

**EUR 4903 f**

**COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES**

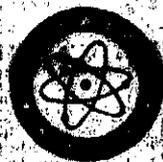
**PROCESSUS D'AUTO-ENFOUISSEMENT  
DE RECIPIENTS CONTENANT DES EFFLUENTS  
RADIOACTIFS DE HAUTE ACTIVITÉ**

*(Rapport préliminaire)*

par

**J. DONEA, S. GIULIANI et L. KESTEMONT**

1972



**Centre Commun de Recherche Nucléaire  
Établissement d'Ispra - Italie**

**Division Matériaux**

## TABLE DES MATIERES

	page
1. Amplitude du problème du stockage des déchets radioactifs	5
2. Techniques de stockage des déchets de haute activité	7
3. Le principe de l'auto-enfouissement	9
4. Objet de la présente étude	9
5. Hypothèse de travail	11
6. Equations fondamentales	12
7. Récipients sphériques	14
7.1. Puissances critiques	14
7.2. Vitesses d'enfouissement	16
7.3. Vérification expérimentale	17
7.4. Profondeurs d'enfouissement	18
8. Récipients cylindriques	20
CONCLUSIONS	21
ANNEXE 1	22
ANNEXE 2	24
REFERENCES	25

1. Amplitude du problème du stockage des déchets radioactifs

Le stockage des résidus radioactifs provenant des centrales nucléaires constitue, tant par la rapide augmentation des niveaux de production prévue pour les années à venir que par les implications sanitaires et écologiques de la question, un problème crucial auquel on devra donner à bref délai une solution offrant un maximum de garanties sur le plan de la sécurité et de la protection.

Le tableau I a été préparé en vue de situer l'importance qu'est appelé à prendre dans la Communauté le problème de l'élimination des déchets provenant des réacteurs de puissance. Les données relatives à la production et à l'activité des déchets de haute activité ont été extraites d'un article paru récemment dans la revue Euro-Spectra (Réf.1). Elles se fondent sur l'hypothèse d'un programme minimum de développement de l'énergie nucléaire dans l'Europe des Six (40.000 MWe installés en 1980, 400.000 MWe en l'an 2000).

Année	1970	1980	1990	2000
Curies déchargées annuellement $-(X 10^9)$	0,6	6	28	60
Production annuelle ( $m^3$ )	13	130	500	1200
Volumes cumulés ( $m^3$ )	20	650	4000	13.000
Estimation de la puissance thermique présente (MW)	--	60	250	700

TABLEAU 1 : Prévisions relatives à la production et à l'activité des déchets radioactifs solides. L'estimation de la puissance thermique est basée sur l'hypothèse d'une dilution des produits de fission purs par facteur 10.

En nous inspirant des données fournies dans une étude américaine récente (Réf. 2) , nous avons estimé la puissance thermique dégagée par l'ensemble des produits de haute activité accumulés en fin de chaque décennie.

Dans cette évaluation, on a supposé que les déchets sont stockés 1 an après le déchargement du combustible irradié et que les opérations de retraitement conduisent à une dilution par un facteur 10 des produits de fission purs. Les résultats sont consignés à la dernière ligne du Tableau 1. On constate ainsi qu'en l'an 2000, la puissance dégagée par l'ensemble des déchets accumulés à cette date sera de l'ordre de 700MW.

Cette valeur qui ne correspond qu'à un programme minimum de développement de l'énergie nucléaire dans la Communauté, représente la puissance développée par un réacteur de taille respectable. Il est également intéressant de voir quelle pourrait être la borne supérieure à la production et à l'activité des résidus solides.

A ce jour, la consommation globale d'énergie dans la Communauté est de l'ordre de 900 millions de tec (1 tec = 0,36 Mwd). Imaginons que cette quantité d'énergie soit, dès à présent, produite exclusivement par voie nucléaire et que le taux de consommation augmente de 5% par an.

Admettant que le rendement des centrales qui produisent le vecteur énergétique (Réf. 5) soit de 50% et notant (Réf. 2) que 10.000 Mwd donnent lieu à 25 litres de résidus solidifiés, on aurait accumulé en l'an 2000 plus de 110.000 m<sup>3</sup> de résidus dégageant quelque chose comme 15.000 MW.

Les chiffres précédents montrent clairement que le problème de l'évacuation de la chaleur provenant des déchets nucléaires sera, d'ici quelques dizaines d'années, extrêmement préoccupant. Ces considérations conduisent tout naturellement à se poser la question de savoir s'il n'est pas possible d'imaginer une technique de stockage qui exploiterait précisément ce dégagement de chaleur pour provoquer l'enfouissement des déchets dans les couches profondes du sous-sol. Une telle solution est proposée

dans cette étude. Avant d'en examiner les détails, nous passerons brièvement en revue les diverses techniques de stockage utilisées actuellement.

2. Techniques de stockage des déchets de haute activité (Réf. 2)  
( et 3)

Il n'existe à ce jour aucune pratique industrielle de longue durée et à grande échelle pour le traitement des combustibles irradiés provenant des réacteurs de puissance. En particulier, le sort à réserver aux effluents de haute activité commence seulement à préoccuper les usines de retraitement.

Le stockage sous forme liquide est une pratique courante depuis une vingtaine d'années; les effluents sont enfermés sous forme de solutions acides dans des réservoirs en acier inoxydable ou, s'ils ont été neutralisés, dans des réservoirs en acier au carbone. La chaleur engendrée par la décroissance radioactive est généralement prélevée durant le stockage; à cet effet, des serpentins parcourus par de l'eau sont plongés dans la solution active. Un volume de résidus voisinant les 350.000 m<sup>3</sup> est actuellement entreposé aux Etats-Unis dans plus de 200 réservoirs souterrains.

Le stockage sous forme liquide est loin de présenter toutes les garanties de sécurité requises, puisque la rupture d'une quinzaine de réservoirs en acier au carbone s'est vérifiée, avec comme conséquence la contamination du sol. D'autre part, cette forme de stockage est extrêmement encombrante et ne pourra plus être utilisée lorsque les quantités d'effluents seront bien supérieures aux valeurs actuelles.

Aussi les laboratoires de divers pays se sont préoccupés de mettre au point d'autres formes de stockage des résidus actifs. A ce jour, le stockage sous forme solide apparaît comme la seule technique permettant une nette réduction de volume et un accroissement de la sécurité du stockage.

Quatre procédés de solidification des effluents liquides de haute activité ont été mis au point ces dernières années et testés dans des installations pilotes (Réf. 2).

Ces procédés sont la calcination en creuset, la solidification par "spray", l'englobage par verre au phosphate et la calcination par lit fluidisé. Chacune de ces techniques fait appel à un apport de chaleur en vue d'élever la température et provoquer ainsi l'élimination des constituants volatiles (eau, nitrates). Le solide qui résulte du refroidissement est relativement stable du point de vue chimique.

La réglementation américaine s'oriente vers l'obligation de solidifier les produits de fission dans les 5 années qui suivent le déchargement du combustible et de les entreposer dans un site de stockage définitif (mines de sel) dans les 10 années qui suivent le même déchargement. Une autre philosophie tend à se développer; elle préconise la solidification immédiate à la sortie de l'usine de retraitement et le "refroidissement" sous forme solide sur le site pendant 3 à 5 ans.

Dans ces cas, le procédé utilisé serait probablement la calcination des effluents additionnés d'un diluant inerte (nitrate d'aluminium par exemple).

Le solide refroidi pourrait être, avant son expédition au site de stockage définitif, incorporé dans un milieu moins léchable (verre, métal, etc.).

En Europe, aucune réglementation ni projet de réglementation n'a encore été proposé jusqu'ici.

Il faut également signaler que des études sont actuellement en cours aux Etats-Unis en vue d'examiner la possibilité d'évacuer les déchets les plus actifs soit sur d'autres planètes soit sur le soleil.

### 3. Le principe de l'auto-enfouissement

La dissipation de chaleur au sein des effluents provenant des installations de retraitement des combustibles irradiés, constitue comme on l'a vu, un problème important dans les techniques de stockage habituelles.

La technique d'auto-enfouissement que nous suggérons dans ce travail consiste, au contraire, à exploiter la chaleur due à la décroissance radioactive pour provoquer l'élimination des déchets vers les couches profondes du sous-sol. On peut, en effet, imaginer d'enfermer des résidus solides de haute activité dans des récipients appropriés et d'enfouir ces derniers dans le sol. Si la chaleur dégagée par les produits est supérieure à une valeur critique qui sera définie par la suite, on obtiendra après un certain laps de temps la fusion locale du sol en contact avec le récipient et, en conséquence, un ultérieur enfouissement, automatique cette fois. Pour autant que le récipient soit plus dense que le sol et apte à maintenir son intégrité à la température de fusion du sol, ce processus d'auto-enfouissement pourra se prolonger aussi longtemps que la source de puissance constituée par les déchets actifs sera à même de fournir la chaleur nécessaire.

On se trouve ainsi en présence d'une technique d'enfouissement de déchets nucléaires dans les couches profondes du sous-sol qui présente le triple avantage d'être automatique, de résoudre élégamment le problème de la dissipation de chaleur et de minimiser les risques de contamination du sol.

### 4. Objet de la présente étude

Il est clair que la mise en oeuvre d'une technique d'auto-enfouissement pose, comme toute méthode de stockage, de nombreux problèmes. Pour ne citer que quelques questions délicates, signalons la confection des récipients à l'aide de matériaux adaptés à la nature du sous-sol choisi pour l'en-

fouissement, le remplissage et le transport de récipients sièges de radioactivité et de génération de chaleur appréciables, la nécessité de repérer des emplacements où le sous-sol est uniforme.

Ces questions, bien qu'importantes, ne sont pas abordées dans cette étude préliminaire. La nécessité de les examiner est, en effet, subordonnée à la réponse qui sera donnée à la question de savoir si le processus d'auto-enfouissement est effectivement réalisable à l'aide de sources constituées par des déchets radioactifs (puissance thermique limitée et décroissante dans le temps) et en utilisant des récipients de dimensions acceptables en pratique.

On s'est, dès lors, limité à examiner l'influence des paramètres régissant directement le phénomène d'auto-enfouissement, à savoir :

- la forme géométrique externe des récipients et leurs dimensions globales;
- la puissance spécifique de la source de chaleur et sa loi de décroissance;
- les propriétés thermiques du sous-sol.

Le processus d'auto-enfouissement a fait l'objet de plusieurs études récentes aux Etats-Unis. On a notamment examiné la possibilité d'assurer, lors de leur rentrée accidentelle dans l'atmosphère terrestre, l'intégrité de sources radioisotopiques ( $\text{Sr}^{90}$ ) montées à bord d'engins spatiaux (Réf.6). L'impact de ces sources sur la surface terrestre provoquerait leur enfouissement partiel et le processus d'auto-enfouissement serait exploité pour assurer leur stockage définitif.

Dans cette optique, Easton (Réf. 4) a publié une étude analytique de l'enfouissement automatique appliqué à des sources radioisotopiques de forme sphérique et cylindrique. Malheureusement, les résultats présentés pour la géométrie sphérique ne permettent pas de couvrir la gamme de dimensions à

envisager dans notre travail. En ce qui concerne la géométrie cylindrique, Easton a traité uniquement le cas de récipients couchés dans le sol, alors que nous entendons examiner le cylindre disposé verticalement. En outre, son étude est basée sur un modèle mathématique (source linéique) inadapté à notre avis à une représentation correcte du cylindre vertical.

Dans ces conditions, nous avons repris le problème en nous inspirant des hypothèses de travail proposées par Easton mais en faisant appel à une technique de résolution numérique (éléments finis) permettant de mettre en oeuvre des modèles mathématiques plus élaborés.

Dans une première analyse on a simulé la présence du récipient en appliquant sur les bords d'une cavité cylindrique ou sphérique pratiquée dans le sol des conditions aux limites soit de flux thermique uniforme, soit de température uniforme égale à la température de fusion du sol. Cette double analyse permet de définir des bornes supérieures et inférieures au comportement réel d'un récipient et devra permettre de définir les plages les plus intéressantes pour une étude ultérieure plus détaillée. Les techniques de calcul utilisées rendent, en effet, possible un examen de l'influence de la structure interne des récipients (mode de répartition des sources) sur la vitesse d'enfouissement.

##### 5. Hypothèses de travail

Toute solution du problème de l'auto-enfouissement implique l'examen du mouvement dans les couches du sous-sol d'une source de chaleur de dimensions finies et de puissance variable dans le temps.

On conçoit aisément que des hypothèses simplificatrices s'imposent pour rendre abordable la solution d'un tel problème. Nous nous contenterons ici de les énoncer, leurs justifications sont exposées dans la référence 4.

En vue de linéariser les équations différentielles régissant le processus, on admet que les propriétés thermiques du sol sont indépendantes de la température.

On supposera également que le champ de température autour du récipient apparaît comme stationnaire pour un observateur lié à la source de chaleur. Cette hypothèse implique une vitesse constante d'enfouissement dans un milieu infini et homogène. Comme la puissance de la source décroît dans le temps, on devra procéder à un découpage du temps de manière qu'à l'intérieur de chaque intervalle la puissance de la source puisse être considérée comme constante.

Finalement, on négligera les sources dipôles dues aux phénomènes de fusion et de congélation du sol ainsi que les effets de la viscosité.

## 6. Equations fondamentales

Considérons une source de chaleur se déplaçant à la vitesse  $U$  le long de l'axe  $Ox$  d'un système fixe de coordonnées  $(x, y, z)$ . Dans ce système d'axes, le champ de température dans le sol répond à l'équation de conduction de la chaleur en régime transitoire

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

où  $\nabla^2$  est l'opérateur laplacien,  $t$  est le temps,  $\alpha$  la diffusivité thermique du sol et  $T$  l'écart de température par rapport à la température au large.

Si nous substituons à l'axe  $Ox$  un axe  $Ox'$  parallèle au premier mais lié à la source de chaleur, l'équation (1) prendra, dans l'hypothèse d'un état stationnaire aux yeux d'un observateur lié à la source, la forme suivante (Réf. 7):

$$\nabla_{x'}^2 T + \frac{U}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x'} = 0 \quad (2)$$

où  $\nabla_{x'}^2$  est le laplacien dans le système mobile de coordonnées  $(x', y, z)$ .

L'équation (2) qui est fondamentale pour l'étude de l'auto-enfouissement sera résolue numériquement par la méthode des éléments finis (Réf. 8).

Quoiqu'il ne soit pas possible d'associer à cette équation un problème variationnel au sens du théorème d'Euler, on pourrait obtenir une formulation équivalente par la méthode de Galerkin. On constaterait cependant que cette procédure conduit à une matrice non symétrique et mal conditionnée dans le formalisme aux éléments finis. Une procédure plus adéquate consiste à remarquer que l'équation (2) possède une solution de la forme

$$T(x', y, z) = e^{\frac{-U x'}{2\alpha}} \cdot f(x', y, z) \quad (3)$$

pourvu que la fonction auxiliaire  $f$  satisfasse à l'équation

$$\nabla_{x'}^2 f - (U/2\alpha)^2 f = 0 \quad (4)$$

Dans l'hypothèse où les valeurs de  $T$  (et donc de  $f$ ) sont spécifiées sur l'entièreté du contour limitant le domaine  $D$  examiné, le théorème d'Euler du calcul des variations stipule que la fonction  $f$  qui satisfait à l'équation (4) rend également minimum la fonctionnelle :

$$\kappa = \iiint_D \left\{ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{U}{2\alpha} \right)^2 f^2 \right\} dx dy dz \quad (5)$$

Le problème variationnel (5) se prête à une solution numérique à l'aide du code TAFE (Réf. 9) que nous avons écrit pour l'analyse des champs thermiques. La seule variante par rapport à la solution classique de l'équation de Laplace consiste en l'introduction dans la matrice symétrique régissant les valeurs nodales de la grandeur  $f$ , de termes complémentaires dus au mouvement de la source de chaleur.

Le champ de température autour de la source est obtenu en introduisant dans l'expression (3) les valeurs de la fonction  $f$  solutions du problème (5).

## 7. Réipients sphériques

### 7.1. Puissances critiques

L'étude de Easton (Réf. 4) nous apprend que la puissance thermique minimum  $Q_{cr}$  que doit dégager un réipient sphérique de rayon  $R$  (cm) pour donner naissance au processus d'auto-enfouissement répond à la relation

$$Q_{cr} = 4 \pi R k T_m \quad (\text{watts}) \quad (6)$$

où  $k$  (w/cm-°C) est la conductivité thermique du sol et  $T_m$  (°C) son point de fusion.

L'auto-enfouissement d'un réipient sphérique contenant des déchets radioactifs de densité de puissance  $q$  (w/cm<sup>3</sup>) n'est donc envisageable qu'à la condition que

$$q > \frac{3 k T_m}{R^2} \quad (7)$$

Pour fixer un ordre de grandeur des densités de puissance à mettre en jeu, prenons le cas de l'enfouissement dans du sel (NaCl) pour lequel

$$k \approx 6 \cdot 10^{-2} \text{ w/cm-}^\circ\text{C} \quad ; \quad T_m \approx 800 \text{ }^\circ\text{C}$$

Les densités de puissance minimum sont indiquées dans le tableau suivant en fonction du rayon du réipient :

R(cm)	10	20	30	40	50
$q_{cr}$ (w/cm <sup>3</sup> )	1.44	0.36	0.16	0.09	0.06

Il n'est pas très aisé de fixer les valeurs de densités de puissance disponibles dans les déchets radioactifs. Celles-ci dépendent fortement du type de combustible, du taux de combustion réalisé, du temps écoulé entre l'arrêt du réacteur et le stockage des déchets ainsi que du degré de dilution des produits de fission purs réalisé lors du retraitement du combustible.

Une estimation des densités de puissance peut être faite sur la base d'un combustible type décrit dans une étude américaine (Réf. 2) et généralement choisi comme référence pour les installations de retraitement de l'avenir (Réf.3).

Le réacteur de référence est à eau pressurisée et brûle de l' $UO_2$  enrichi à 3,3% en  $U^{235}$ . Il fonctionne à un niveau moyen de puissance de 34,8 MW/tonne et réalise un taux de combustion de 33000 MWd/tonne.

Les informations contenues dans la référence mentionnée permettent d'évaluer la puissance spécifique des produits de fission purs en fonction du temps écoulé depuis l'arrêt du réacteur. On obtient ainsi qu'après 90 jours de refroidissement, les produits purs possèdent une densité de puissance de 6 W/cm<sup>3</sup>; après 150 jours, la densité de puissance tombe à 4,4 W/cm<sup>3</sup>, après un an elle serait de 2 W/cm<sup>3</sup>.

En admettant que les opérations de retraitement conduisent à une dilution des produits purs par un facteur 10, on devrait ainsi disposer de déchets radioactifs de densité de puissance initiale égale à plusieurs fois les dernières densités critiques mentionnées dans le tableau précédent.

## 7.2. Vitesses d'enfouissement

Les vitesses d'enfouissement réalisables à l'aide de récipients sphériques sont fonctions de leurs dimensions, de la densité de puissance disponible ainsi que des propriétés thermiques du sol.

En fait, les choses se présentent de manière assez simple, car tous ces paramètres peuvent être incorporés dans deux quantités sans dimensions, à savoir :

- le rapport  $Q/Q_{cr}$  de la puissance thermique effective à la puissance critique définie par la relation (6) :

$$Q/Q_{cr} = R^2 \cdot q / 3k.T_m \quad (8)$$

- le rapport

$$Z = \frac{U \cdot R}{2 \alpha} \quad (9)$$

du produit de la vitesse par le rayon du récipient divisé par le double de la diffusivité thermique du sol.

L'examen complet de l'auto-enfouissement de récipients sphériques se réduit ainsi à la construction d'un diagramme donnant le rapport  $Q/Q_{cr}$  en fonction de la quantité  $Z$ .

Il est clair, toutefois, que la valeur de  $Z$  (et donc de la vitesse) correspondant à une valeur déterminée du rapport  $Q/Q_{cr}$  dépend du mode de distribution du flux thermique sur la surface du récipient en contact avec le sol. Comme indiqué précédemment, deux configurations ont été envisagées en vue d'encadrer le comportement réel d'un récipient sphérique.

Dans la première configuration, on suppose que le bord de la cavité sphérique simulant la présence du récipient est

à température uniforme égale à la température de fusion  $T_m$  du sol, tandis qu'à grande distance la température reste imperturbée.

La résolution numérique du champ de température pour diverses valeurs du rapport  $Z$ , suivie d'une intégration du flux thermique destinée à fournir la puissance dégagée par le récipient, a fourni le comportement décrit par la courbe de droite de la figure 1.

La seconde configuration suppose un flux thermique uniformément réparti sur le bord de la cavité sphérique. Les résultats obtenus conduisent à la loi de comportement décrite par la courbe de gauche de la figure 1.

On constate qu'à parité de puissance, la vitesse d'enfouissement d'une sphère isotherme est nettement supérieure à celle d'une sphère à flux uniforme de même diamètre. Ceci s'explique par le fait que contrairement au modèle à flux uniforme, le modèle à sphère isotherme comporte une concentration du flux thermique dans la direction d'enfouissement. La figure 1.a illustre la répartition du flux thermique pour les deux modèles envisagés, tandis que la figure 1.b montre la répartition des isothermes autour d'une sphère en mouvement dans l'hypothèse où la surface de la sphère est à température uniforme.

### 7.3. Vérification expérimentale

En vue de contrôler les données théoriques relatives aux vitesses d'enfouissement réalisables, nous avons réalisé l'enfouissement automatique dans un bloc de parafine pressée d'une sphère en acier inoxydable de 5 cm de diamètre. La puissance thermique requise est obtenue, ainsi que le montre la figure 6, par effet Joule dégagé dans une résistance électrique placée au coeur de la sphère. Cette résistance est alimentée par une source externe; le déroule-

ment des fils de connection est assuré par la présence d'une zone de parafine liquide au dessus de la sphère.

Après avoir déterminé expérimentalement la puissance critique, nous avons mesuré les vitesses d'enfouissement pour diverses valeurs du rapport  $Q/Q_{cr}$ . Les points expérimentaux ont été reportés sur la figure 1; on constate qu'ils se situent bien dans la plage délimitée par les courbes théoriques.

#### 7.4. Profondeurs d'enfouissement

Traduits sous forme de polynômes, les diagrammes de la figure 1 contiennent toutes les informations nécessaires pour le calcul des profondeurs d'enfouissement réalisables en fonction du rayon du récipient et de la densité de puissance initiale disponible.

Dans ce calcul, on a tenu compte de la décroissance dans le temps de la puissance thermique des déchets en procédant par intégration numérique sur des petits intervalles de temps pendant lesquels la vitesse d'enfouissement peut être considérée comme constante.

Les indications puisées dans une étude américaine récente (Réf. 2) ont permis d'exprimer la loi de décroissance de la puissance thermique des déchets sous la forme :

$$\frac{q(t)}{q(0)} = \frac{t_0}{t_0 + t} \quad \text{où } t_0 = 66 \text{ jours} \quad (10)$$

$q(0)$  et  $q(t)$  sont les densités de puissance initiale et instantanée ;  $t$  est le temps exprimé en jours.

Les profondeurs d'enfouissement ont été calculées dans l'hypothèse d'un sous-sol en granite :

$$k \cong 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ w/cm-}^\circ\text{C} ; \quad \alpha \cong 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec} ;$$

$$T_m = 1600^\circ\text{C}$$

ainsi que dans le cas du sel :

$$k \cong 6 \cdot 10^{-2} \text{w/cm-}^\circ\text{C} \quad ; \quad \alpha \cong 3,4 \cdot 10^{-2} \text{cm}^2/\text{sec} \quad ;$$

$$T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$$

Les figures 2 et 3 sont relatives au modèle à sphère isotherme, respectivement pour le sel et le granite. Elles donnent les profondeurs d'enfouissement en fonction du rayon du récipient et de la densité de puissance initiale des déchets. Les figures 4 et 5 s'interprètent de la même manière mais correspondent au modèle à flux thermique uniforme.

Etant donné que la diffusivité thermique du sel est supérieure à celle du granite, les vitesses d'enfouissement et, en conséquence, les profondeurs réalisables sont supérieures dans le cas du sel. Ceci bien que le produit  $k.T_m$  et par le fait même les puissances critiques soient légèrement inférieures pour le granite.

En ce qui concerne le comportement réel d'un récipient sphérique, on peut affirmer qu'il devrait se rapprocher beaucoup plus du modèle à sphère isotherme que du modèle à flux uniforme. La présence d'une enveloppe métallique constitue, en effet, un court-circuit thermique appelé à réduire considérablement le gradient circonférentiel de température à la surface du récipient.

Le sel apparaît comme extrêmement attrayant en vue d'une réalisation à grande échelle du processus d'auto enfouissement.

Le choix du sel n'est pas dû au hasard. D'une part, les géologues nous apprennent qu'il existe en Europe de nombreux dômes de sel ayant un diamètre de plusieurs kilomètres et une extension verticale de plus de 1000 mètres (Réf. 10). D'autre part, la température de fusion du sel est de 800°C, tandis que celle d'autres roches comme le granite est souvent supérieure à 1500°C. Il faut également signaler que les dômes de sel sont des structures géologiques intègres, c.a.d.

exemptes de failles ou autres défauts. Cette caractéristique est due à la propriété du sel d'être visqueux sous pression.

## 8. Réipients cylindriques

L'étude de l'enfouissement des réipients cylindriques comporte, comme pour la géométrie sphérique, trois phases essentielles :

- le calcul des puissances critiques;
- l'évaluation des vitesses d'enfouissement en fonction de la puissance disponible, de la géométrie et des caractéristiques du sous-sol;
- l'estimation des profondeurs d'enfouissement réalisables.

On a considéré uniquement le cas du cylindre disposé verticalement, c'est-à-dire ayant l'axe de révolution parallèle à la direction d'enfouissement.

On démontre aisément (voir annexe 2) que la puissance thermique minimum que doit dégager un réipient cylindrique de rayon R (cm) et de rapport hauteur/diamètre égal à l pour donner naissance au processus d'auto-enfouissement est fournie par la relation

$$Q_{cr}^c = 4 \pi R k T_m \cdot \frac{2l}{\log_e (2l + \sqrt{1 + 4l^2})} \quad (11)$$

Comparée à la relation (6), cette expression fait apparaître que la puissance critique du cylindre est égale à celle d'une sphère de même diamètre multipliée par un facteur de forme croissant avec la valeur du rapport l de la hauteur et du diamètre.

Les vitesses d'enfouissement résultant de la construction de diagrammes donnant le rapport  $Q/Q_{cr}^c$  (puissance effective/puissance critique) en fonction du paramètre Z défini en (9)

ainsi que du rapport  $\lambda$ . Seul le modèle isotherme a été retenu en vue d'approximer le comportement d'un cylindre réel.

Les profondeurs d'enfouissement réalisables ont été calculées en utilisant la loi de décroissance (10) de la densité de puissance des déchets.

Les figures 7, 8, et 9 donnent sous forme de courbes les résultats obtenus dans le granite pour des cylindres de rapport  $\lambda$  égal à 0,5, 1 et 2.

La figure 10 est relative à l'enfouissement dans le sel de cylindres de rapport  $\lambda = 0,5$  et 1.

### CONCLUSIONS

Une étude théorique préliminaire, confirmée par une expérience en laboratoire, a montré que le phénomène d'auto-enfouissement est une réalité.

Les densités de puissance à mettre en jeu sont d'un ordre de grandeur qui permet d'envisager l'exploitation d'un tel processus en vue du stockage définitif des résidus radioactifs de haute activité.

Le problème épineux de l'évacuation de la chaleur engendrée par la décroissance radioactive est résolu de manière élégante en utilisant cette chaleur comme élément moteur de l'enfouissement automatique. On en arrive même à souhaiter que les produits de fission accumulés sous forme solide ne soient ni trop "refroidis" ni trop dilués, en vue de réaliser avec des capsules de dimensions acceptables des profondeurs d'enfouissement significatives.

Il est, d'autre part, bien évident que nous ne prétendons pas avoir résolu par les quelques considérations développées dans ce travail tous les problèmes associés à la mise en oeuvre d'une technique d'élimination par auto-enfouissement des déchets de haute activité.

Nous avons simplement voulu indiquer une ligne de recherche qui se présente sous un aspect prometteur.

ANNEXE 1 : Estimation de la puissance thermique disponible dans les déchets

Une étude américaine récente (Réf. 2) donne des informations complètes sur la composition des effluents radioactifs, leur activité spécifique et le dégagement de chaleur. Ces estimations ont été faites sur la base d'un combustible type décrit à la table 3.6 du rapport mentionné et généralement choisi comme référence pour les installations de retraitement de l'avenir (Réf. 3).

Le réacteur de référence est à eau pressurisée et brûle de l' $UO_2$  enrichi à 3,3% en  $U^{235}$ . Il fonctionne à un niveau moyen de puissance de 34,8 Mw/tonne et réalise un taux de combustion de 33000 Mwd/tonne.

Les informations contenues dans la référence mentionnée permettent d'évaluer la puissance spécifique (w/gr) des produits de fission purs en fonction du temps écoulé depuis l'arrêt du réacteur. En admettant une densité moyenne de 8 gr/cm<sup>3</sup>, on obtient les puissances par unité de volume données dans le tableau suivant

Temps de refroidissement (jours)	Puissance spécifique (w/cm <sup>3</sup> )
90	6,0
150	4,4
365	2,2
3652	0,25

Lors des opérations de retraitement du combustible, les produits de fission sont accumulés sous forme de solutions aqueuses pour être, selon la tendance actuelle, concentrés ultérieurement dans une forme solide insoluble.

Il est clair que ces opérations chimiques ont pour effet de diluer les produits de fission dans une mesure variable selon les techniques utilisées. Par manque de données précises,

nous avons adopté des densités de puissance réduites d'un facteur 10 par rapport aux données du tableau précédent. Ceci conduit à la densité de puissance initiale maximum de  $0,6 \text{ w/cm}^3$  utilisée dans nos calculs d'enfouissement.

0

ANNEXE 2 : Puissance critique pour un cylindre disposé verticalement

Un cylindre de rayon  $R$ , de hauteur  $L$  et siège d'une puissance thermique  $Q$  est idéalisé par une source linéique disposée selon l'axe et d'intensité par unité de longueur  $q = Q/L$  (Fig. 11).

Dans l'hypothèse où la source ainsi définie se déplace à la vitesse  $U$  et en se référant aux notations de la figure 10, la température au point  $x = 0$ ,  $y = R$  due à un élément de source  $q \, dx$  vaut

$$dT = \frac{q \, dx}{4 \pi k \sqrt{x^2 + R^2}} \exp \left\{ -\frac{U}{2\alpha} (x + \sqrt{x^2 + R^2}) \right\} \quad (A1)$$

$k$  et  $\alpha$  représentent respectivement la conductivité et la diffusivité du sol.

L'expression (A1) résulte de la solution en symétrie sphérique de l'équation (2) autour d'un monopôle  $q \, dx$ .

L'intégration de cette expression de  $x = 0$  à  $x = L$  fournit une température qui doit être égale à la température de fusion  $T_m$  du sol, soit

$$T_m = \frac{Q/2l}{4 \pi k R} \int_0^{2l} \frac{\exp -Z (\eta + \sqrt{1 + \eta^2})}{\sqrt{1 + \eta^2}} \, d\eta \quad (A2)$$

où  $l = L/2R$  ;  $Z = U.R/2\alpha$  ;  $\eta = x/R$ .

La relation (A2) fournit dans l'hypothèse d'une source linéique la vitesse d'enfouissement en fonction de la puissance  $Q$  disponible et de la géométrie du cylindre. En y posant  $U = 0$ , on obtient après intégration la puissance critique du cylindre sous forme

$$Q_{cr}^c = 4 \pi R k T_m \cdot \frac{2l}{\log_e(2l + \sqrt{1+4l^2})} \quad (A3)$$

REFERENCES

- 1) Gaston Grison : "Per la creazione di strutture comunitarie in materia di deposito definitivo dei residui radioattivi",  
Euro-Spectra, Settembre 1971, p. 91.
- 2) "Siting of fuel reprocessing plants and waste management facilities"  
Report compiled and edited by the Staff of the Oak Ridge National Laboratory, ORNL-4451, July 1971.
- 3) E. Dutilleux, Eurochemic, Mol (Belgique), communications personnelles.  
(Nous remercions vivement M. Dutilleux pour l'intérêt qu'il a bien voulu manifester à l'égard de notre travail, ainsi que pour les indications précieuses qu'il nous a fournies).
- 4) C.R. Easton : "Conduction from a finite-size moving heat source applied to radioisotope capsule self-burial",  
pp. 209-218 of Thermal Conductivity, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1968.
- 5) G. De Beni, C. Marchetti : "L'idrogeno, chiave del mercato energetico",  
Euro-Spectra, Giugno 1970, p. 46.  
C. Marchetti : "L'idrogeno, "passe-partout" del mercato energetico",  
Euro-Spectra, Dicembre 1971, p. 117.  
(Ces articles montrent comment l'énergie nucléaire peut couvrir, non seulement les besoins en électricité, mais la majeure partie du marché énergétique).

- 6) W.E. Kortier et al. , "A random intact reentry and earth burial study for radioisotope thermoelectric generators", Battelle Memorial Institute, Columbus Laboratories.
- 7) P.J. Schneider : Conduction Heat Transfer, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 1957.
- 8) O.C. Zienkiewicz, J.K. Cheung : The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, Mc Graw-Hill, 1967, Chapter 10.
- 9) J. Donea, S. Giuliani : "Code Tafe, Analyse numérique de problèmes thermiques en présence de rayonnement et de conductivités variables avec la température, Rapport EUR en cours de publication.
- 10) H. Krause et al.: "Projet for storing radioactive wastes in a salt cavity", Proceedings of a Symposium Jointly organized by the IAEA and ENEA on Disposal of Radioactive Wastes into the Ground , Vienna 29 May-2 June 1967. Ed. by International Atomic Energy Agency.

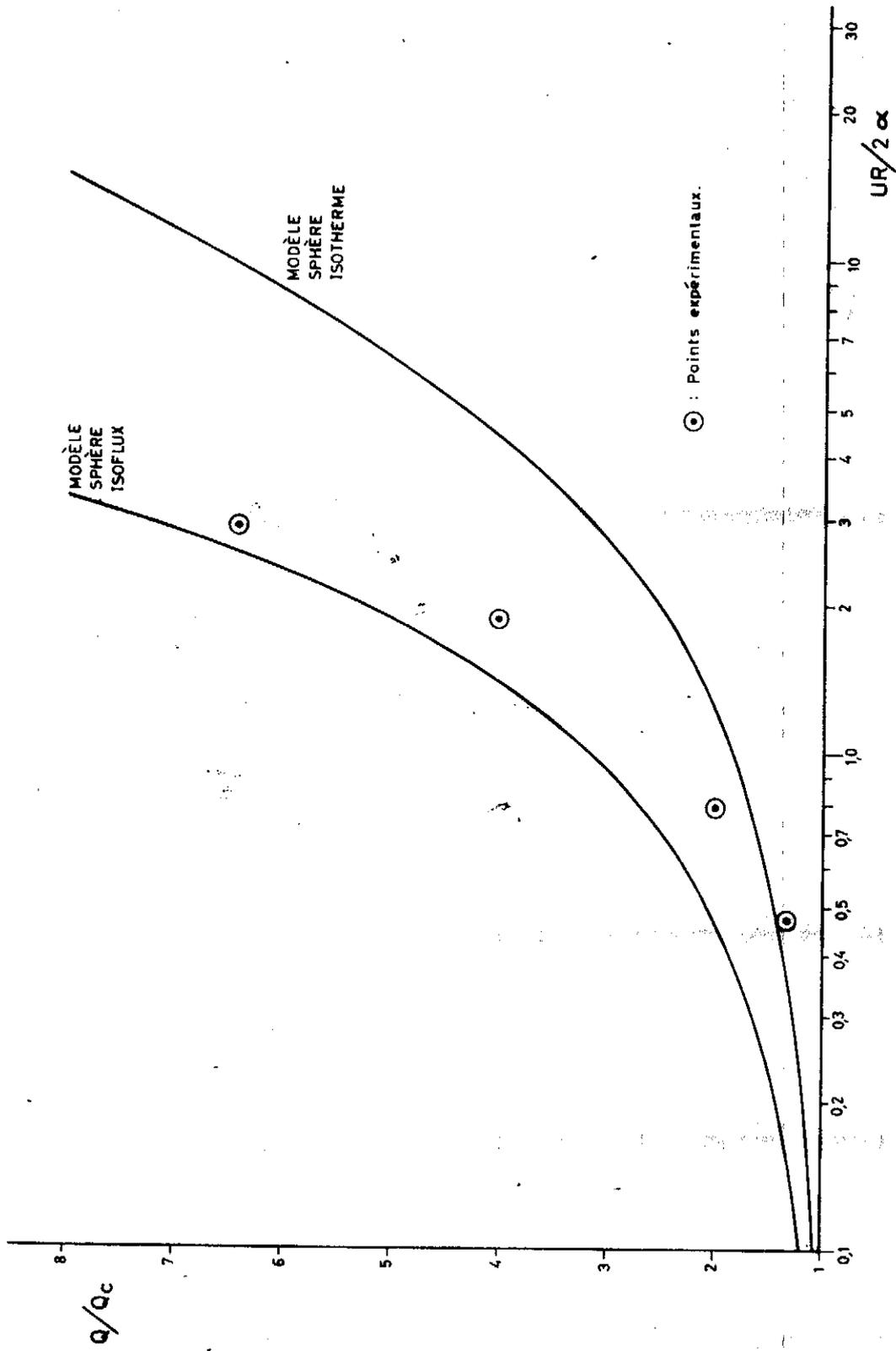


Fig. 1

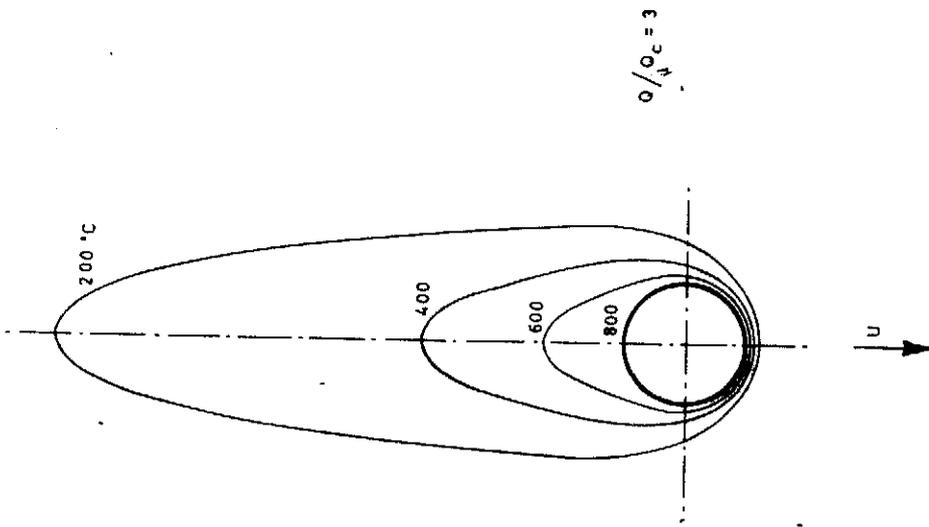


Fig. 1b Réseau d'isothermes autour d'une sphère isotherme en mouvement.

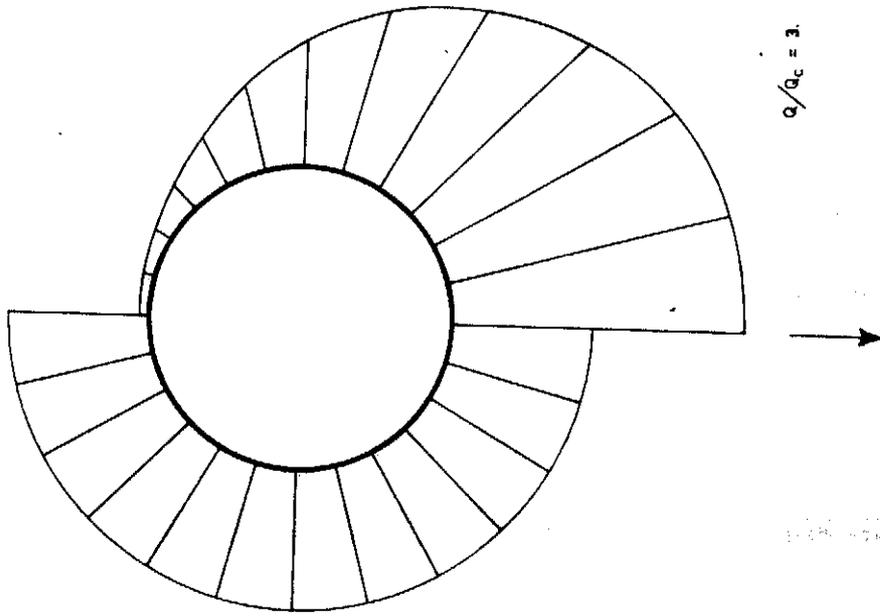


Fig. 1a Sphère isotherme et à flux uniforme : illustration de la répartition du flux thermique superficiel.

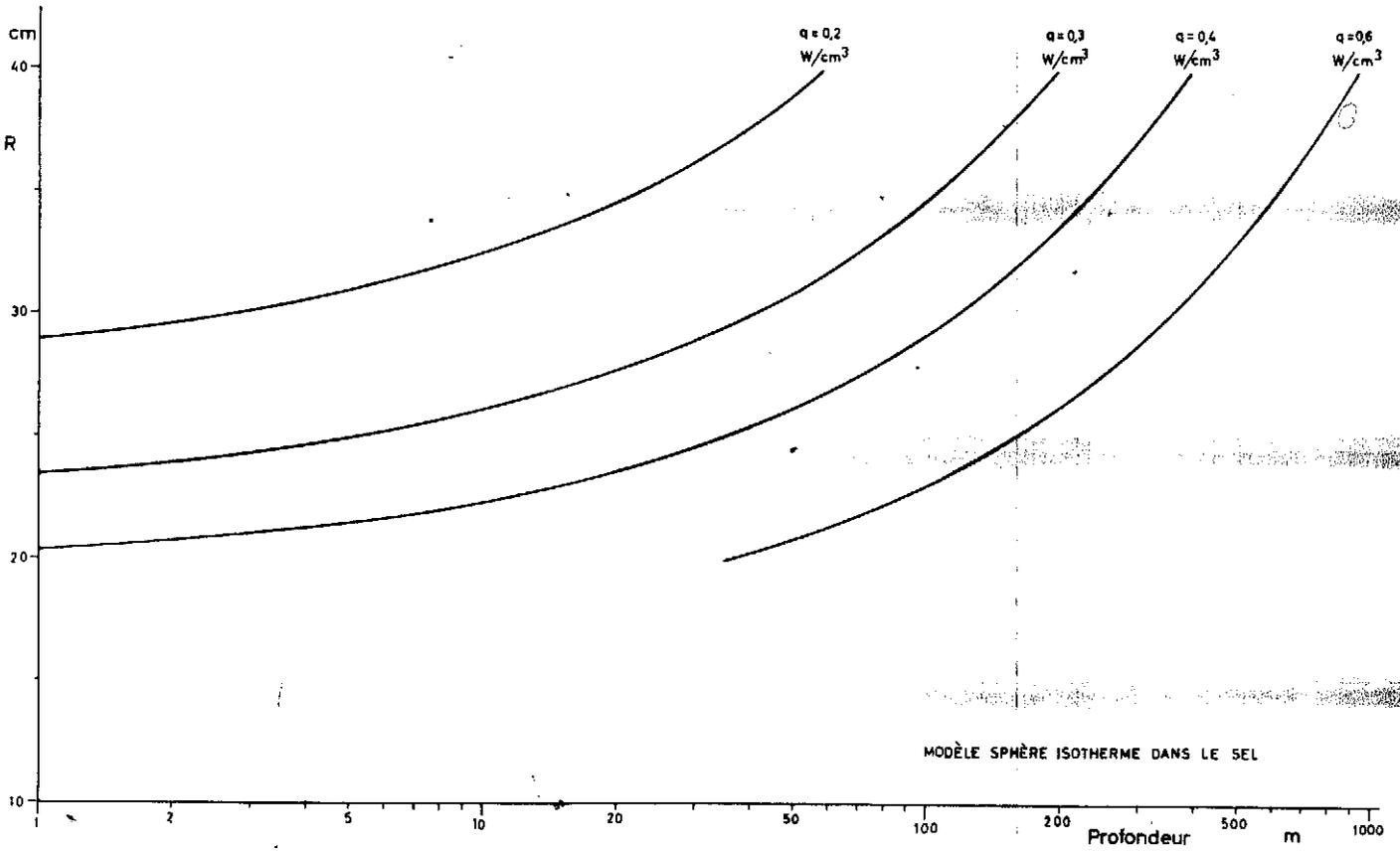


Fig. 2

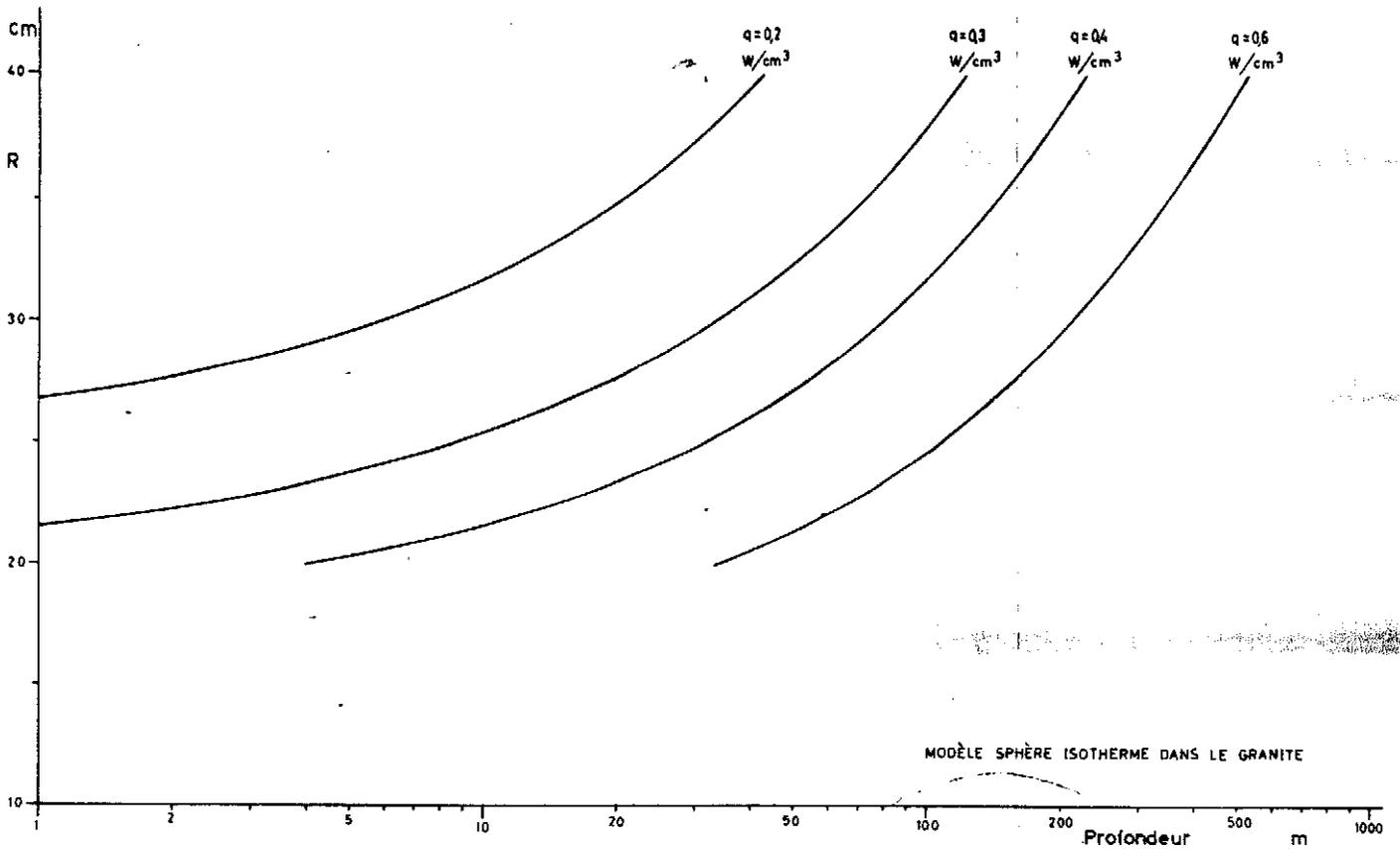


Fig. 3

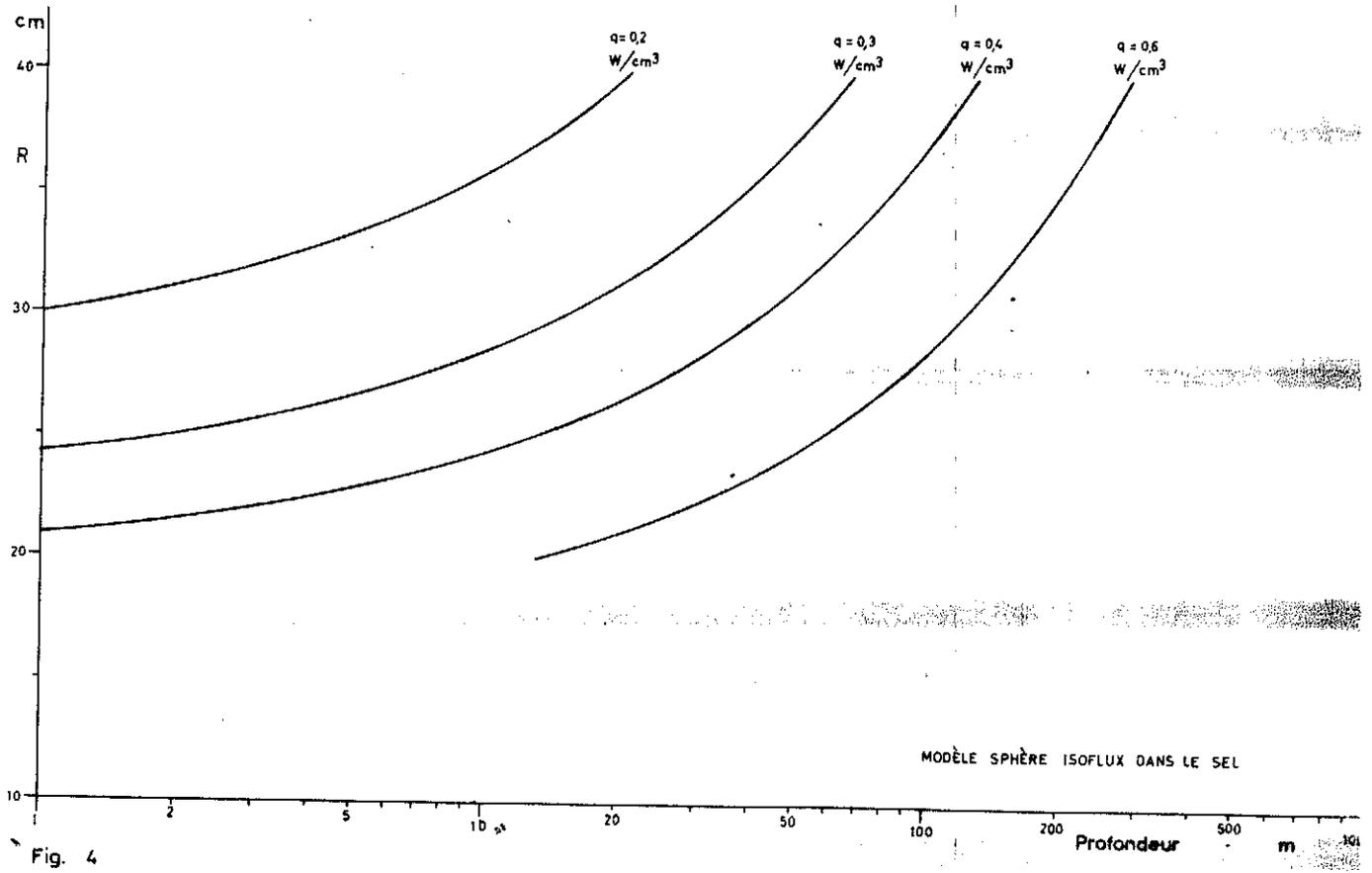


Fig. 4

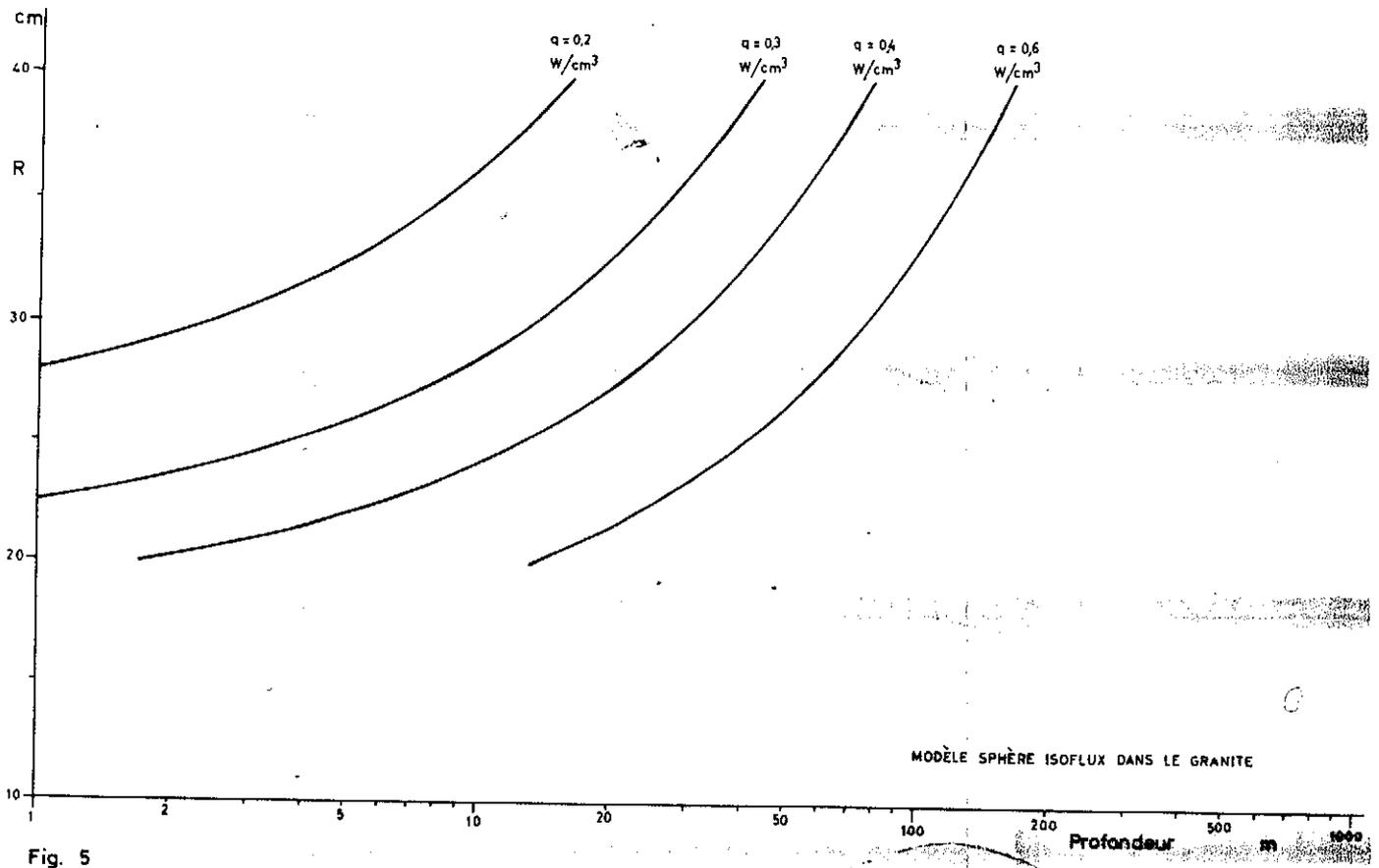


Fig. 5



Fig. 6 : Dispositif expérimental : Enfouissement d'une sphère en acier dans de la parafine.

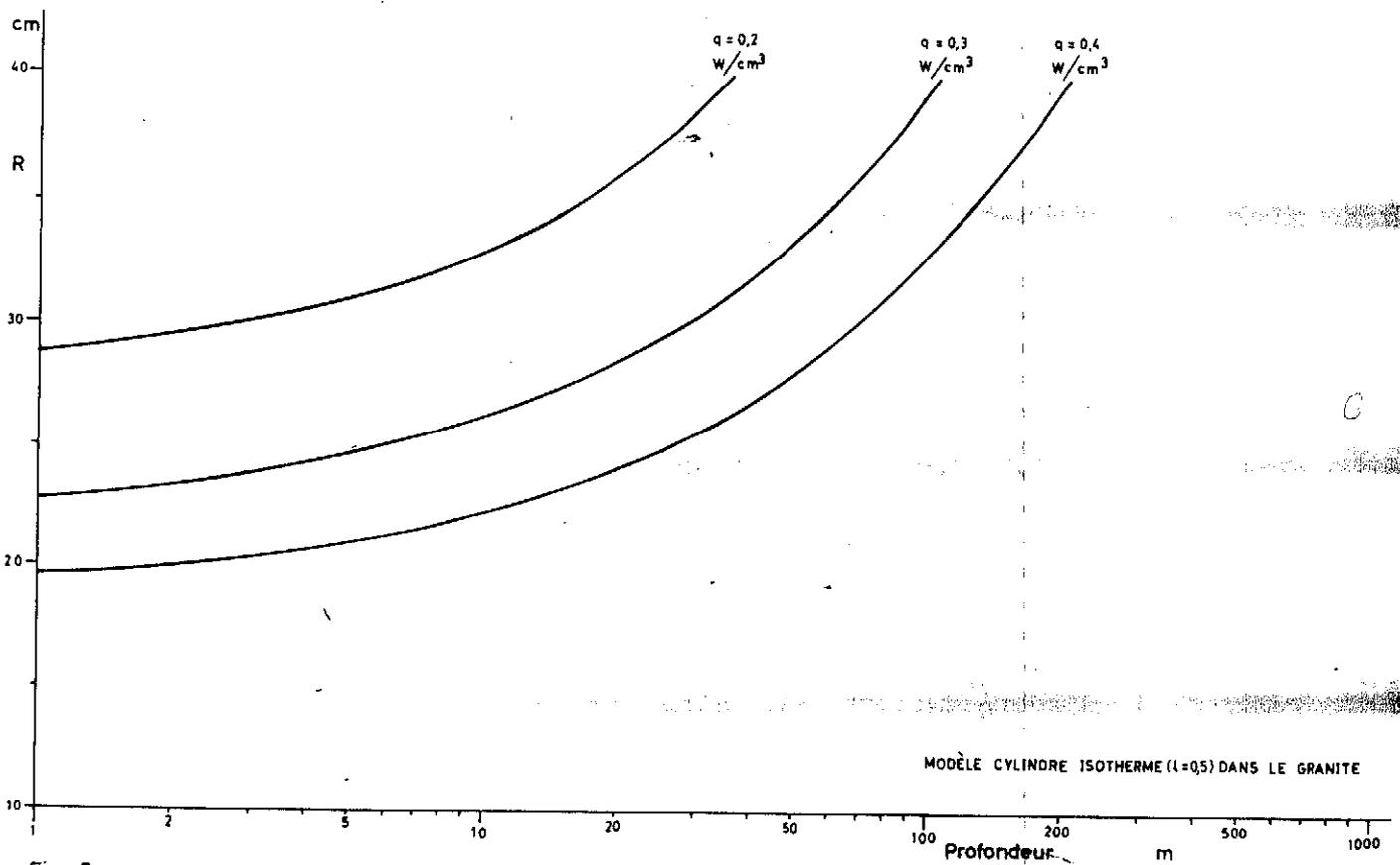


Fig. 7

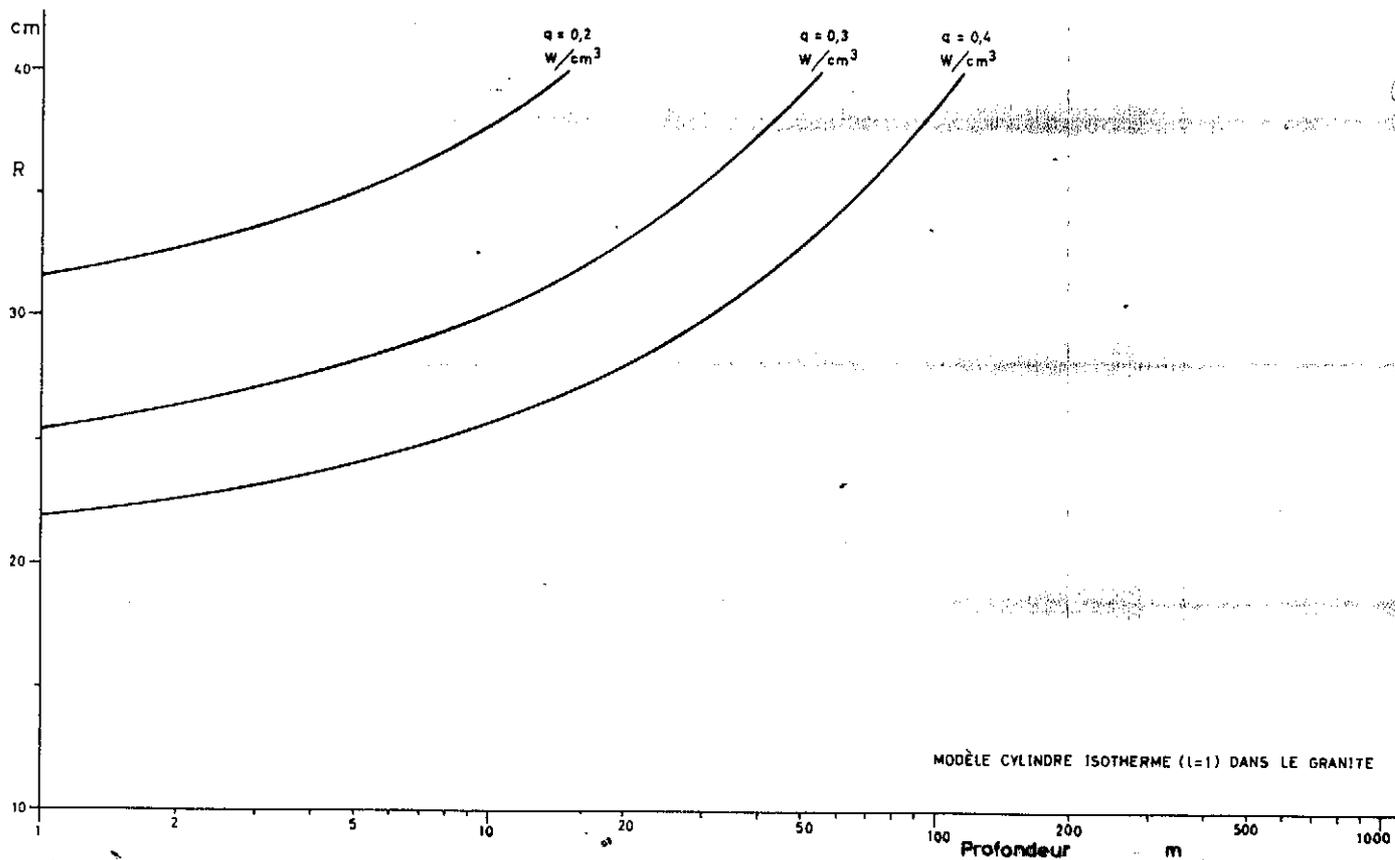


Fig. 8

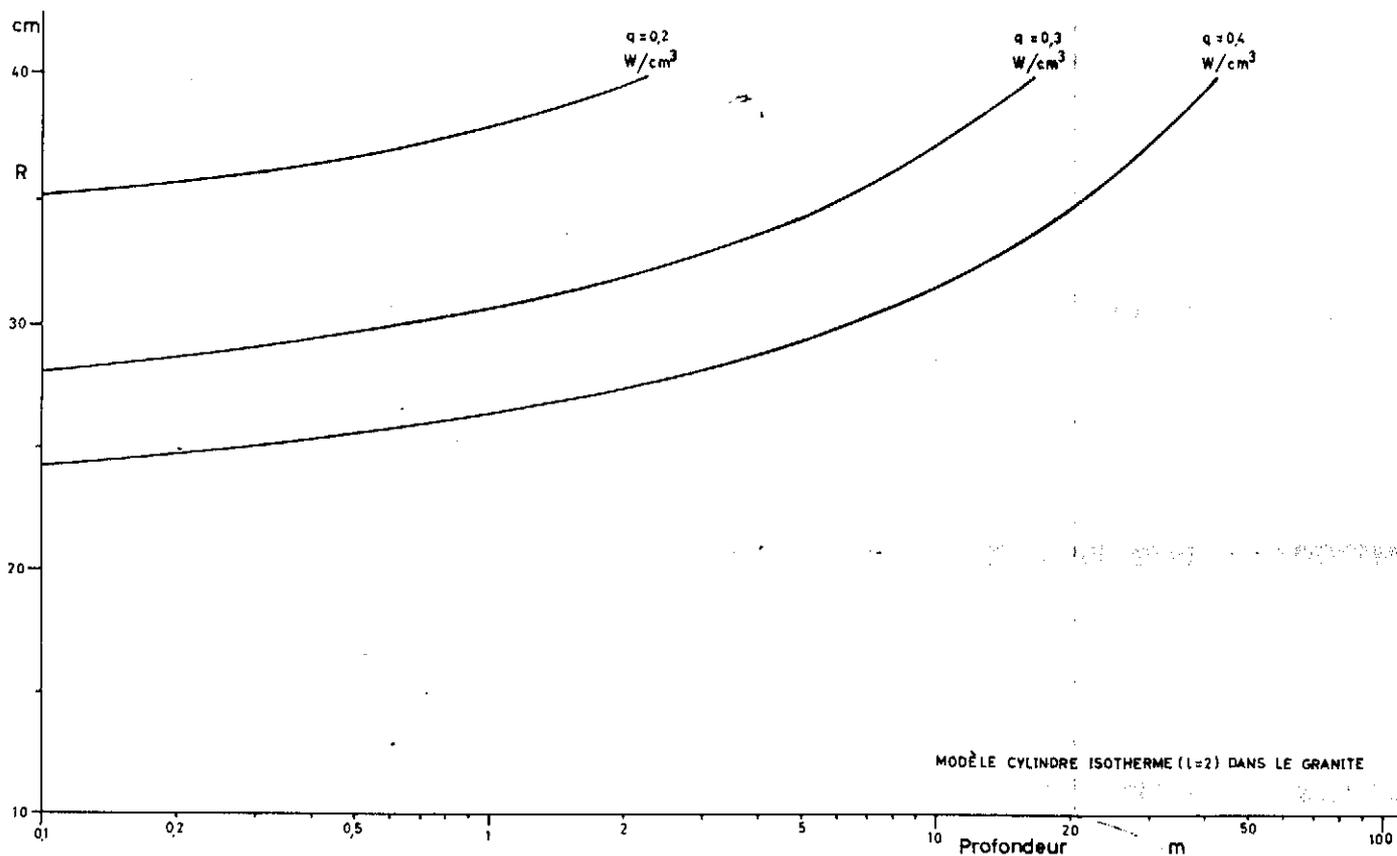


Fig. 9

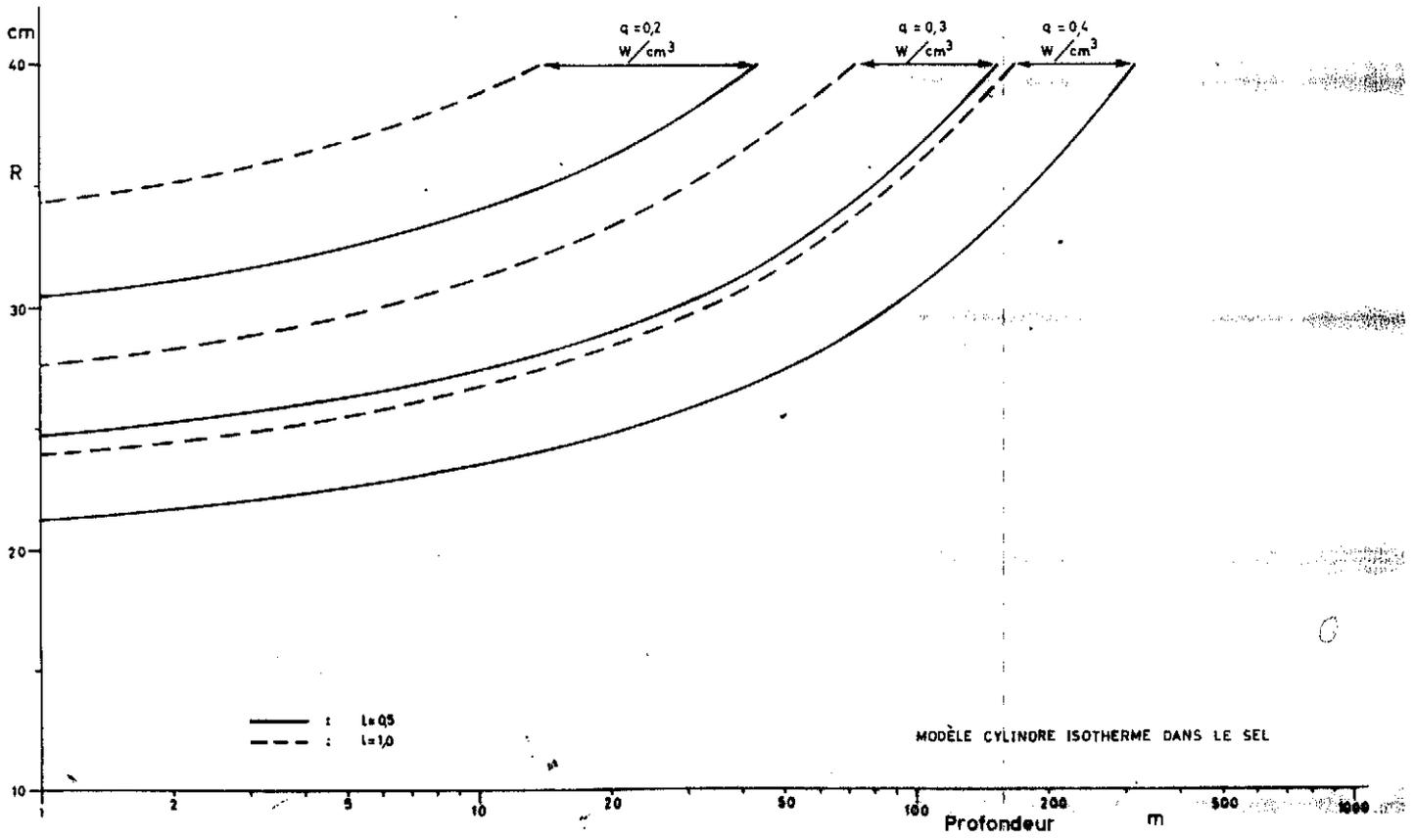


Fig. 10

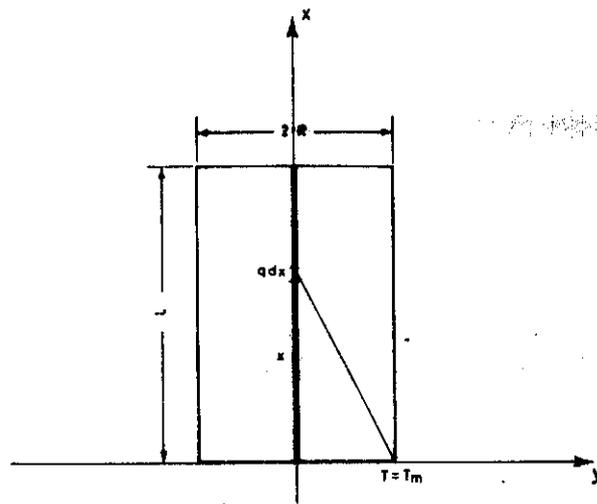


Fig. 11