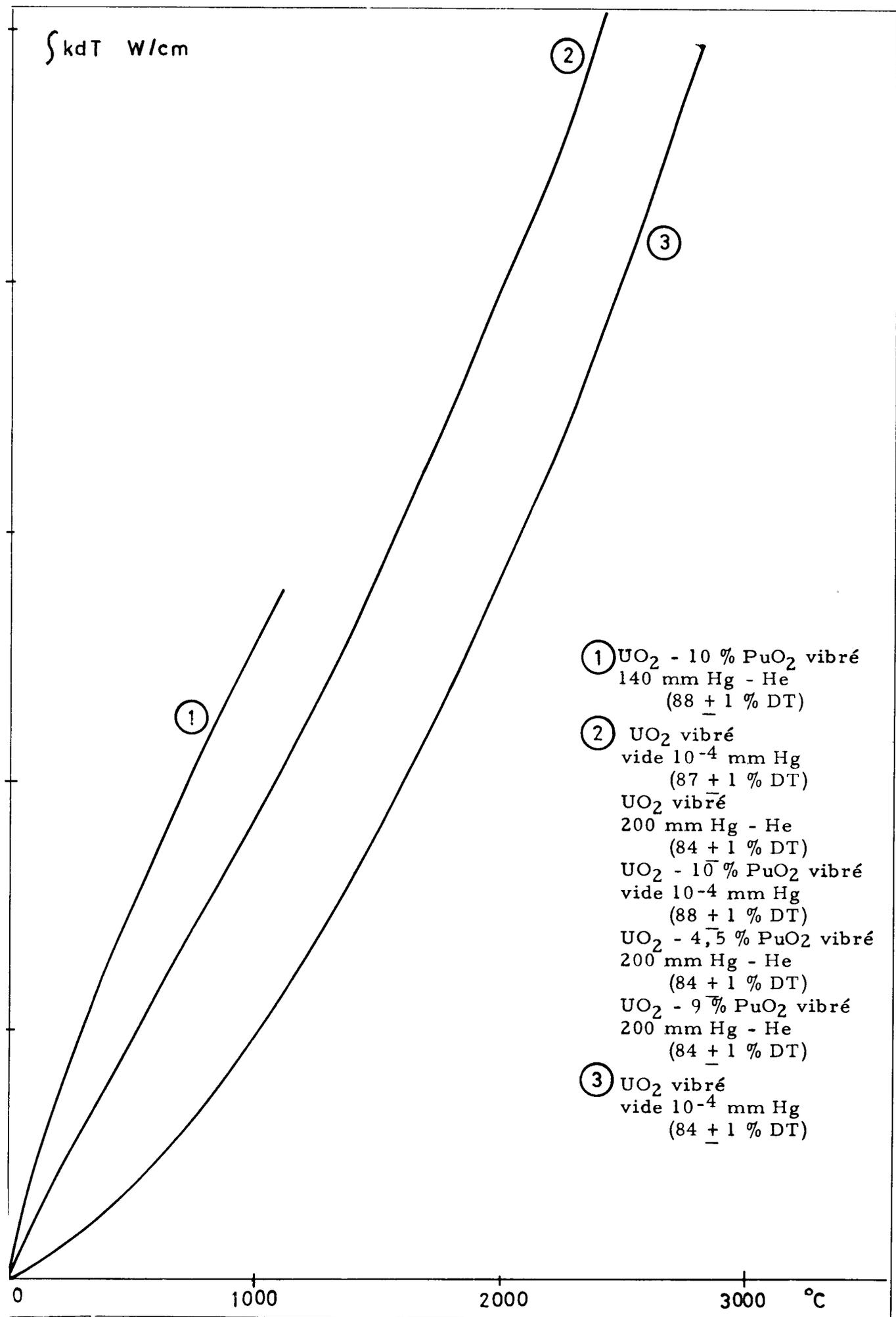


Figure 7 :

$$\int k dt d'(U - Pu) \text{ O}_2 \text{ vibré}$$

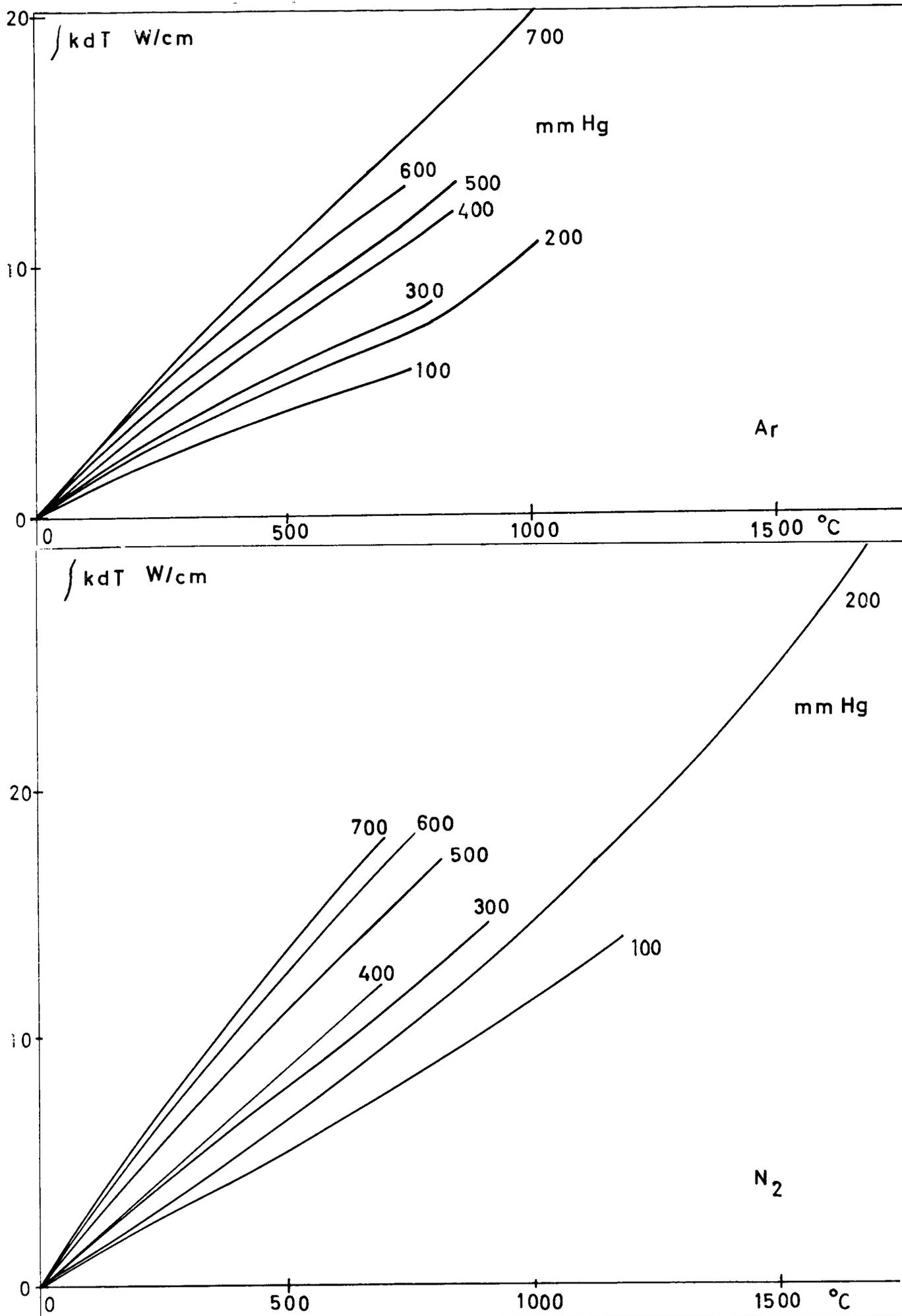


Figure 8 :
 $\int kdt$ d' UO_2 vibré (84 ± 1 DT)
 sous différentes pressions d'argon.
 et d'azote.

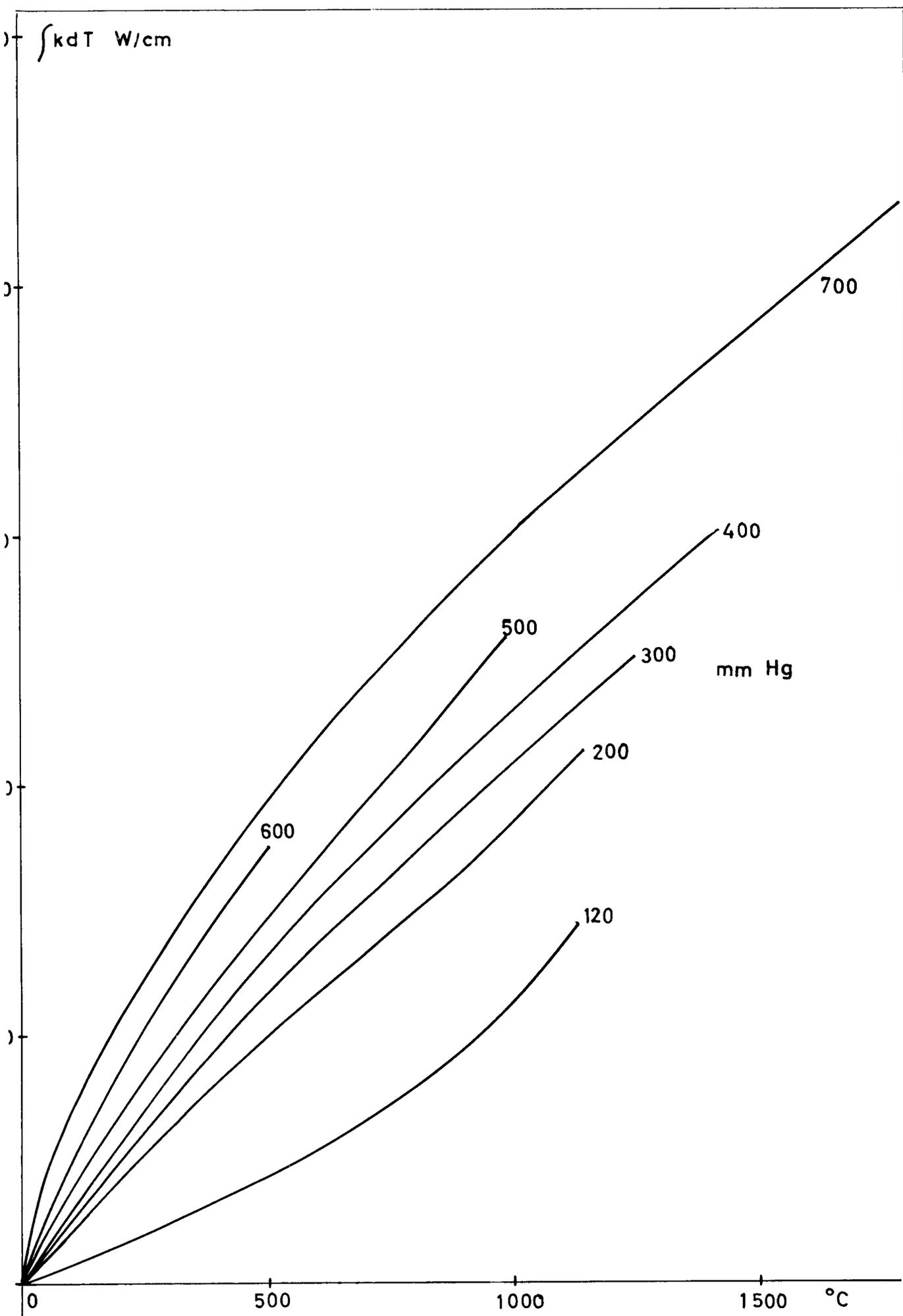
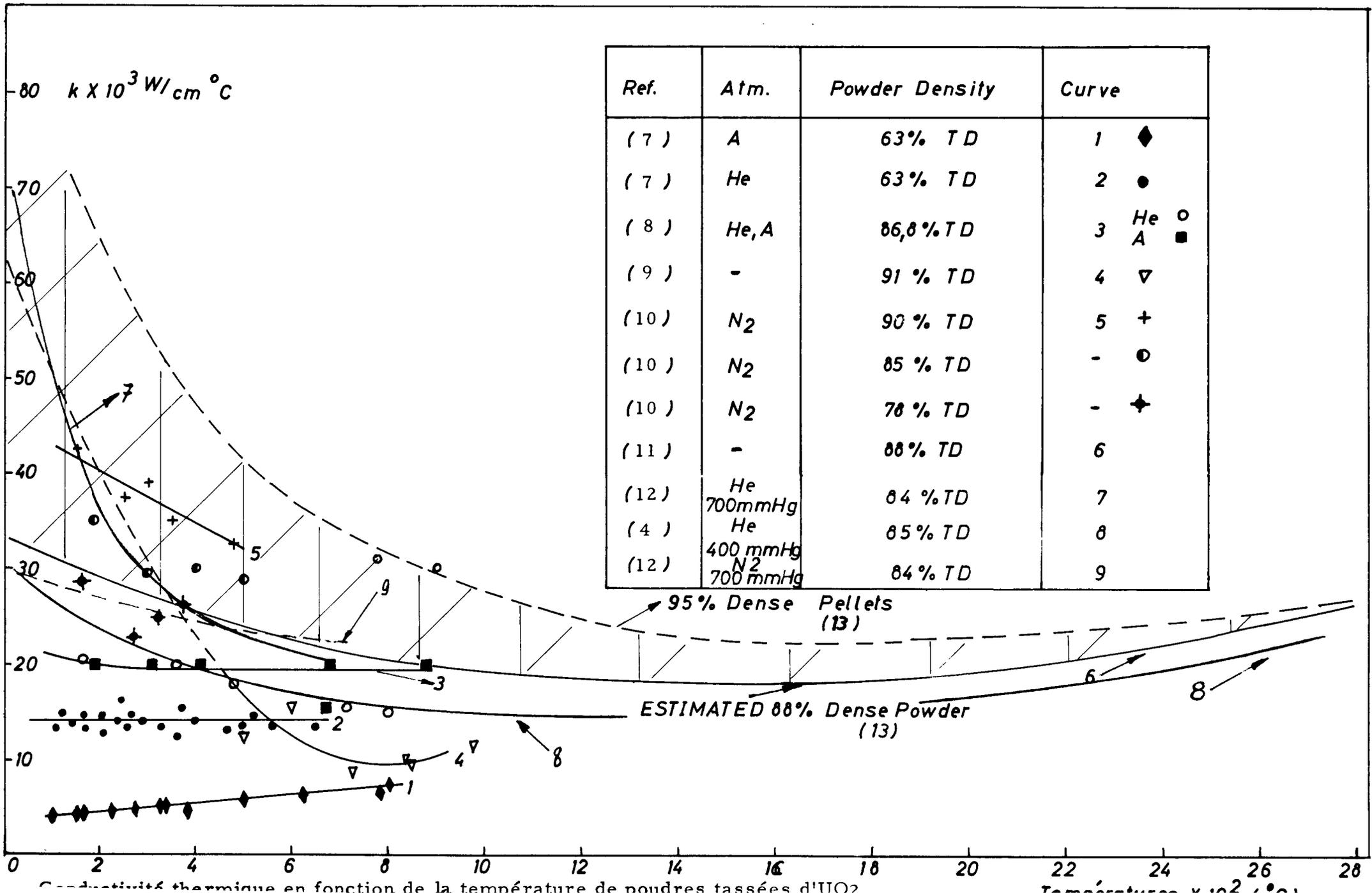


Figure 9 :
 $\int kdt$ d'UO₂ vibré (84 ± 1 % DT)
 sous différentes pressions d'hélium



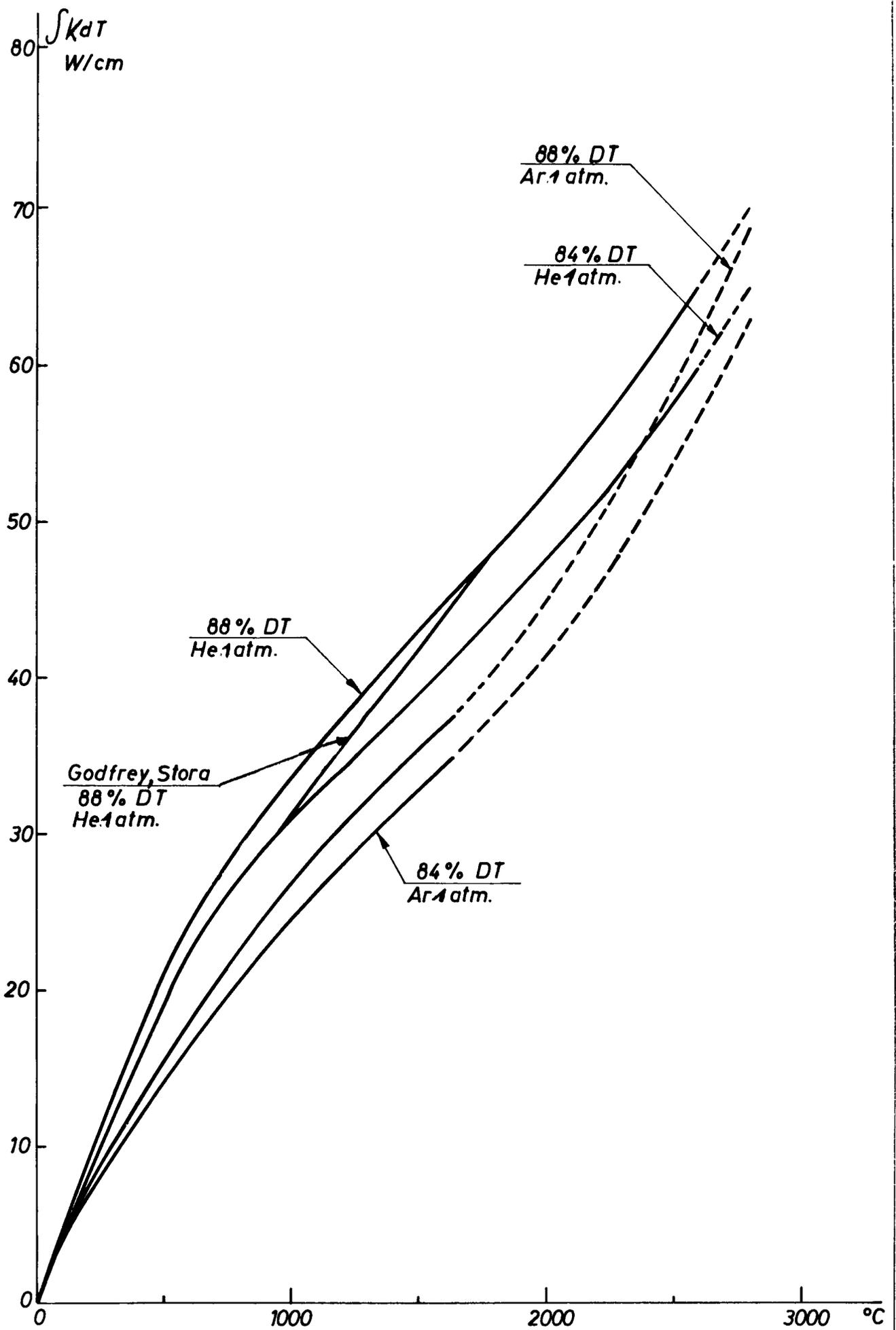


Figure 11

$\int k dT$ d' UO_2 vibré (84+1 et 88+1 %DT) sous atmosphères d'hélium et d'argon comparées avec les résultats théoriques, calculés à partir des données de Godfrey et Stora.

COTES
(mm)

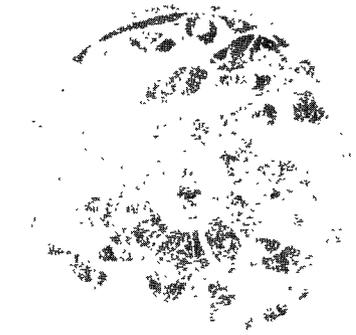
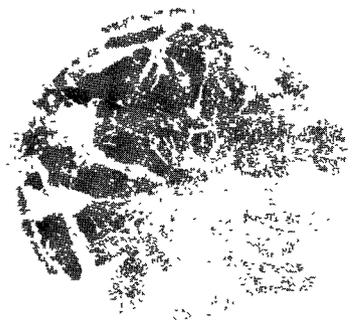
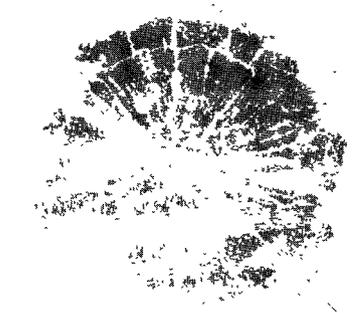
200

100

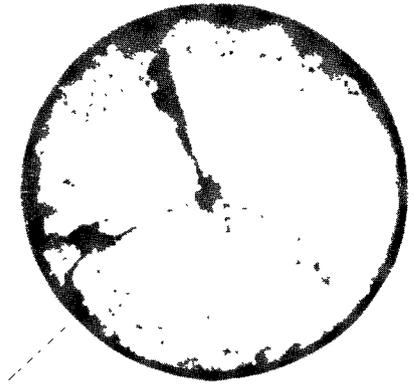
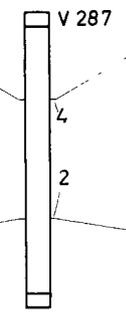
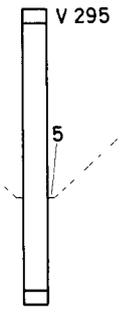
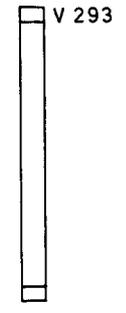
0
NIVEAU
ZERO DU
REACTEUR

-100

-200



Métallographies



Gammagraphies

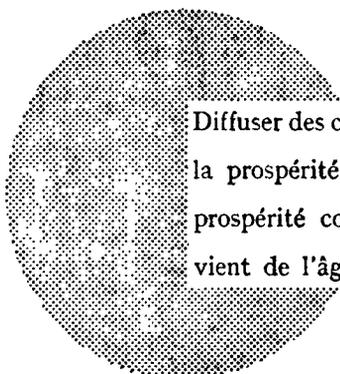
AVIS AU LECTEUR

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 STAATSBAD
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

ITALIA

LIBRERIA DELLO STATO
Piazza G. Verdi, 10 - Roma

UNITED KINGDOM

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

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