

SEP 20 1962

COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE

MASTER

Centre d'Études Nucléaires de Saclay

T10-16715

DIRECTION DES MATÉRIAUX ET COMBUSTIBLES NUCLÉAIRES

Département de Physico-Chimie

SERVICE DES ISOTOPES STABLES

Section de Chimie des Isotopes

LEGAL NOTICE

This report was prepared as an account of Government sponsored work. Neither the United States, nor the Commission, nor any person acting on behalf of the Commission:

A. Makes any warranty or representation, expressed or implied, with respect to the accuracy, completeness, or usefulness of the information contained in this report, or that the use of any information, apparatus, method, or process disclosed in this report may not infringe privately owned rights; or

B. Assumes any liabilities with respect to the use of, or for damages resulting from the use of any information, apparatus, method, or process disclosed in this report.

As used in the above, "person acting on behalf of the Commission" includes any employee or contractor of the Commission, or employee of such contractor, to the extent that such employee or contractor of the Commission, or employee of such contractor prepares, disseminates, or provides access to, any information pursuant to his employment or contract with the Commission, or his employment with such contractor.

SEPARATION DES ISOTOPES PAR
ELECTROMIGRATION EN SELS FONDUS

par

F. MENES

RELEASE APPROVED — AUTHORIZATION ON
FILE IN RECEIVING SECTION

T10-16715

LEGAL NOTICE

This report was prepared as an account of Government sponsored work. Neither the United States, nor the Commission, nor any person acting on behalf of the Commission:

A. Makes any warranty or representation, expressed or implied, with respect to the accuracy, completeness, or usefulness of the information contained in this report, or that the use of any information, apparatus, method, or process disclosed in this report may not infringe privately owned rights; or

B. Assumes any liabilities with respect to the use of, or for damages resulting from the use of any information, apparatus, method, or process disclosed in this report.

As used in the above, "person acting on behalf of the Commission" includes any employee or contractor of the Commission, or employee of such contractor, to the extent that such employee or contractor of the Commission, or employee of such contractor prepares, disseminates, or provides access to, any information pursuant to his employment or contract with the Commission, or his employment with such contractor.

SEPARATION DES ISOTOPES PAR

ELECTROMIGRATION EN SELS FONDUS

par

F. MENES

AT(30-1)-2429.

SEPARATION DES ISOTOPES PAR ELECTROMIGRATION EN SELS FONDUS

par

F. MENES (*)

GENERALITES.-

L'isotopie a été découverte à la suite de l'étude des éléments radioactifs naturels. Au début du siècle RICHARDS montra que la masse atomique du plomb provenant des minerais d'uranium et de thorium était différente de celle du plomb ordinaire.

On s'aperçut par la suite que de nombreux éléments étaient constitués en réalité par un mélange d'atomes de masses différentes, alors que les chimistes avaient pensé que tous les atomes d'un même élément devaient être identiques, et du même coup le problème de la séparation des isotopes se trouva posé.

Au cours des années qui suivirent de nombreuses méthodes de fractionnement furent élaborées.

(*) Conférence faite à Paris par F. MENES le 17 mai 1961 à la Section d'Electrochimie de la Société Française des Electriciens.

L'une des premières a été l'utilisation des champs électrique et magnétique. Sir J.J. THOMPSON sépara ainsi les isotopes du néon.

La diffusion à travers des parois poreuses a été employée pour la première fois par ASTON et HULLIHEN (isotopes du chlore et du néon).

A l'heure actuelle, il existe un grand nombre de procédés de séparation des isotopes tels que la distillation moléculaire, la diffusion thermique, la diffusion gazeuse, l'échange d'ions, la centrifugation et l'électrolyse. C'est sur cette dernière méthode que nous nous étendrons.

Les procédés d'enrichissement isotopique par électrolyse peuvent être répartis en deux catégories:

- 1- Dans le premier cas les isotopes se fractionnent aux électrodes, les isotopes légers se déposant plus rapidement que les isotopes lourds. Un exemple de ce type est la préparation de l'eau lourde par électrolyse.
- 2- Dans les méthodes de la seconde espèce, que seules nous envisageons dans la suite de cet exposé, on utilise les différences de mobilité des ions, sans qu'il y ait fractionnement des isotopes lors du dépôt aux électrodes.

Ces procédés correspondent au phénomène bien connu de migration des ions (phénomène de HITTORF).

Bien que les expériences de ce type ne se soient montrées fécondes que durant les dernières années, elles sont cependant assez anciennes.

En 1921 LINDEMANN suggère la possibilité d'un enrichissement isotopique par électrolyse d'une solution, si la vitesse des ions isotopiques de l'élément considéré dépendait de leur masse.

Les premières expériences réalisées pour essayer d'observer un tel effet ont été tentées il y a une quarantaine d'années par LINDEMANN et PILLET en Angleterre, et par KENDALL, CRITTENDEN et WHITE aux U.S.A. Il faut citer aussi l'Autrichien MURMAN.

Le dispositif adopté par ces chercheurs était le suivant :

On remplissait un tube de verre horizontal avec un gel d'agar-agar contenant plusieurs sels en solution aqueuse. La figure 1 représente un dispositif utilisé pour l'enrichissement des isotopes du chlore.

Les mobilités des anions augmentant de la cathode vers l'anode, il s'ensuit que les surfaces de séparation entre les différentes zones restent nettes; lorsqu'on applique une tension entre les électrodes, les zones se déplacent au cours du temps.

En effet, la densité de courant étant constante dans le tube, le champ électrique est plus élevé dans les zones de faible conductivité.

Si un ion Cl^- parvient dans la zone située à gauche de la surface de séparation, il y rencontre un champ plus faible, sa vitesse se ralentit et il se trouve rapidement distancé par les ions OH^- environnants. De même si un ion OH^- parvient dans la zone contenant du chlorure de sodium, sa vitesse augmente et il parvient rapidement à la zone contenant les ions OH^- .

Les mêmes considérations peuvent être développées pour l'autre surface de séparation.

Les différentes zones se déplacent donc au cours du temps et, la vitesse des ions de Cl^{35} étant plus grande que celle des ions de Cl^{37} , il s'ensuit une accumulation de Cl^{35} à la frontière $\text{NaOH}-\text{NaCl}$.

Comme il était nécessaire de poursuivre l'opération très longtemps, le déplacement des zones pouvait être considérable (trente mètres en trois mois). On renvoyait alors de temps en temps la zone mobile vers la cathode en repoussant l'ensemble du gel.

Au bout d'un certain temps, on décomposait une tranche de la zone au voisinage de la frontière $\text{NaOH}-\text{NaCl}$ et la masse atomique de l'élément chlore était déterminée dans l'espoir d'en constater une diminution.

Des essais de ce genre furent également tentés par KENDALL et PILLEY, dans le but d'enrichir les isotopes du lithium et du magnésium.

Toutes ces expériences eurent un résultat négatif, bien que la méthode s'appliquât avec succès dans le cas de la séparation d'éléments voisins non isotopiques (Ba , Ca , Ca , Sr , I^- , SCN^- , terres rares).

A la suite de ces échecs, KENDALL publia en 1942 un article dans lequel il postulait que les vitesses de migration des ions ne montraient aucun effet isotopique.

En réalité, les méthodes d'analyse dont disposaient les premiers expérimentateurs étaient trop grossières pour leur permettre de détecter les petits enrichissements isotopiques qu'ils avaient certainement obtenus.

Les recherches entreprises durant la dernière guerre, aux U.S.A. et en Allemagne, furent cette fois couronnées de succès.

BREWER, MADORSKY et leurs collaborateurs, à Washington, parvinrent à faire passer le rapport $\frac{K^{39}}{K^{41}}$ de la valeur 14,2 à 24 en trois semaines, dans une solution de sulfate de potassium. Une tentative sur le chlore permit d'augmenter la teneur du Cl^{35} de 75,76% à 80,70%. L'expérience avait duré trois semaines également.

Bien que les expériences aient eu un résultat positif, les enrichissements isotopiques atteints étaient tout de même relativement faibles, probablement par suite de l'hydratation des ions qui diminue considérablement l'effet.

On pensa que les différences de mobilité des ions isotopiques d'un élément étaient plus marquées en milieu "sec", c'est-à-dire en sels fondus, et vers la fin de la guerre KLEIM, en Allemagne, mit au point sa méthode d'électromigration à contre courant.

Nous allons exposer le principe du procédé sur un schéma de l'appareil à l'aide duquel KLEIM a pu enrichir les isotopes du lithium (fig.2).

La cellule d'électromigration est constituée par un tube à nombre de transports. Un diaphragme - dont le but est de limiter les effets de la diffusion et de la convection - sépare deux compartiments au sein desquels plongent les électrodes. Le tube est rempli de chlorure de lithium fondu, la cellule étant placée dans un four électrique. Le chlore qui se dégage à l'anode est renvoyé à la cathode où il se recombine avec le lithium déposé.

Le résultat de l'opération est un simple transport de $LiCl$ dans le compartiment cathodique au détriment du sel contenu dans le compartiment anodique.

Le diaphragme est constitué par une poudre (verre, quartz, alumine ou tout autre substance convenable) qui permet le passage du sel. Les niveaux dans les deux compartiments se maintiennent automatiquement à la même hauteur par simple effet de vases communicants. L'ensemble du sel est alors immobile par rapport à l'appareil et il n'y a jamais apparition de métal dans le compartiment cathodique. Il est nécessaire d'effectuer ce contre-courant.

En effet, si nous nous bornons à électrolyser purement et simplement le chlorure de lithium, nous obtiendrons bien un très petit enrichissement, mais l'opération s'arrêtera dès qu'il y aura assez de lithium déposé pour que les électrodes ne plongent plus. Par ailleurs, lorsque tout le lithium sera déposé on aura évidemment une certaine quantité de métal dont la composition isotopique sera identique à la composition initiale.

L'ion Li_6^+ étant plus mobile que l'ion Li_7^+ , il s'ensuit une accumulation progressive de Li_6 dans le compartiment cathodique.

Le contre-courant repousse l'ensemble des ions Li^+ avec une vitesse intermédiaire entre les vitesses des deux isotopes. L'effet global se traduit donc par un déplacement de Li_6 dans un sens et un déplacement de Li_7 dans l'autre sens.

Cette méthode est théoriquement applicable à n'importe quel élément et n'importe quel sel. Bien entendu, il faudra que certaines conditions soient réalisées pour que l'opération puisse être conduite pratiquement (le sel doit être suffisamment conducteur et la recombinaison doit pouvoir être réalisée facilement)

Nous allons à présent essayer d'analyser quelque peu le phénomène.

..../..

8

La théorie exposée ici est très approchée et a pour but seulement de nous renseigner sur la façon dont procède l'enrichissement en fonction du temps.

Supposons que nous ayons affaire à un élément constitué par deux isotopes, par exemple le lithium. Le lithium a deux isotopes, la composition naturelle étant de 93% en Li^7 et 7% en Li^6 .

Considérons un tube de séparation avec deux compartiments, (fig.3), le compartiment cathodique où nous désirons obtenir un produit enrichi en isotope léger Li^6 et le compartiment anodique dont nous supposons le volume infini. Sa composition pourra alors être considérée comme constante.

L'appareil est rempli de LiCl . Nous électrolysons le sel et nous établissons un contre courant de vitesse v de façon que l'ensemble des ions Li^+ soit immobile par rapport à la cellule d'électrolyse.

Soit C la concentration du Li^6 exprimée par exemple en équivalents par cm^3 de liquide, C_2 celle du Li^7 . Soit S la section du diaphragme.

Le flux d'ions Li^6 , c'est-à-dire le nombre d'équivalents de Li^6 qui passe en une seconde à travers une section du diaphragme au niveau du compartiment cathodique, est

$$J_1 = S C_1 (v_1 - v)$$

v_1 étant la vitesse de migration des ions Li_1^+ en l'absence de contre-courant

De même le flux d'ions Li_2^+ est

$$J_2 = S C_2 (v_2 - v)$$

L'ensemble des ions Li^+ étant immobile on aura

$$J_1 + J_2 = 0$$

$$C_1(v_1 - v) + C_2(v_2 - v) = 0.$$

Nous en tirons la vitesse du contre courant :

$$v = \frac{C_1 v_1 + C_2 v_2}{C_1 + C_2}$$

Reportons cette quantité dans l'expression de J_1 ; on aura :

$$\begin{aligned} J_1 &= S C_1 \left(v_1 - \frac{C_1 v_1 + C_2 v_2}{C_1 + C_2} \right) \\ &= S C_1 \frac{C_2 (v_1 - v_2)}{C_1 + C_2} \end{aligned}$$

Pendant un temps dt , le nombre d'équivalents de Li^6 qui est passé dans le compartiment cathodique est $J_1 dt$. Cette expression est égale à $V_c dC_1$ si V_c est le volume du compartiment cathodique et dC_1 la variation de concentration de l'ion Li^6 dans ce compartiment.

On aura donc :

$$S_1 dt = V_c d c_1$$

$$S_1 \frac{c_2(v_1 - v_2) dt}{c_1 + c_2} = V_c d c_1$$

c'est-à-dire

$$\frac{S(v_1 - v_2) dt}{V_c} = d c_1 \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \right)$$

Or, $c_1 + c_2 = \text{constante}$: c'est la concentration du LA total. D'où

$$d c_1 = - d c_2$$

et

$$\frac{d c_1}{c_1} = - \frac{d c_2}{c_2} = S \left(\frac{v_1 - v_2}{V_c} \right) dt$$

$$d(\log \frac{c_1}{c_2}) = \frac{S(v_1 - v_2)}{V_c} dt$$

En intégrant, si l'on désigne par $(\frac{c_1}{c_2})_0$ le rapport des concentrations initiales, on trouve

$$\log \frac{(\frac{c_1}{c_2})}{(\frac{c_1}{c_2})_0} = \frac{S(v_1 - v_2)}{V_c} t$$

On appelle généralement "facteur d'entraînement" la quantité

$$\frac{(\frac{c_1}{c_2})}{(\frac{c_1}{c_2})_0} = \sigma$$

Il vient donc

$$\log \sigma = \frac{S(v_1 - v_2)}{V_c} t$$

L'enrichissement procède donc en fonction exponentielle du temps, c'est-à-dire en fonction exponentielle de la charge passée à travers la cellule. La théorie précédente est simplifiée. L'analyse plus rigoureuse du phénomène en tenant compte de la diffusion conduit à des expressions beaucoup plus compliquées.

INTERET DE LA SEPARATION DES ISOTOPES DU LITHIUM ET DU CALCIUM.-

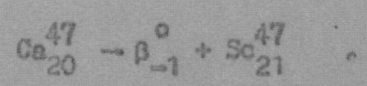
Mis à part l'intérêt purement scientifique de la séparation, l'enrichissement des isotopes des éléments calcium et lithium présente un intérêt pratique.

Le lithium peut être utilisé dans les piles atomiques, comme mélange fluide, fissile ou caloporteur (métal fondu ou sel fondu). Malheureusement, l'isotope 6 présente une section efficace de capture assez considérable pour les neutrons (900 barns), ce qui suffit pour interdire l'emploi du Li naturel. Le lithium 7 a une section efficace considérablement plus faible. Il faudrait donc obtenir du lithium 7 à l'état pur ou très enrichi.

Par ailleurs, l'isotope 6 a des applications militaires. La déutérium de Li^6 peut être utilisé pour des réactions de fusion explosives.

L'élément calcium possède 6 isotopes stables dont les masses respectives sont 40, 42, 43, 44, 46, 48.

L'isotope 47, instable, est un émetteur β et γ :

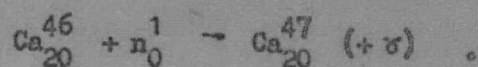


La période est de 4,7 jours. L'énergie du rayonnement β émis est de 2 Mev et celui du γ 1,3 Mev.

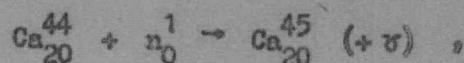
.../...

La forte énergie du rayonnement β émis par ce radioélément, et sa période relativement courte, le rendent particulièrement intéressant pour l'étude du métabolisme du calcium dans les os et la détection des tumeurs cancéreuses.

Ce radioélément est produit à partir d'une réaction n, γ sur l'isotope 46 :



Malheureusement, on ne peut songer à utiliser le calcium naturel irradié, car l'isotope 44 donne lieu, par une réaction n, γ , à la formation de Ca^{45} :



qui est aussi un émetteur β d'énergie 0,25 Mev, mais de période assez longue (environ 5 mois). Le calcium naturel irradié par les neutrons serait trop toxique, par suite de la présence de Ca^{45} , pour pouvoir être utilisé.

Le problème consiste donc à enrichir le calcium naturel en calcium 46. Malheureusement la concentration du calcium 46 dans le calcium naturel est extrêmement petite (3.10^{-5}).

Il n'y a pas de méthode, mise à part la séparation électromagnétique, qui permette de l'obtenir à l'état pur d'une façon économique.

Par ailleurs, le coût de la séparation électromagnétique est extrêmement élevé. Le rendement d'un calutron étant de l'ordre de 5%, le prix de revient actuel du milligramme de calcium 46 obtenu par séparation électromagnétique à partir du calcium naturel, est de l'ordre de 4.000 N.F.

Les spécialistes ont suggéré d'effectuer la séparation en deux étapes. Dans le premier stade, on enrichirait le calcium naturel en isotope 46 par une méthode physico-chimique, le prix de l'enrichissement préalable étant faible, avec une valeur limitée du facteur de séparation.

Le deuxième stade consisterait à effectuer une séparation électromagnétique sur le produit préalablement enrichi, ce qui diminuerait considérablement le coût de la seconde étape qui est la plus onéreuse.

TECHNIQUE EXPERIMENTALE.

En ce qui concerne la séparation des isotopes du lithium, les premières expériences d'électromigration conduites en France l'ont été, à notre connaissance, par E. SATTO, du C.E.A., qui a obtenu des coefficients d'enrichissements de 1,05. Elles ont été poursuivies par M. CHEILA, du Collège de France, qui a réalisé un type d'appareil de fonctionnement sûr et continu. L'appareillage utilisé pour l'enrichissement des isotopes du calcium est tout à fait analogue dans son principe.

La cellule d'électromigration, placée dans un four électrique transparent, est un simple tube à nombre de transport, constitué par deux compartiments séparés par un diaphragme (fig. 4). Dans ces compartiments plongent deux électrodes de graphite, et la cellule est remplie d'un sel de lithium ou de calcium suivant le cas. Ce sel est le bromure. La recombinaison du métal qui apparaît dans le compartiment cathodique se fait grâce à une circulation continue de brome. Le brome liquide est vaporisé dans une ampoule chauffée et envoyé dans le compartiment cathodique par passage à travers la cathode elle-même qui est creuse. L'excès de brome, qui sort à la base de l'électrode, quitte le compartiment par une tubulure latérale et vient se condenser dans une autre ampoule qui communique avec la première. Par simple effet de vases communicants, le liquide revient dans la première ampoule et le cycle recommence. Le brome provenant de l'électrolyse est renvoyé dans le circuit.

L'appareil peut ainsi fonctionner très longtemps, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir autrement que pour rajouter un peu de brome de temps à autre afin de compenser les fuites.

Un système de sécurité permet de contrôler le fonctionnement de l'appareil, c'est-à-dire la recombinaison du métal avec le brome. En effet, si pour une raison quelconque (barbotage de brome arrêté), il y a apparition de

métal dans le compartiment cathodique, les parois de l'appareil et la cathode son attaqués. Par ailleurs, l'action du brome sur une quantité notable de métal déposé peut être très violente et conduire à une destruction de l'appareil. Ce phénomène était particulièrement marqué dans le cas du lithium.

Pour éviter ces inconvénients, l'électrolyse est effectuée pendant une période prédéterminée. Au bout de ce laps de temps le courant est interrompu et un appareil de mesure permet de contrôler la différence de potentiel entre les électrodes. S'il y a dépôt métallique, cette différence de potentiel est de l'ordre de 2,5 volts. L'électrolyse ne pourra reprendre son cours que lorsque tout le métal a disparu par suite de la recombinaison avec le brome. La différence de potentiel entre les électrodes sera redevenue très faible et l'électrolyse recommence.

Naturellement, toutes ces opérations s'effectuent automatiquement par l'intermédiaire d'un système de relais.

En pratique, la période de passage du courant est choisie en fonction de l'intensité de telle façon qu'il ne se produise pas d'accident.

EXPERIENCES DE SEPARATION DES ISOTOPES DU LITHIUM?

En ce qui concerne la séparation des isotopes du lithium, les expériences ont été effectuées par M. CHEILA avec un mélange de KBr et LiBr qui permet d'abaisser la température et, de ce fait, d'éviter l'attaque du pyrex par le bromure de lithium.

A priori, l'utilisation d'un tel système KBr-LiBr est absolument illogique. En effet, par suite des différences de mobilité des ions Li^+ et K^+ , la séparation des éléments correspondants doit s'effectuer très facilement et l'on doit rapidement aboutir à une chaîne KBr-LiBr, le bromure de lithium

..../..

étant transporté vers le compartiment cathodique. La température de la cellule au bout d'un certain temps être maintenue supérieure à la température de fusion de chacun des constituants.

Néanmoins, les expériences avaient été tentées dans l'espoir d'obtenir un enrichissement isotopique du lithium avant que la séparation des éléments lithium et potassium n'empêche l'opération d'être poursuivie.

Or, l'expérience a révélé le phénomène suivant : le fractionnement des éléments Li et K s'arrête assez rapidement et l'on aboutit à un état stationnaire après lequel le rapport $\frac{Li}{K}$ ne varie plus - les mobilités apparentes des ions Li^+ et K^+ devenant égales - alors que le fractionnement des isotopes des éléments correspondants se poursuit jusqu'à atteindre des valeurs très élevées. La température de travail est alors de 450°

Cet effet extrêmement heureux a rendu possible des fractionnements prolongés conduisant à des enrichissements d'environ 10% sur le lithium, ce qui correspond à du Li^7 à l'état pratiquement pur (99,97%) sur des quantités de l'ordre du gramme.

Pour interpréter ce phénomène, M. CHELLA a émis l'hypothèse qu'il devait exister des complexes du type $Li^+ + n Br^- \rightleftharpoons LiBr_n^{n+1}$, ou plutôt des assemblages statistiques, qui modifieraient la mobilité apparente des ions Li^+ .

Dans un mélange très riche en bromure de lithium, la mobilité des ions Li^+ n'est pas modifiée par la présence de bromure de potassium.

Au contraire, dans un mélange très pauvre en $LiBr$, il y a une très forte proportion d'ions Li^+ empoisonnés dans une cage d'ions Br^- . Dans ces conditions la mobilité des ions Li^+ est considérablement diminuée, et le résultat global correspond à un transport de lithium vers le compartiment anodique.

Entre les deux extrêmes il y a un équilibre pour lequel la mobilité apparente des ions Li^+ serait la même que celle des ions K^+ .

D'autres expériences effectuées sur le système LiBr-NaBr ont conduit à des résultats identiques.

EXPERIENCES DE SEPARATION DES ISOTOPES DU CALCIUM.-

En ce qui concerne la séparation des isotopes du calcium, nous avons essayé d'utiliser un couple d'éléments qui donnerait lieu au phénomène précédent, afin de travailler à une température inférieure à 765° , température de fusion du bromure de calcium pur.

Les essais effectués sur les systèmes $\text{CaBr}_2\text{-KBr}$ et $\text{CaBr}_2\text{-LiBr}$ ont abouti à un résultat négatif, en ce sens que la séparation des éléments s'effectue très rapidement et est totale, les ions Li^+ et K^+ étant beaucoup plus mobiles que Ca^{++} .

On aboutit donc à une chaîne $\text{CaBr}_2\text{-KBr}$ et $\text{CaBr}_2\text{-LiBr}$ le bromure de calcium s'accumulant dans le compartiment anodique.

Il est donc nécessaire de travailler à une température de plus en plus élevée au fur et à mesure que la séparation des éléments se produit, jusqu'à atteindre 765° température de fusion de CaBr_2 pur.

Ces expériences ont néanmoins permis d'obtenir des facteurs de séparation de l'ordre de 2 à 3.

Il n'y a donc à priori aucun intérêt à partir d'un mixte.

Nous avons tenté d'utiliser le bromure de calcium pur. L'expérience a montré que le fonctionnement était beaucoup moins satisfaisant; la neutralisation est difficile, et cet effet semble nettement lié à la vitesse de solubilisation du brome, très grande en présence de BrK .

Une des difficultés principales dans ce type d'expériences est d'obtenir des températures élevées dans un four électrique transparent, et aussi d'éviter la condensation de sel qui se produit dans les parties froides de l'appareil par suite de la tension de vapeur non négligeable des sels à cette température. Pour des expériences qui doivent durer plusieurs mois, ce dernier effet n'est pas négligeable.

En ce qui concerne les résultats obtenus sur la séparation des isotopes du calcium, dans une des dernières expériences nous avons réussi à multiplier par 2 la teneur du Ca^{46} , sur une quantité égale à 4 grammes de calcium, au prix d'une dépense d'énergie pour l'électrolyse de 100 kWh. Le produit préenrichi à deux fois la teneur naturelle reviendrait donc à 1 N.F. le gramme environ.

Le prix du préenrichissement est donc tout à fait négligeable si l'on ne prend en considération que la dépense d'énergie électrolytique.

Il n'est pas impossible toutefois de concevoir des cellules d'électromigration auto-chauffantes, c'est-à-dire que la fusion du sel serait entretenue par l'effet Joule dû au passage du courant d'électrolyse, ainsi que l'utilisation d'un matériau autre que le verre de silice dont le prix est élevé.

Ceci n'est encore qu'un projet et c'est pourquoi nous poursuivons encore à l'heure actuelle ces études, avec l'aide financière de l'U.S.A.E.C. et de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique de Vienne qui coordonne les problèmes liés à la production et l'utilisation du calcium-47.

Figure 1

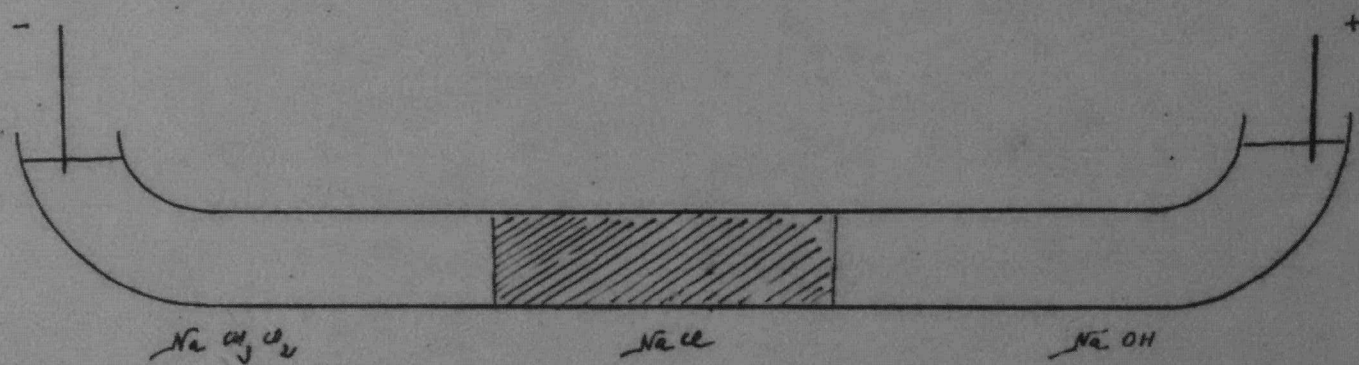


Figure 2

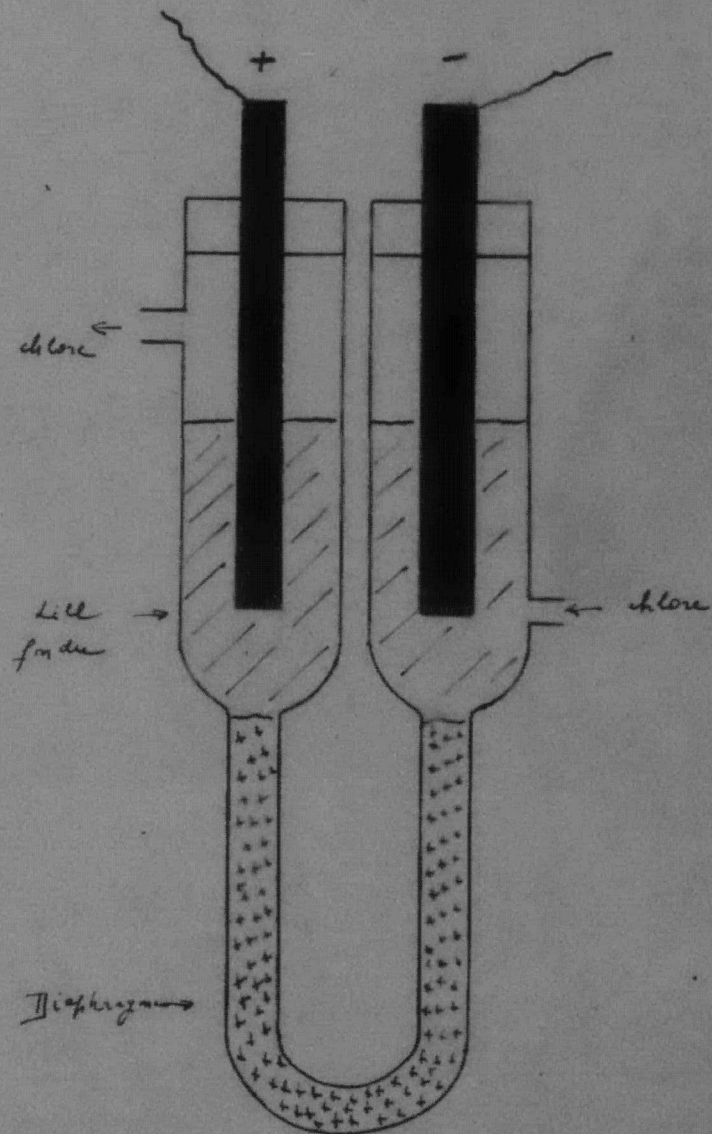


Figure 3

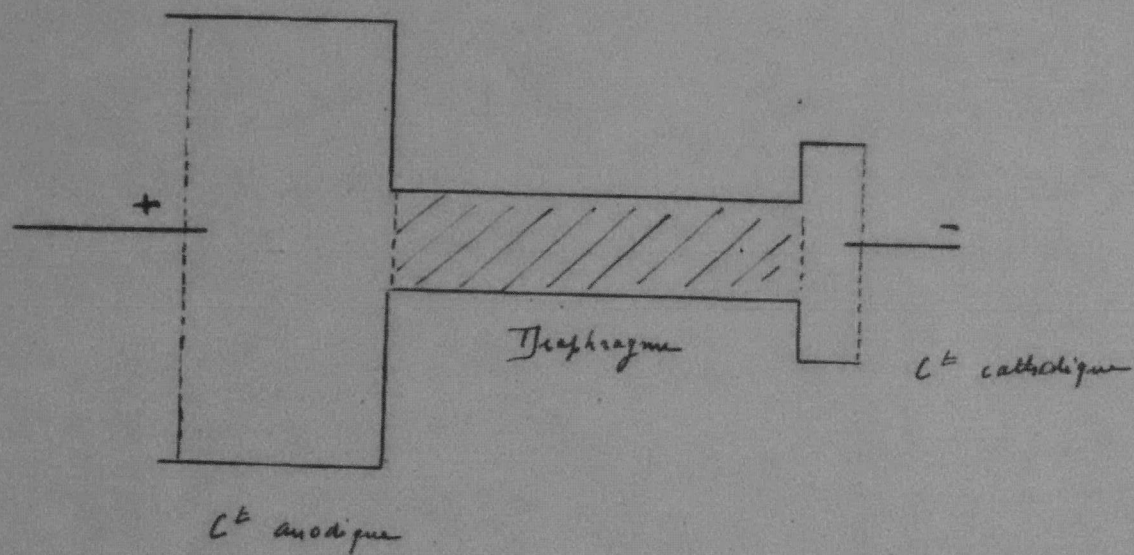


Figure 4

