

PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

**SEPARATION DES ISOTOPES DU CALCIUM
PAR ELECTRO-MIGRATION
A CONTRE-COURANT EN SELS FONDUS**

par

F. MENES, G. DIRIAN, E. ROTH

Rapport CEA N° 2119

**CENTRE D'ETUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY**

CEA 2119 - MENES P. , DIRIAN G. , ROTH E.

SEPARATION DES ISOTOPES DU CALCIUM PAR ELECTRO-MIGRATION
A CONTRE-COURANT EN SELS FONDUS (1962).

Sommaire. - La méthode d'électro-migration à contre-courant en sels fondus a été appliquée au bromure de calcium additionné dans le compartiment cathodique d'un bromure alcalin.

On a pu ainsi obtenir avec sûreté des enrichissements anodiques supérieurs à 2 sur l'isotope 46, déterminer l'effet de masse (environ 0,06) et faire une estimation sommaire du coût énergétique d'un procédé basé sur cette méthode.

CEA 2119 - MENES P. , DIRIAN G. , ROTH E.

SEPARATION OF CALCIUM ISOTOPES BY COUNTER-CURRENT ELECTRO-
MIGRATION IN MOLTEN SALTS (1962).

Summary. - The method of counter-current electromigration in molten salts has been applied to calcium bromide with an alkali metal bromide added to the cathode compartment. Enrichments on calcium-46 greater than a factor of two were obtained at the anode. The mass effect was found to be about 0,06. An estimation of the cost of energy for a process based on this method has been made.

- Rapport C.E.A. n° 2119 -

Service des Isotopes Stables

SEPARATION DES ISOTOPES DU CALCIUM
PAR ELECTRO-MIGRATION
A CONTRE-COURANT EN SELS FONDUS

par

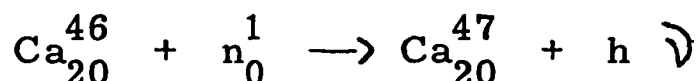
F. MENES, G. DIRIAN, E. ROTH

(Rapport DPC/IS/SCI/61-257 du 3.7.1961)

SEPARATION DES ISOTOPES DU CALCIUM PAR ELECTRO-MIGRATION A CONTRE-COURANT EN SELS FONDUS ¹⁾

L'isotope 47 de l'élément calcium est instable et se désintègre avec une période voisine de cinq jours, en émettant un rayonnement β d'énergie 2 MeV et un rayonnement γ d'énergie 1,3 MeV ; ceci le rend particulièrement intéressant pour les recherches médicales et biologiques.

On l'obtient, entre autres méthodes possibles, à partir de l'isotope stable 46 par une réaction n, γ :



Malheureusement le calcium 46 n'existe qu'à l'état de traces dans le calcium naturel : sa concentration y est d'environ $3 \cdot 10^{-5}$. Dans ces conditions, l'obtention de cet isotope par séparation électromagnétique est très onéreuse. Par ailleurs, il est pratiquement impossible de l'obtenir à l'état pur par un procédé physico-chimique.

1)

Cette recherche a été entreprise avec la participation financière de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique et de l'United States Atomic Energy Commission.

On a donc suggéré d'effectuer la séparation en deux étapes. La première consisterait à enrichir faiblement le calcium naturel par voie physico-chimique. Le fractionnement final se ferait ensuite par voie électromagnétique sur le produit pré-enrichi.

En ce qui concerne l'enrichissement des isotopes du calcium, les plus anciennes tentatives sont celles de EIDINOFF [1], qui a suggéré l'utilisation de l'isotope 45 comme traceur pour l'étude de l'effet isotopique par échange d'ions. En 1954, LINDNER [2] a obtenu par cette méthode des facteurs d'enrichissement d'environ 4,4 sur des quantités de l'ordre du milligramme.

Tout récemment, ZUCKER [3] a étudié l'échange chimique entre un amalgame de calcium et une solution aqueuse de formiate de calcium ; le facteur de séparation est d'environ 1,001 par unité de différence de masse.

Nous avons tenté une série d'expériences destinées à étudier l'enrichissement des isotopes du calcium par la méthode d'électromigration à contre-courant, plus particulièrement en vue de l'enrichissement en calcium 46.

Ce procédé, mis au point par KLEMM, a été appliqué avec succès à la séparation des isotopes de nombreux éléments et a fait l'objet de nombreuses publications. Pour le principe de la méthode, on se reportera à l'intéressant ouvrage de LUNDEN "Isotope Enrichment by Counter current electromigration in molten salts" [4]. Nous avons mis en oeuvre ce procédé en utilisant comme électrolyte le bromure de calcium pour les raisons exposées plus loin.

I. APPAREILLAGE

La cellule d'électromigration, en verre de silice transparent, est un tube à nombre de transports constitué par deux réservoirs séparés par un diaphragme en alumine ou en sable de zircon.

Notre intérêt s'est porté sur la composition isotopique du compartiment anodique, puisque l'enrichissement en isotopes lourds les moins mobiles était le but de notre étude. Le volume du compartiment cathodique, constituant la réserve de sel dont la teneur isotopique ne doit pas varier sensiblement, a été choisi dix fois supérieur à celui du compartiment anodique. Nous n'avons pu dépasser cette valeur pour des raisons d'encombrement.

Les électrodes sont en graphite ; à la température où se fait l'expérience, il existe peu de substances capables de résister à l'action corrosive du brome.

La cellule d'électrolyse est disposée dans un four électrique transparent, qui permet d'atteindre la température de fusion du bromure de calcium, soit 765 °C.

Le contre-courant de sel de calcium est assuré par une circulation permanente de brome dans le compartiment cathodique. Dans les premières expériences, l'introduction de l'halogène s'effectuait par un tube latéral (fig. 1, a) qui débouchait en dessous du niveau du liquide. Dans une seconde version, le brome pénétrait dans le compartiment après passage à travers la cathode elle-même (fig. 1, b). Le gaz qui s'échappe par les orifices percés à la base de la cathode (fig. 2) se dissout en partie dans le bain. L'excès de brome quitte le compartiment cathodique et se condense dans un récipient qui communique avec une ampoule chauffée. Le liquide est vaporisé dans cette dernière et renvoyé vers la cathode. Le brome provenant du compartiment anodique est renvoyé dans le même circuit.

Le fonctionnement de l'appareil est contrôlé par un système de sécurité. En effet, si le contre-courant ne s'effectue plus par suite de l'arrêt de la circulation de brome ou même par l'insuffisance

du débit d'halogène, il apparaît un dépôt de métal dans le compartiment cathodique (voir ci-dessous : expérimentation). Les parois de la cellule de silice sont alors attaquées. Par ailleurs, lors de la reprise éventuelle de la circulation d'halogène, l'action violente du brome sur une quantité notable de métal peut provoquer la destruction brutale de l'appareil.

Il est donc souhaitable de contrôler périodiquement l'absence de métal dans le compartiment cathodique. Dans ce but, l'électrolyse est réalisée pendant un certain laps de temps, au bout duquel le courant est interrompu. Un appareil de mesure contrôle la différence de potentiel entre les électrodes. S'il y a eu formation de métal au voisinage de la cathode, cette différence de potentiel est égale à la force électro-motrice de la chaîne galvanique



qui est de l'ordre de 2,5 volts. Le courant d'électrolyse, asservi à cette tension, est interrompu durant tout le temps nécessaire à la dépolarisation de la cathode. L'électrolyse recommence lorsque la différence de potentiel entre les électrodes est devenue de nouveau très faible par suite du barbotage de brome.

Toutes ces opérations s'effectuent automatiquement par l'intermédiaire d'un système de relais, dont le principe est analogue à celui décrit par M. CHEMLA [5].

II. EXPERIMENTATION

Conformément aux considérations théoriques développées par KLEMM [6], selon lesquelles l'effet de masse en sels fondus est d'autant plus important que l'anion associé est moins mobile, il est a

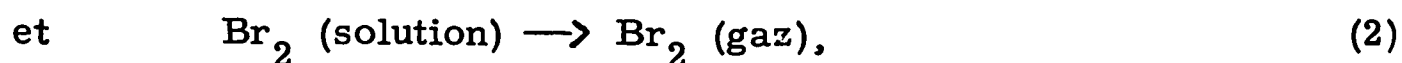
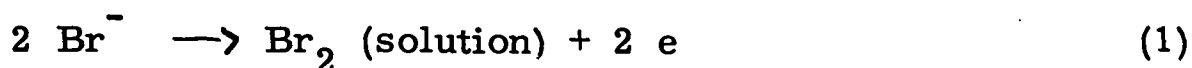
priori préférable d'utiliser un sel de calcium correspondant à un anion qui soit le plus lourd possible, pour avoir l'effet maximum. Par ailleurs il est souhaitable que le composé utilisé soit stable et qu'il présente une conductivité électrique suffisamment grande. Le contre-courant doit pouvoir être effectué dans les conditions de l'expérience par action directe des produits provenant de la décharge de l'anion sur le métal déposé par électrolyse, faute de quoi l'appareillage serait plus complexe.

Pour toutes ces raisons, notre choix s'est porté sur les halogénures ; parmi ceux-ci le bromure est le plus facile à mettre en oeuvre.

Malheureusement, nous avons constaté que le contre-courant ne s'effectuait pas dans de bonnes conditions lorsqu'on utilisait ce composé à l'état pur : il est impossible d'atteindre les fortes densités de courant nécessaires à un enrichissement important. Par contre, si l'on utilise dans le compartiment cathodique un mélange composé de bromure de calcium et d'un bromure alcalin, le contre-courant s'effectue dans de bien meilleures conditions ; il devient possible alors d'admettre des densités de courant plus élevées et par suite d'atteindre un enrichissement plus grand.

Pour expliquer ce comportement, il faut considérer la cinétique des réactions pouvant se produire aux électrodes.

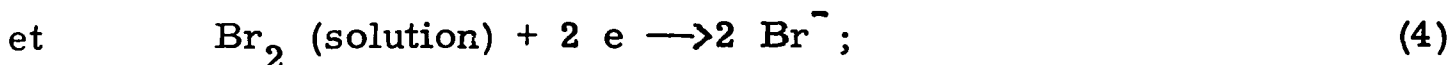
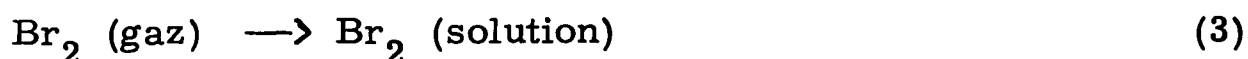
A l'anode, la seule réaction possible est l'oxydation des ions Br^- . Les deux réactions consécutives, qui s'écrivent schématiquement



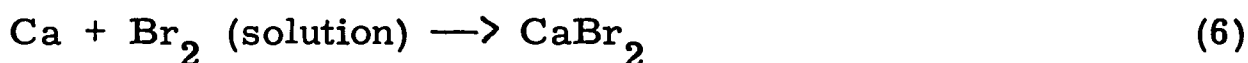
conduisent globalement à un dégagement de brome.

A la cathode, où il y a un apport continu de brome gazeux, plusieurs réactions peuvent se produire suivant le cas :

a) formation d'ions Br^- à partir du brome gazeux, schématiquement représentée par les deux réactions consécutives



b) décharge des ions Ca^{++} et neutralisation consécutive par le brome :



ou



Il est connu que le potentiel de dépôt du calcium (réaction 5) est très inférieur au potentiel normal d'oxydo-réduction du système Br_2/Br^- [7] [8] [9]. C'est donc la réaction (4) seule qui se produit en général, à condition que la dissolution du brome (étape 3) soit assez rapide pour que sa concentration en solution reste suffisante ; ceci est réalisable d'autant plus facilement que la consommation de brome par la réaction (4) est plus petite, c'est-à-dire l'intensité plus faible. Dans ces conditions, on a affaire en première approximation à deux électrodes réversibles identiques - les surtensions étant probablement très faibles - et la caractéristique $I = f(V)$ est une droite passant très près de l'origine (fig. 3, portion a de la courbe). Une interruption brusque du courant d'électrolyse ne laisse aucune polarisation résiduelle de la cathode.

Si au contraire l'intensité du courant est grande - ou la vitesse de l'étape 3 faible - la concentration de brome en solution diminue et le potentiel d'oxydo-réduction du système Br_2/Br^- décroît, conformément

à la relation de NERNST. On peut alors atteindre le potentiel de dépôt du calcium et produire la réaction (5) ; celle-ci est suivie d'une neutralisation du calcium métallique soit par le brome en solution - en concentration visiblement très faible - soit par le brome gazeux. La caractéristique $I = f(V)$ ne passe alors plus par l'origine (fig. 3, portion b de la courbe) ; une rupture brusque du courant d'électrolyse fait apparaître une polarisation cathodique de l'ordre de 2,5 volts, dont la disparition est lente et s'accompagne d'une coloration progressive du liquide cathodique due à la dissolution du brome.

Dans ces conditions, l'action favorable d'une certaine quantité d'un bromure alcalin dans le compartiment cathodique, permettant d'atteindre des intensités beaucoup plus fortes sans que les ions métalliques ne se déchargent, peut s'expliquer par l'accroissement de la solubilité du brome dans le sel fondu, et donc de sa vitesse de dissolution.

Ceci est visiblement le cas pour autant que la coloration de la solution soit un indice valable de la vitesse de dissolution.

Nous avons toujours utilisé dans le compartiment cathodique un mélange de bromure de calcium et d'un bromure alcalin. Toutefois, il est nécessaire que l'ion alcalin ait une mobilité nettement plus grande que l'ion Ca^{++} afin d'éviter sa migration dans le compartiment anodique. Il est d'ailleurs indifférent, dans ces conditions, que le bromure alcalin soit ajouté dans le compartiment cathodique ou que la même quantité soit mélangée à l'origine au bain de la cellule entière ; de toute manière, la migration du métal alcalin vers la cathode est très rapide. Notre choix s'est porté sur le bromure de potassium, mais nous avons vérifié que le bromure de lithium était aussi satisfaisant.

La température du bain doit être évidemment supérieure au point de fusion du bromure de calcium, constituant unique du compartiment anodique (765 °C).

L'analyse isotopique des échantillons a été faite par spectrométrie de masse ²⁾ pour les isotopes 44, 46 et 48. Pour certaines expériences, on a ajouté préalablement une petite quantité de calcium-45 ; l'enrichissement pour cet isotope a été déterminé par comptage β , par la méthode de la "couche épaisse".

III. RESULTATS

Dans les trois expériences ci-dessous, la cellule était chargée dès l'origine avec un mélange $\text{CaBr}_2 + \text{KBr}$ à 50 pour cent dans les deux compartiments.

1ère expérience

L'électromigration a été effectuée pendant 98 jours ; l'intensité du courant était égale à 0,4 A. et la tension d'électrolyse à 14 volts. Au bout de quelques jours, le compartiment anodique ne contenait plus que CaBr_2 pur, tout le potassium ayant migré vers le compartiment cathodique. Le tableau I indique l'évolution du rapport $\frac{\text{K}}{\text{Ca}}$ dans le compartiment anodique.

Le tableau II et la figure 4 montrent l'évolution de la composition isotopique en fonction du temps. La variation de la composition isotopique dans le diaphragme en fin d'expérience est représentée dans le tableau III et la figure 5.

La chute brutale dans la courbe d'enrichissement n'a pu trouver d'explication satisfaisante. Nous avons tendance à attribuer cette anomalie à une oscillation accidentelle des niveaux liquides dans la cellule, qui aurait provoqué des remélanges entre les compartiments.

²⁾ Analyses faites à la Section de Spectrométrie de Masse, CEN-Saclay

2ème expérience

L'électromigration a été réalisée pendant 49 jours ; l'intensité de courant atteinte en régime était voisine de 1 A, la tension entre les électrodes 37 volts. Le calcium avait été marqué en calcium-45.

Les résultats obtenus sont indiqués dans les tableau IV et V et dans les figures 6 et 7.

Le facteur de séparation entre les compartiments extrêmes atteint 2,2 pour le ^{44}Ca et 4,1 pour le ^{48}Ca . De plus, l'enrichissement en ^{46}Ca a pu être mis en évidence.

3ème expérience

L'expérience a été conduite durant trois semaines ; l'intensité du courant était égale à 2,7 A, la tension entre les électrodes 78 volts. La neutralisation cathodique s'effectuait dans d'excellentes conditions, comme le montre la caractéristique $I = f(V)$ représentée sur la figure 8.

Les résultats sont indiqués dans les tableaux VI et VII et dans les figures 9 et 10.

Le facteur de séparation entre les compartiments extrêmes atteint 2,1 pour le ^{44}Ca et 3,4 pour le ^{48}Ca .

IV. DISCUSSION

Le facteur d'enrichissement doit être exprimé en toute rigueur par le quotient des rapports d'abondance entre les deux compartiments. Nous l'avons exprimé par rapport à la teneur isotopique du produit de départ, car le prélèvement d'échantillons dans le compartiment cathodique présentait des difficultés expérimentales.

La théorie simplifiée du phénomène, négligeant le volume du diaphragme et la diffusion en phase liquide, montre que ce facteur

croît en fonction exponentielle du temps dans le cas d'un mélange binaire et lorsque le rapport des volumes des compartiments terminaux est infini. Les résultats obtenus montrent que les facteurs d'enrichissement croissent à peu près linéairement en début d'expérience, puis tendent assez rapidement vers une limite. Ceci est dû au fait que le rapport des volumes des réservoirs terminaux n'est pas très élevé et le transport d'isotopes lourds vers l'anode provoque un net appauvrissement du réservoir cathodique. Cet effet était d'autant plus prononcé dans nos expériences que nous cherchions à enrichir les isotopes lourds de concentration initiale faible.

La pente à l'origine de la courbe représentant la variation du facteur d'enrichissement en fonction du-temps permet d'évaluer l'effet de masse μ^+ sur les ions calcium. Pour les expériences 2 et 3, nous avons trouvé :

$$\mu^+ = - 0,060$$

La formule indiquée par KLEMM,

$$\mu^+ = - 0,15 \left(1 + \frac{m^+}{2,1 m^-} \right)^{-1},$$

où m^+ et m^- sont les masses respectives du cation et de l'anion, laisserait prévoir un effet de masse de 0,120, soit le double de la valeur obtenue ici.

Mais la valeur calculée d'après les expériences 2 et 3 ne peut être considérée que comme une approximation assez grossière. En effet, nous ne sommes pas dans les conditions simples citées plus haut - en particulier le volume du diaphragme est loin d'être négligeable - et par ailleurs la mesure de la quantité de sel contenu dans le compartiment anodique est très imprécise. Elle varie d'ailleurs au cours du temps par suite de l'évaporation du sel.

Quant au coût de revient d'un pré-enrichissement en calcium basé sur cette méthode, il peut être évalué en première approximation, compte tenu de l'énergie électrique consommée pour l'électrolyse seule et perdue sous forme calorifique ; les autres frais sont évidemment difficiles à prévoir pour une réalisation industrielle future. Cette dépense d'énergie serait de l'ordre de 25 kWh par gramme de calcium enrichi d'un facteur 2 en isotope 46. Elle est très élevée dans l'absolu, mais relativement faible compte tenu de l'économie que permet de réaliser ce pré-enrichissement sur la séparation finale.

De plus, des améliorations sont possibles, dans le sens d'une économie, lors d'une industrialisation du procédé. La méthode d'électromigration à contre-courant en sels fondus semble donc très prometteuse pour l'enrichissement en calcium 46.

Manuscrit reçu le 26 janvier 1962.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] EIDINOFF M.L.
J. Chem. Phys. 1947, 15, 527.
- [2] LINDNER R.
Z. Naturforsch. 1954, 9 A, 798.
- [3] ZUCKER D.
O.R.N.L., 2983, UC 4, 22 sept. 1960, p. 21.
- [4] LUNDEN A.
"Isotope enrichment by counter current electromigration in molten salts",
Thèse Goteborg 1956.
- [5] CHEMLA M.
Brevet français, demande n° PV 791.228 du 3 avril 1959 - Brevatome.
- [6] KLEMM
J. Chimie Physique, juin 1952, 49, 6.
- [7] LAITINEN H.A., LIU C.H.
J. Am. Chem. Soc. 1958, 80, 1015.
- [8] LAITINEN H.A., PANKEY J.W.
J. Am. Chem. Soc., 1959, 81, 1053.
- [9] PANKEY J.W.
Ph. D. Thesis, Université d'Illinois, 1958.

TABLEAU I

lère expérience

Evolution du rapport $\frac{K}{Ca}$ dans le compartiment anodique en fonction du temps

Numéro de l'échantillon	Durée du fonctionnement (J.)	Rapport $\frac{K}{Ca}$ (pondéral)
1	3 jours	0,25 \pm 0,05
2	4	0,20 \pm 0,04
3	11	0,04 \pm 0,005
5	21	0,015 \pm 0,01
6	31	0,012 \pm 0,002
8	45	0,024 \pm 0,004
10	60	0,011 \pm 0,004
11	74	< 0,007

TABLEAU II

1ère expérience

Diaphragme d'alumine

Longueur de la colonne : 20 centimètres

Diamètre de la colonne : 17 millimètres

Intensité de courant : 0,4 A

Volume du compartiment anodique : 3 cm³ en début d'expérience

Volume du compartiment cathodique : 30 cm³

Evolution de la composition isotopique dans le compartiment anodique en

fonction du temps

Numéro de l'échantillon	Durée de fonctionnement (jours)	Ca ⁴⁴ /Ca ⁴⁰ x 100	Ca ⁴⁸ /Ca ⁴⁰ x 100
1	3	2,16 ± 0,02	
2	4	2,17 "	0,196 ± 0,002
3	11	2,19 "	
4	17	2,22 "	0,204
5	21	2,22 "	
6	31	2,29 "	
7	38	2,35 "	
8	45	2,40 "	
9	49	2,43 "	
10	60	2,41 "	
11	74	2,45 "	0,252 ± 0,002
12	93	2,63 ± 0,015	0,278 ± 0,005
13	98	2,61 "	0,279 ± 0,005
Composition isotopique du compartiment cathodique en fin d'expérience			
	98	1,70 ± 0,01	0,123 ± 0,002

TABLEAU III

1ère expérience

Répartition du Ca⁴⁴ le long du diaphragme en fin d'expérience

Numéro de la zone	Longueur de la zone (cm)	Ca ⁴⁴ /Ca ⁴⁰ x 100
1 Comp. anodique		2,61 ± 0,015
2	3	2,62 ± 0,02
3	2	2,56 ± 0,015
4	3,5	2,50 ± 0,02
5	4	2,35 ± 0,015
6	2,5	2,11 ± 0,015
7	2,5	2,01 ± 0,015
8	2,5	1,82 ± 0,010
9 Comp. cathodique		1,70 ± 0,010

TABLEAU IV

2ème expérience

Diaphragme en sable de zircon

Longueur de la colonne : 17 centimètres

Volume du compartiment anodique : 7 cm³ en début d'expérience

Volume du compartiment cathodique : 70 cm³ (35 cm³ de CaBr₂)

Diamètre de la colonne : 14 millimètres

Intensité de courant : 1 ampère

Evolution de la composition isotopique dans le compartiment anodique
en fonction du temps

Numéro de l'échantillon	Durée du fonctionnement (jours)	Ca ⁴⁴ /Ca ⁴⁰ x 100	Ca ⁴⁶ /Ca ⁴⁰ x 100	Ca ⁴⁸ /Ca ⁴⁰ x 100	Ca ⁴⁵ activité spécifique relative
1	0	2, 17 ₋ +0, 01	0, 0034 ₋ +0, 0002	0, 201 ₋ +0, 0015	1, 00
2	8	2, 37 "		0, 238 "	1, 12
3	14	2, 68 "		0, 292 "	1, 27
4	20	2, 83 ₋ +0, 015		0, 317 ₋ +0, 003	1, 38
5	27	3, 18 "		0, 389 ₋ +0, 004	1, 60
6	34	3, 44 "	0, 0064 ₋ +0, 0004	0, 436 "	1, 72
7	41	3, 65 ₋ +0, 02	0, 0070 ₋ +0, 0004	0, 472 "	1, 84
8	48	3, 81 ₋ + "	0, 0073 ₋ +0, 0004	0, 504 "	1, 97
Composition isotopique du compartiment cathodique en fin d'expérience					
	49	1, 73 ₋ +0, 015		0, 122 ₋ +0, 001	

TABLEAU V

2ème expérience

Variation de la composition isotopique le long du diaphragme en fin

d'expérience

Numéro de la zone	Longueur de la zone (cm)	$\text{Ca}^{44}/\text{Ca}^{40}$ x 100	$\text{Ca}^{46}/\text{Ca}^{40}$ x 100	$\text{Ca}^{48}/\text{Ca}^{40}$ x 100
1		$3,77 \pm 0,02$	$0,0072 \pm 0,0008$	$0,495 \pm 0,004$
Compartiment anod.				
2	1,5	3,64 "	$0,0076 \pm 0,0004$	$0,462 \pm 0,004$
3	4	2,87 "	$0,0051 \pm 0,0003$	$0,287 \pm 0,002$
4	3	$2,49 \pm 0,015$	$0,0044 \pm 0,0003$	0,219 "
5	3	2,06 "	$0,0038 \pm 0,0003$	$0,161 \pm 0,001$
6	2,5	1,99 "		0,153 "
7	3	1,94 "		0,149 "
8		1,73 "		0,122 "
Compart. cathod.				

TABLEAU VI

3ème expérience

Diaphragme en sable de zircon

Longueur de la colonne : 15,5 centimètres

Diamètre de la colonne : 14 millimètres

Intensité du courant : 2,7 ampères

Volume du compartiment anodique : 5 cm³ en début d'expérience

Volume du compartiment cathodique : 70 cm³ de CaBr₂

Evolution de la composition isotopique dans le compartiment
anodique en fonction du temps

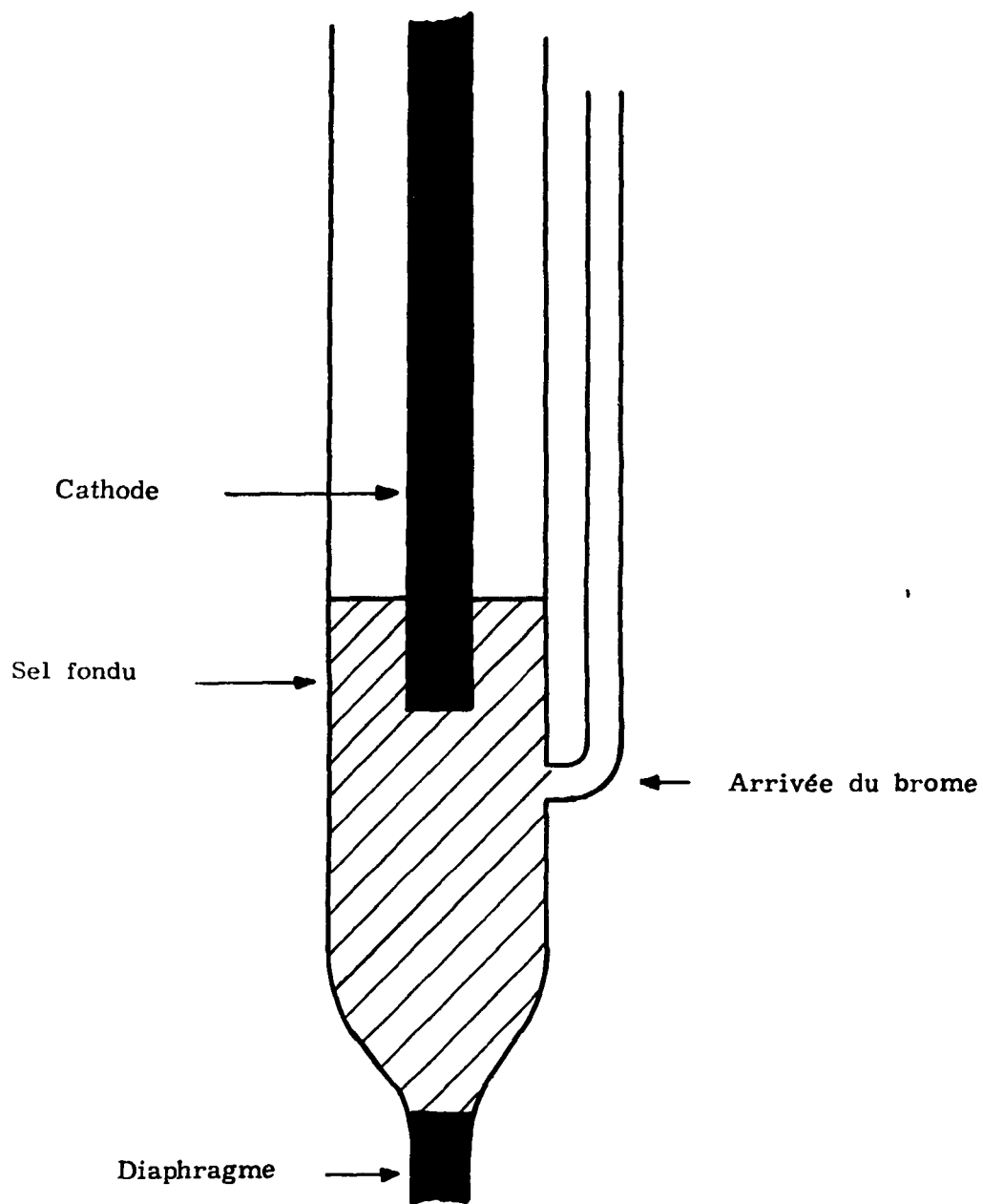
Numéro de l'échantillon	Durée de fonctionnement (jours)	Ca ⁴⁴ /Ca ⁴⁰ x 100	Ca ⁴⁶ /Ca ⁴⁰ x 100	Ca ⁴⁸ /Ca ⁴⁰ x 100
1	0	2,13 ± 0,015	0,0035 ± 0,0002	0,194 ± 0,002
2	11	3,04 ± 0,02	0,0058 ± 0,0002	0,363 ± 0,003
3	18	3,57 ± 0,02	0,0072 ± 0,0004	0,456 ± 0,004
4	22	4,01 ± 0,02	0,0084 ± 0,0003	0,540 ± 0,004
Composition isotopique du compartiment cathodique en fin d'expérience				
	22	1,95 ± 0,015		0,160 ± 0,001

TABLEAU VII

3ème expérience

Variations de la composition isotopique le long du diaphragme
en fin d'expérience

Numéro de la zone	Longueur de la zone (cm)	$\text{Ca}^{44}/\text{Ca}^{40}$ x 100	$\text{Ca}^{46}/\text{Ca}^{40}$ x 100	$\text{Ca}^{48}/\text{Ca}^{40}$ x 100
1 Compartim. anodique		4,01 \pm 0,02	0,0084 \pm 0,0003	0,540 \pm 0,004
2	1,5	3,96 "	0,0079 "	0,520 "
3	1,5	3,43 "	0,0074 "	0,379 \pm 0,003
4	1,5	2,83 \pm 0,015		0,254 \pm 0,0015
5	1	2,55 "		0,213 "
6	2	2,38 "		0,195 "
7	1,5	2,18 "		0,178 "
8	1,5	2,11 "		0,172 "
9	5	2,02 "		0,168 \pm 0,001
10 Compartim. cathodique		1,94 "		0,160 "



- Fig. 1a - Compartiment cathodique

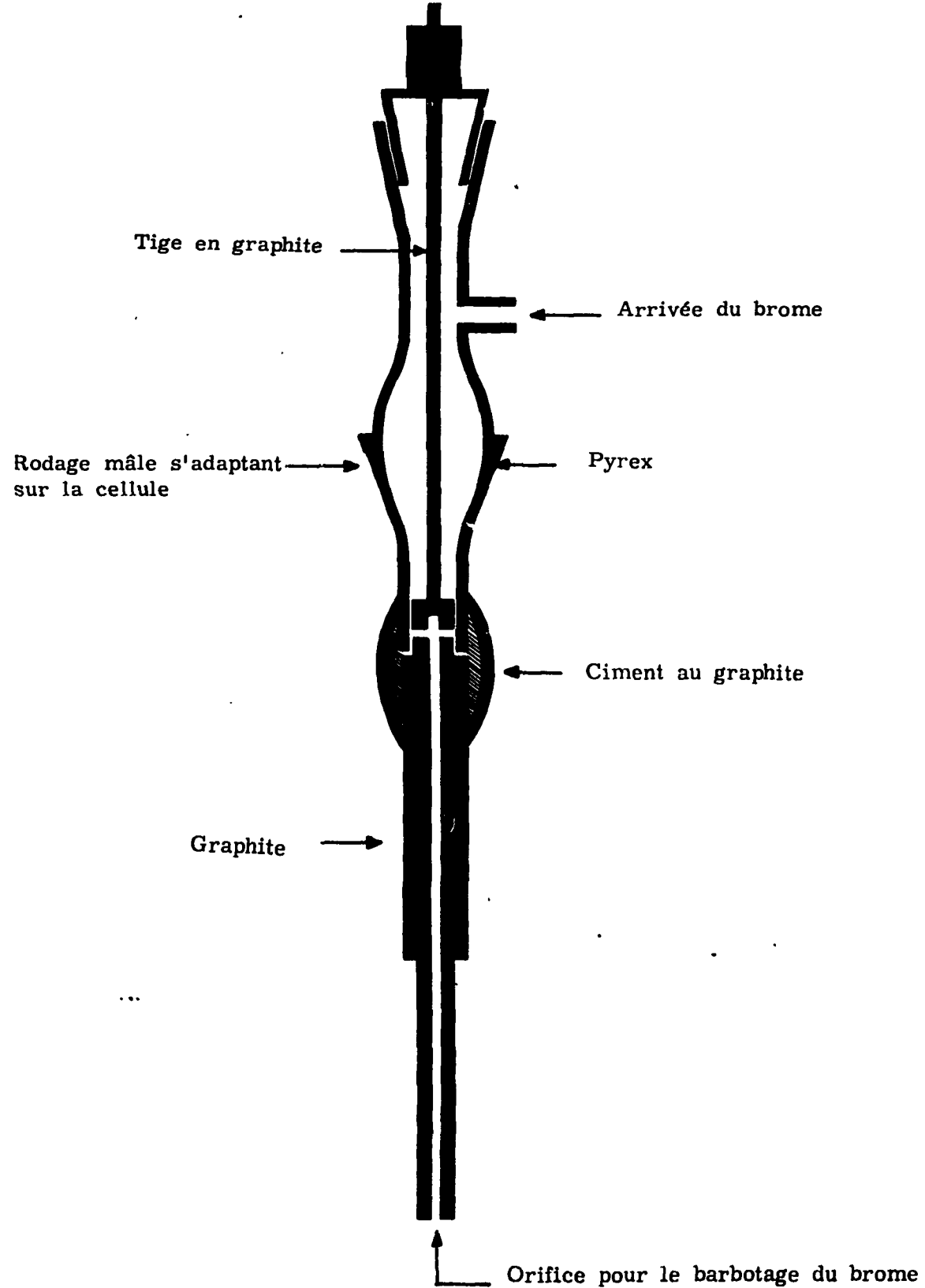
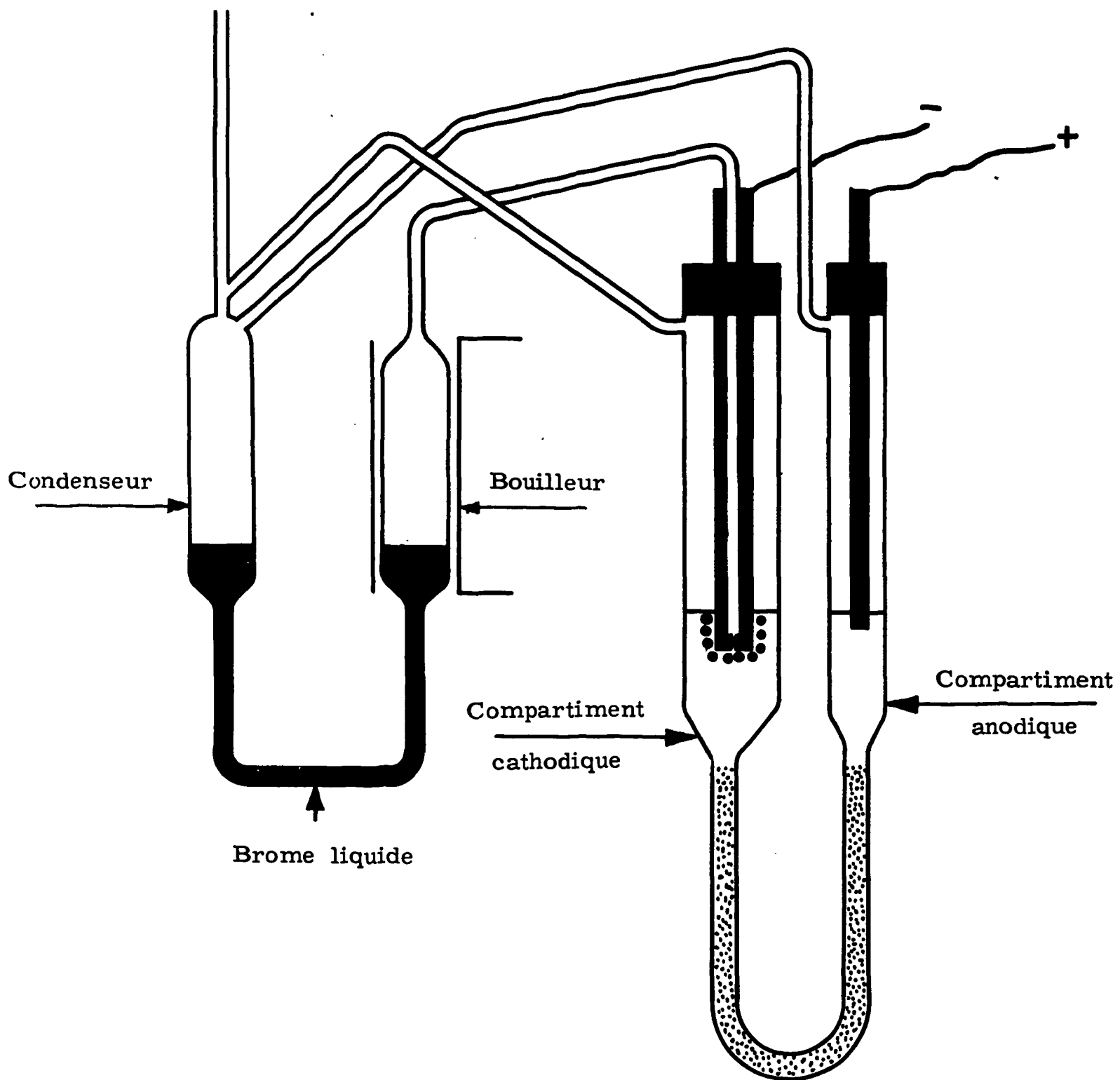


Fig. 1b - Schéma de l'électrode négative



- Fig. 2 - Schéma général de l'appareil

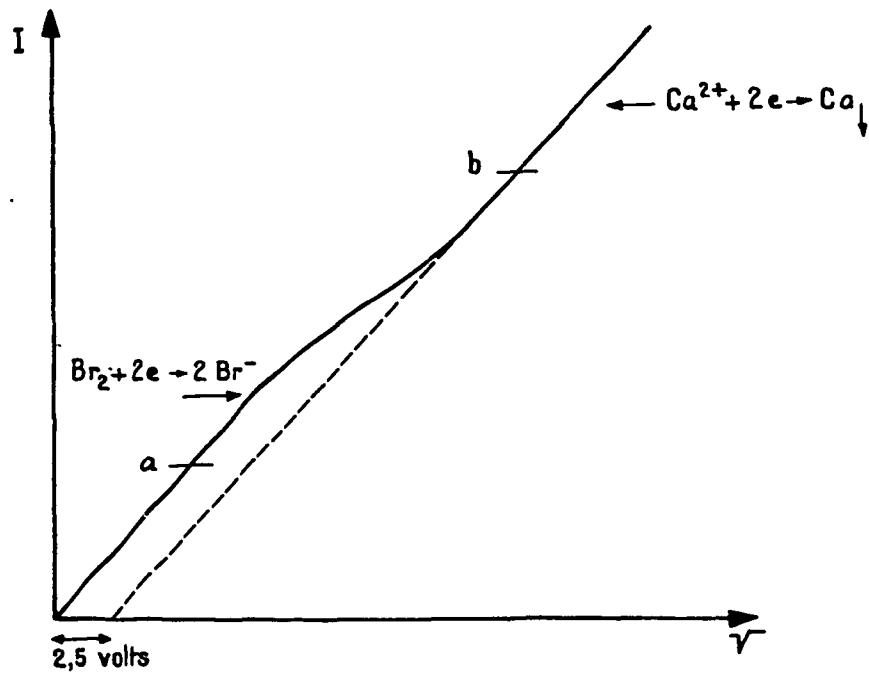


Fig. 3 - Configuration de principe de la caractéristique $I = f(V)$

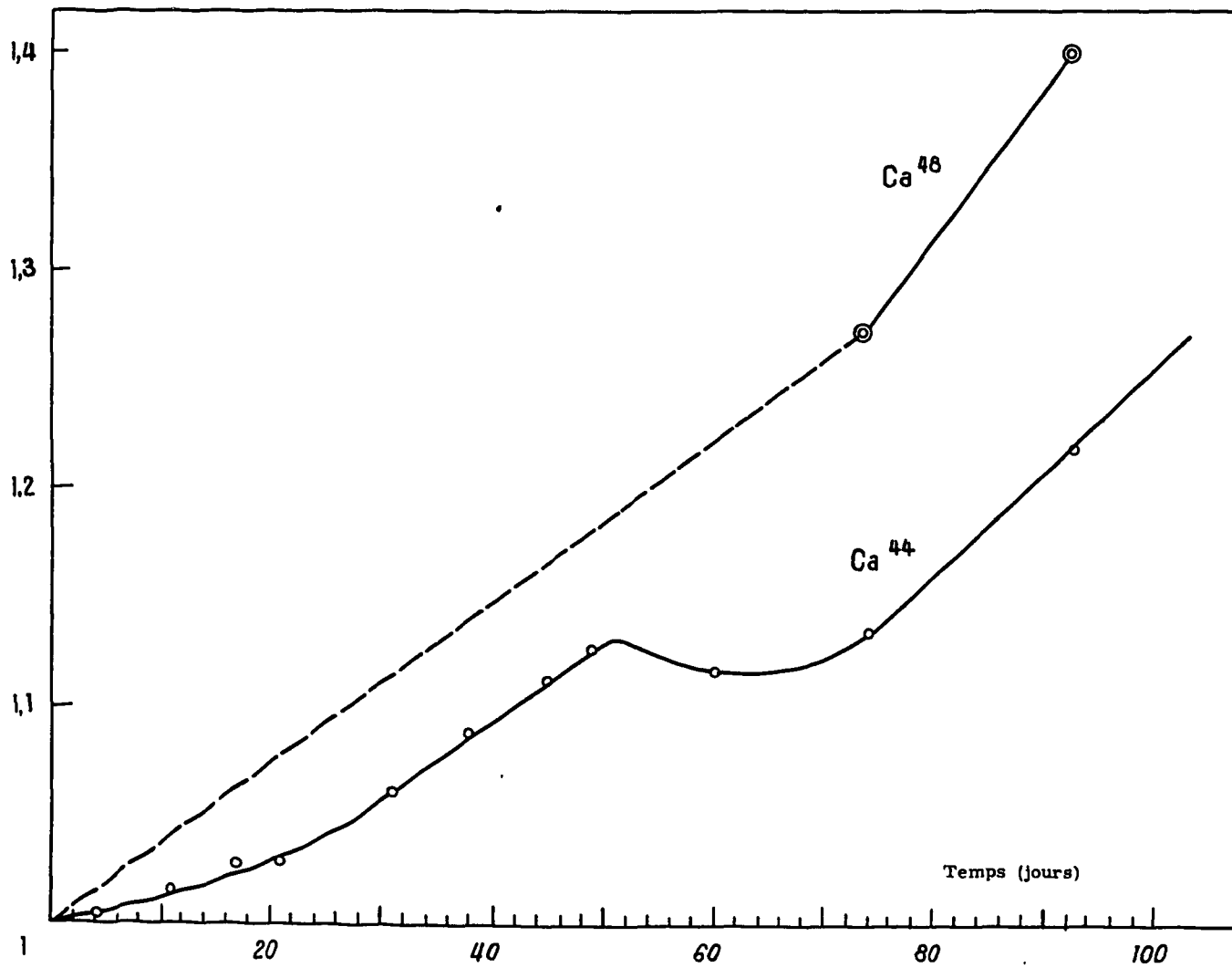
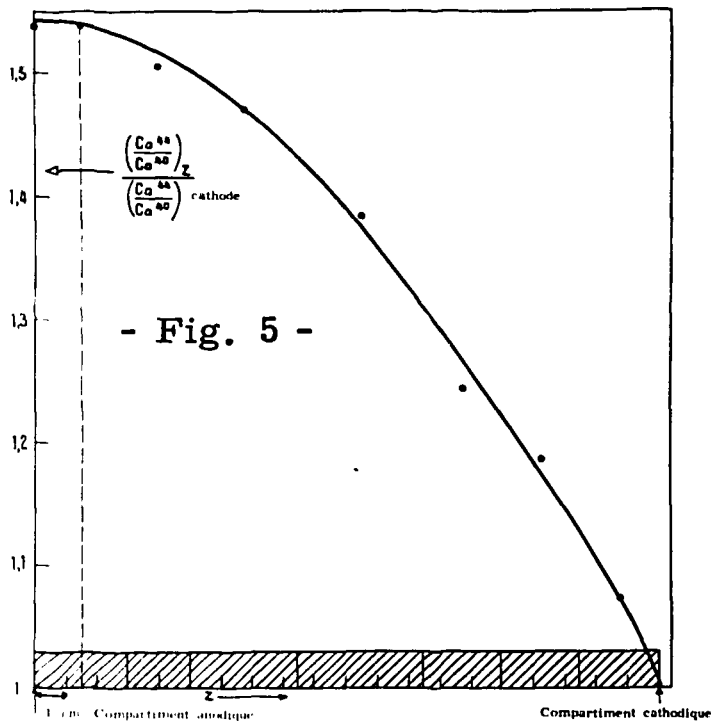
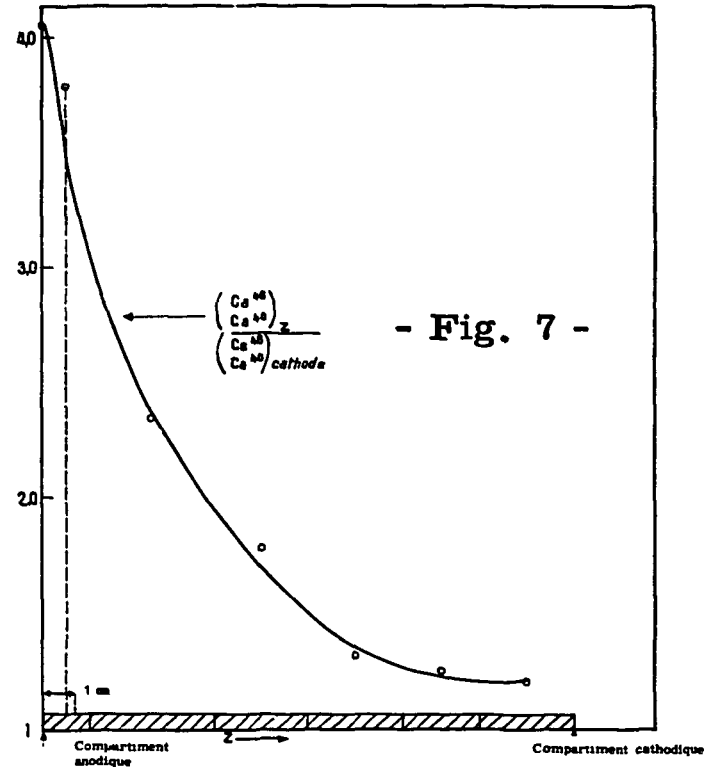


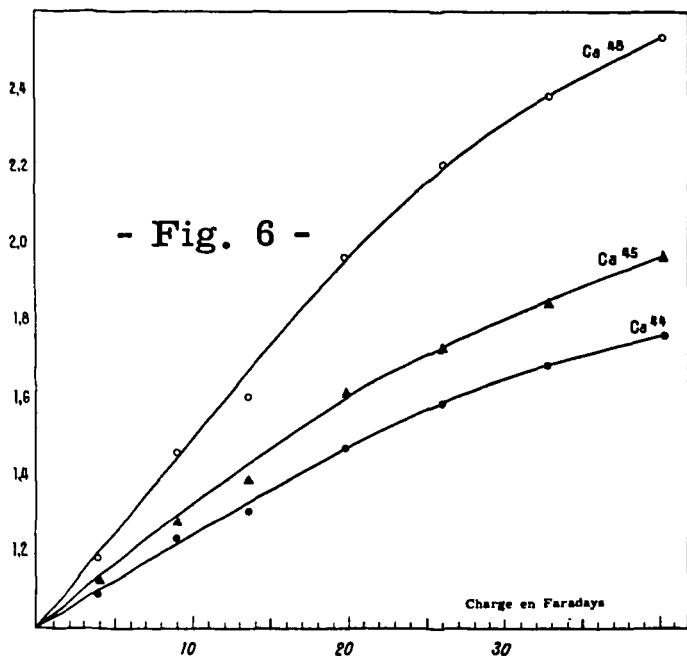
Fig. 4 - Facteur d'enrichissement - 1ère expérience - Compartiment anodique



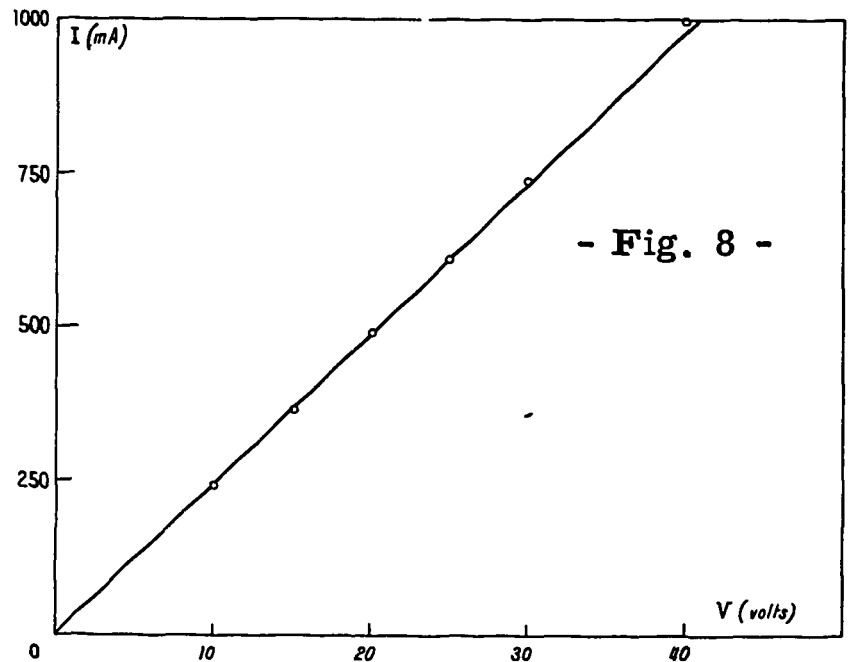
- Fig. 5 -



- Fig. 7 -



- Fig. 6 -



- Fig. 8 -

Fig. 5 - 1ère expérience - Variation du facteur d'enrichissement le long du diaphragme en fin d'expérience

Fig. 6 - Facteur d'enrichissement - 2ème expérience - Compartiment anodique

Fig. 7 - 2ème expérience - Variation du facteur d'enrichissement le long du diaphragme en fin d'expérience

Fig. 8 - Courbe $I = f(V)$
3ème expérience

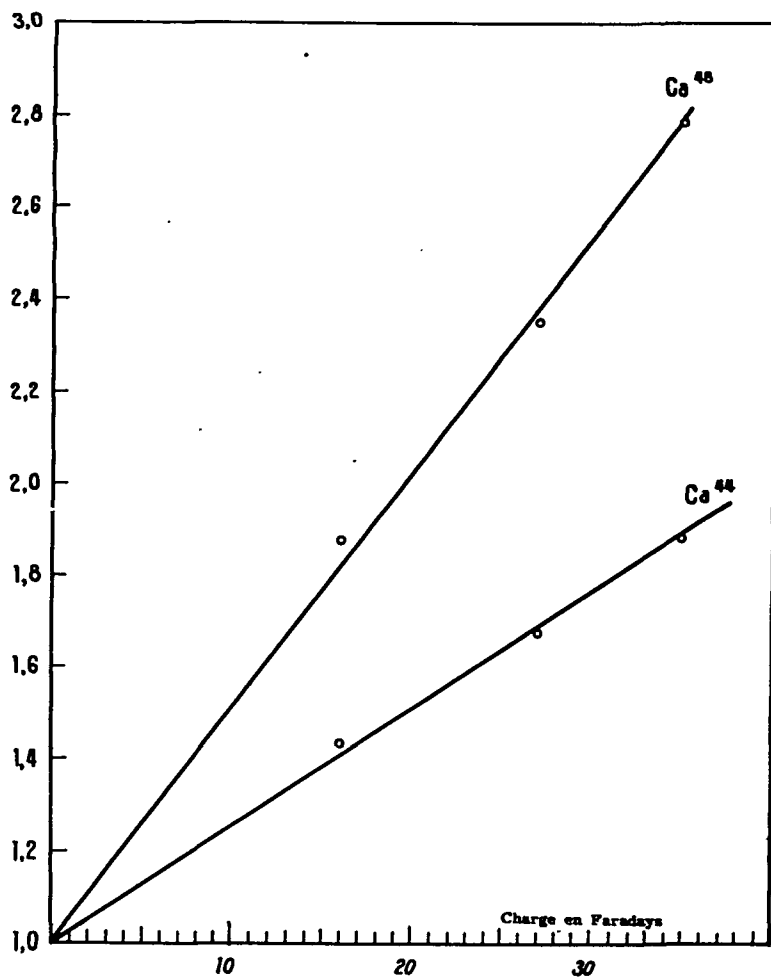


Fig. 9 - Facteur d'enrichissement - 3ème expérience
Compartiment anodique

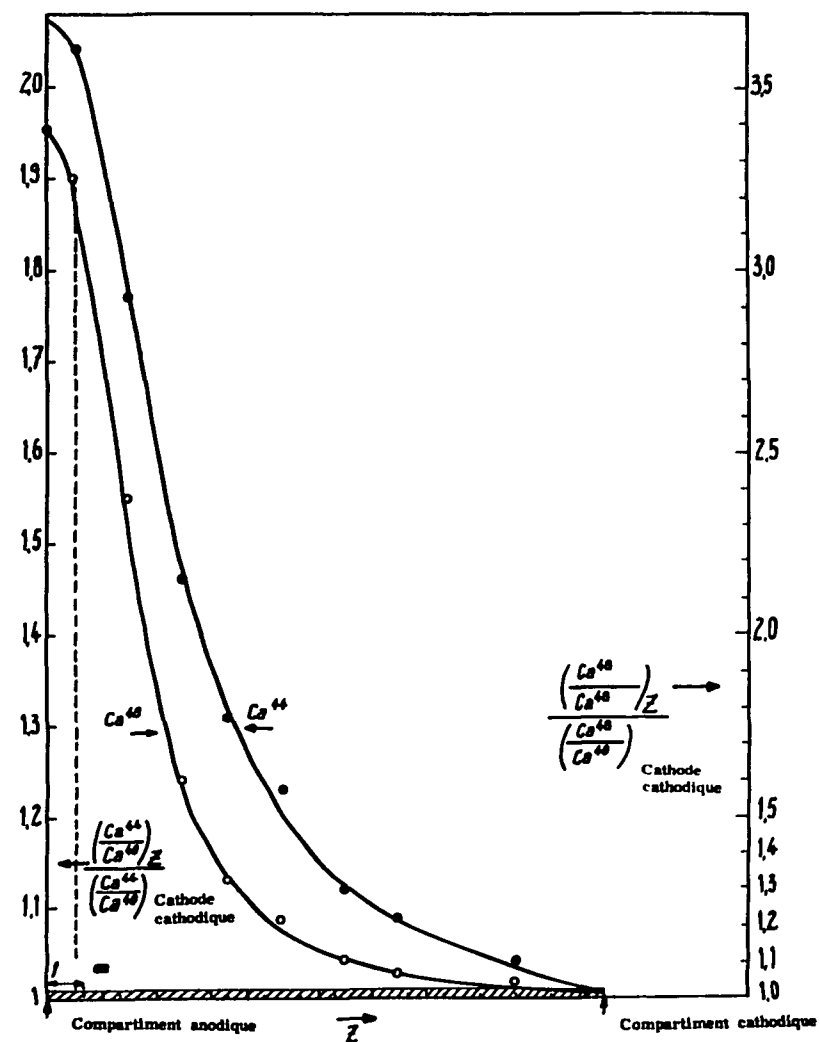


Fig. 10 - 3ème expérience - Variation du facteur d'enrichissement le long du diaphragme en fin d'expérience

FIN